

## Νέα γενιά συνθέτων υλικών ανόργανης μήτρας (TRM) για την ενίσχυση φέρουσας τοιχοποιίας

Κ. Γ. Παπανικολάου

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

Αθ. Χ. Τριανταφύλλου

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

Κ. Κάρλος & Μ. Παπαθανασίου

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

*Λέξεις κλειδιά:* Ενισχύσεις, ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα, άοπλη φέρουσα τοιχοποιία

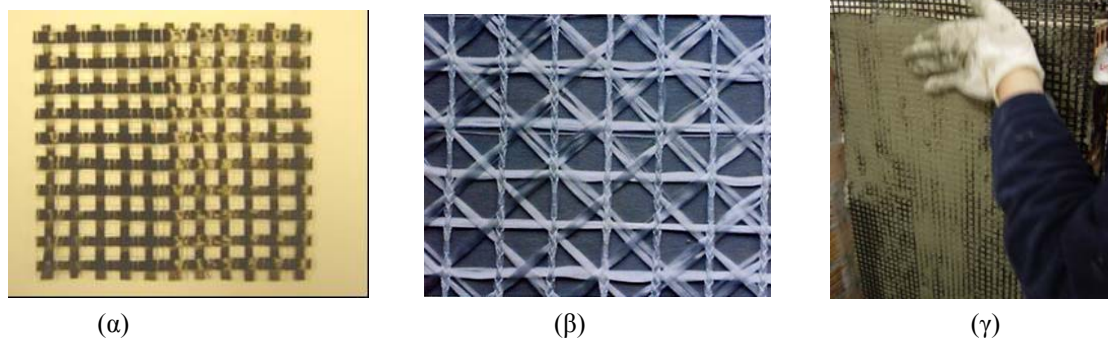
**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Στην εργασία αναπτύσσεται μια νέα τεχνική ενίσχυσης στοιχείων άοπλης φέρουσας τοιχοποιίας. Η τεχνική βασίζεται στη χρήση συνθέτων υλικών, τα οποία αποτελούνται από ινοπλέγματα ινών σε ανόργανη μήτρα (π.χ. κονίαμα με βάση το τσιμέντο), αποσκοπώντας στην επίλυση προβλημάτων που χαρακτηρίζουν 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 τοιχίσκων σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση εντός και εκτός επιπέδου. Καταδεικνύεται ότι η αποτελεσματικότητα των μανδύων TRM είναι υψηλή και σε αρκετές περιπτώσεις μεγαλύτερη από αυτήν των μανδύων ΙΟΠ.

### 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα κτίρια από άοπλη φέρουσα τοιχοποιία, τα οποία απαρτίζουν ένα σημαντικό ποσοστό του δομημένου περιβάλλοντος στη χώρα μας, χαρακτηρίζονται από αυξημένη σεισμική τρωτότητα και ως εκ τούτου αποτελούν μία από τις μεγαλύτερες απειλές για απώλεια ζωής και καταστροφή περιουσίας. Πρόδηλη, επομένως, είναι η ανάγκη άμεσης αποκατάστασης των κτιρίων αυτών, ενώ τα οφέλη της ανάπτυξης αποτελεσματικών, οικονομικά πρόσφορων αλλά και φιλικών προς το περιβάλλον τεχνικών ενίσχυσης είναι προφανή και δεν χρήζουν ιδιαίτερης επιχειρηματολογίας. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση μίας νέας μεθόδου ενίσχυσης στοιχείων φέρουσας τοιχοποιίας με τη χρήση υλικών, τα οποία προκύπτουν συνδυάζοντας πλέγματα συνεχών ινών με ανόργανα κονιάματα (π.χ. με βάση το τσιμέντο). Αυτή η νέα γενιά συνθέτων υλικών αποτελεί μια βελτιωμένη πρόταση σε σύγκριση με τα ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ), η χρήση των οποίων δεν έχει διαδοθεί ακόμα ευρέως σε κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία κυρίως λόγω ορισμένων προβλημάτων που αφορούν στη χρήση ρητινών. Στα προβλήματα αυτά περιλαμβάνεται η ασυμβατότητα με τα υλικά παλαιών τοιχοδομών, η δυσκολία εφαρμογής σε επιφάνειες με ανωμαλίες και/ή μεγάλη τραχύτητα, η απομείωση αντοχής των πολυμερών σε υψηλές θερμοκρασίες, το υψηλό κόστος και ο περιορισμός της ικανότητας “αναπνοής” των δομικών στοιχείων που καλύπτονται από μανδύες ΙΟΠ.

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 σε στοιχεία σκυροδέματος

αλλά και φέρουσας τοιχοποιίας (Kolsch 1998) 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 βροχίδες. Τα πλέγματα αυτά μπορούν να κατασκευάζονται από δέσμες ινών ανά αποστάσεις σε δύο ή περισσότερες διευθύνσεις (Σχ. 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 (Σχ. 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 κλώνων 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.

Οι πρώτες εργασίες όπου ινοπλέγματα συνδυάστηκαν με κονιάματα για την ενίσχυση δομικών στοιχείων ήταν αυτές των Curbach & Brueckner (2003) και Curbach & Ortlerpp (2003) και αφορούσαν σε οπλισμένο σκυρόδεμα. Στις εργασίες αυτές γίνονται μελέτες συνάφειας ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας – σκυροδέματος και παρουσιάζονται αποτελέσματα δοκιμών κάμψης επί δοκών ενισχυμένων με υαλοπλέγματα σε τσιμεντοκονίαμα. Επίσης, στις εργασίες των Triantafyllou & Papanicolaou (2005), Triantafyllou et al. (2006), Triantafyllou & Papanicolaou (2006) και Τριανταφύλλου και Συνεργάτες (2006) μελετάται η εφαρμογή TRM για την κατασκευή μανδύων με στόχο την περισφιγξη σκυροδέματος και την ενίσχυση έναντι τέμνουσας και κάμψης. Η εφαρμογή ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα για την ενίσχυση φέρουσας τοιχοποιίας μελετάται για πρώτη φορά στις πειραματικές εργασίες των Papanicolaou et al. (2006α,β). Στην παρούσα εργασία γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων από δοκιμές όπου έγινε χρήση μανδύων TRM, αλλά και σύγκριση αυτών με ισοδύναμους μανδύες ΙΟΠ, με στόχο την ενίσχυση φέρουσας τοιχοποιίας σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση (α) εκτός επιπέδου και (β) εντός επιπέδου. Εκ των αποτελεσμάτων συνάγεται ότι η προτεινόμενη τεχνική είναι εξαιρετικής αποτελεσματικότητας, η οποία είναι συγκρίσιμη και γενικά υψηλότερη αυτής των ΙΟΠ, προσφέροντας παράλληλα όλα τα πλεονεκτήματα των τελευταίων (εξαιρετικά λεπτοί μανδύες, υψηλή αντοχή, μεγάλη παραμορφωσιμότητα, υψηλή ανθεκτικότητα, ευκολία εφαρμογής).

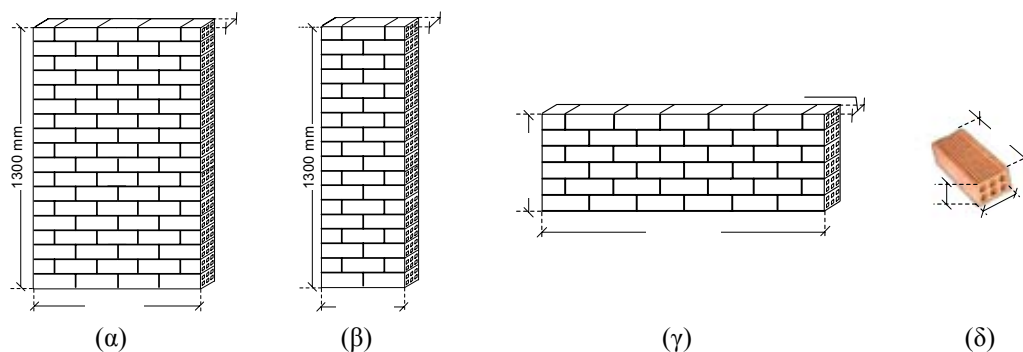
## 2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Το πειραματικό πρόγραμμα περιελάμβανε δοκιμές επί 41 δρομικών τοιχίσκων οπτοπλινθοδομής, μικρής και μεσαίας κλίμακας, η πλειονότητα των οποίων ενισχύθηκε με αμφίπλευρους (και συμμετρικούς ως προς τον αριθμό των στρώσεων) μανδύες TRM. Μικρός αριθμός δοκιμών ενισχύθηκε με ράβδους συνεχών ιών άνθρακα σε μία διεύθυνση τοποθετημένες σε εγκοπές κατά μήκος συγκεκριμένων αρμών και στερεωμένες με εποξειδική ρητίνη (Near Surface Mounted Reinforcement – NSM). Τα δοκίμια ελέγχθησαν υπό συνθήκες ανακυκλιζόμενης φόρτισης σε: (α) εντός επιπέδου κάμψη με την παράλληλη επιβολή αξονικού φορτίου, (β) εκτός επιπέδου κάμψη και (γ) εντός επιπέδου διάτμηση με ή δίχως την παράλληλη επιβολή αξονικού φορτίου. Κύρια παράμετρος προς διερεύνηση ήταν ο αριθμός των στρώσεων, ενώ παράλληλα έγινε σύγκριση των ενισχυμένων με TRM δοκιμών με αντίστοιχα δοκίμια ενισχυμένα με μανδύες από ΙΟΠ, οι οποίοι διέφεραν ως προς τους μανδύες TRM μόνο ως προς το συνδετικό υλικό των ιών (εποξειδική ρητίνη έναντι κονιάματος με βάση το τσιμέντο).

### 2.1 Υλικά και δοκίμια

Κατασκευάστηκαν τρεις τύποι δοκιμών: δοκίμια τύπου Α (διατμητικά τοιχώματα) με ύψος 1.3 m και πλάτος 0.8 m, τύπου Β (στοιχεία τύπου πεσσού) με ύψος 1.3 m και πλάτος 0.4 m και τύπου Γ (στοιχεία τύπου υπερθύρου) με ύψος 0.4 m και πλάτος 1.3 m. Η γεωμετρία των δοκιμών δίνεται στο Σχήμα 1α-γ. Τα δοκίμια τύπου Α δοκιμάστηκαν υπό την προαναφερθείσα συνθήκη φόρτισης (γ), τα δοκίμια τύπου Β δοκιμάστηκαν υπό τις συνθήκες φόρτισης (α) και (β) και τα δοκίμια τύπου Γ δοκιμάστηκαν υπό τις συνθήκες φόρτισης (β) και (γ) (δίχως την επιβολή αξονικού φορτίου).

Για την κατασκευή των δοκιμών (η οποία έγινε σε κλειστό χώρο από εξειδικευμένο τεχνίτη) χρησιμοποιήθηκαν εξάοποι οπτόπλινθοι (από κεραμοποιία της περιοχής Πατρών), διαστάσεων 185×85×60 mm (Σχ. 1δ). Η πρώτη σειρά οπτοπλίνθων, για όλα τα δοκίμια, διεστρώθη επί μίας αρχικής στρώσης τσιμεντοκονιάματος πάχους 10 mm, ενώ το πάχος όλων των αρμών (οριζοντίων και κατακορύφων) ήταν επίσης ίσο με 10 mm. Για την κατασκευή των δοκιμών έγινε χρήση τσιμεντοκονιάματος γενικής εφαρμογής με αναλογίες τσιμέντο:άσβεστος:άμμος: ίσες με 1:2:10 (κ.ο.) και λόγο νερού προς τσιμέντο ίσο με 0.8 (κ.β.). Για την αποφυγή πρόωρων αστοχιών των δοκιμών αναφοράς και των δοκιμών με οπλισμούς σε εγκοπές (π.χ. κατά τη φάση μεταφοράς και τοποθέτησής τους στο πλαίσιο φόρτισης), η επιφάνεια των τοιχίσκων επικαλύφθηκε με ασβεστοτσιμεντοκονίαμα χαμηλής αντοχής (περίπου ίσης με 4 N/mm<sup>2</sup> σε 28 ημέρες).



Σχήμα 1. Τύποι δοκιμών: (α) Τύπου Α, (β) τύπου Β και (γ) τύπου Γ. (δ) Διαστάσεις των 6-οπων οπτοπλίνθων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμών.

Οι μέσες τιμές θλιπτικής αντοχής των οπτοπλίνθων σε διευθύνσεις παράλληλα και κάθετα προς τις οπές, όπως προέκυψαν από αντίστοιχες δοκιμές θλίψης σε τρία δοκίμια ανά διεύθυνση φόρτισης, βρέθηκαν ίσες με 8.9 N/mm<sup>2</sup> και 3.7 N/mm<sup>2</sup>, αντίστοιχα. Η εφελκυστική αντοχή από κάμψη του τσιμεντοκονιάματος στις 28 ημέρες προσδιορίστηκε από δοκιμές κάμψης τριών σημείων επί πρισματικών δοκιμών με διαστάσεις 40×40×160 mm και η θλιπτική του αντοχή (στην

ίδια ηλικία) εκτιμήθηκε από δοκιμές θλίψης επί των τεμαχίων τα οποία προέκυψαν από τις προαναφερθείσες δοκιμές κάμψης (σχετικό πρότυπο EN 1015-11). Βάσει των παραπάνω, οι μέσες τιμές της εφελκυστικής αντοχής από κάμψη και της θλιπτικής αντοχής του τσιμεντοκονιάματος στις 28 ημέρες βρέθηκαν ίσες με  $1.17 \text{ N/mm}^2$  και  $3.91 \text{ N/mm}^2$ , αντίστοιχα.

Η θλιπτική αντοχή της οπτοπλινθοδομής σε διευθύνσεις παράλληλα και κάθετα ως προς τους αρμούς προσδιορίστηκε από τρεις δοκιμές θλίψης ανά περίπτωση, σε πρισματικά δοκίμια με διαστάσεις  $390 \times 85 \times 420 \text{ mm}$  (μήκος  $\times$  πλάτος  $\times$  ύψος). Τα πρίσματα αυτά κατασκευάστηκαν και συντηρήθηκαν με τον ίδιο τρόπο με τους τοιχίσκους, ενώ οι δοκιμές όλων των δοκιμίων (πρισμάτων και τοιχίσκων) έλαβαν χώρα στην ίδια χρονική περίοδο. Οι δοκιμές θλίψης πραγματοποιήθηκαν σε μηχανή δυναμικότητας 4000 kN, υπό ελεγχόμενη μετατόπιση με ταχύτητα  $0.1 \text{ mm/s}$ . Τα φορτία καταγράφονταν μέσω δυναμοκυψέλης, ενώ οι μετατοπίσεις λαμβάνονταν από ηλεκτρικά μηχανοσυστήματα (LVDTs), τοποθετημένα κεντρικά στις όψεις των δοκιμίων. Οι προκύπτουσες μέσες τιμές της θλιπτικής αντοχής, του τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας και της παραμόρφωσης θραύσης ήταν ίσες με  $4.3 \text{ N/mm}^2$ ,  $1.94 \text{ kN/mm}^2$  και  $0.22\%$  για την περίπτωση θλίψης παράλληλα προς τους αρμούς, και  $2.0 \text{ N/mm}^2$ ,  $1.70 \text{ kN/mm}^2$  και  $0.19\%$ , για την περίπτωση θλίψης κάθετα προς τους αρμούς.

Το πλέγμα ινών άνθρακα που χρησιμοποιήθηκε αποτελείτο από δέσμες ινών, πλάτους  $4 \text{ mm}$ , ισόποσα διατεταγμένων σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις ( $0^\circ/90^\circ$ ), με καθαρό άνοιγμα βροχίδων ίσο με  $6 \text{ mm}$ . Κάθε στρώση πλέγματος ινών είχε βάρος ίσο με  $168 \text{ g/m}^2$  και ονομαστικό πάχος ίσο με  $0.047 \text{ mm}$  (υπολογισμένο βάσει ισοδύναμης κατανομής των ινών σε ομοιόμορφη διάταξη ανά διεύθυνση – smeared distribution, δηλαδή χωρίς τα κενά των βροχίδων), δηλαδή λιγότερο από το μισό ενός κοινού υφάσματος ινών άνθρακα σε μία διεύθυνση. Η εγγυημένη εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας των ινών ήταν  $3350 \text{ N/mm}^2$  και  $225 \text{ kN/mm}^2$ , αντίστοιχα. Η ανόργανη μήτρα που χρησιμοποιήθηκε ήταν από λεπτόκκοκο ρητινούχο τσιμεντοκονίαμα με λόγο τσιμέντου προς πολυμερή περίπου ίσο με 10:1 κ.β. Η αναλογία ανάμιξης νερού προς κονία ήταν 1:3.3 κ.β., ενώ το νωπό ανάμειγμα χαρακτηριζόταν από ικανή εργασιμότητα για εφαρμογή σε κατακόρυφες επιφάνειες (πλαστικό κονίαμα) και από μικρή απώλεια κάθισης στο χρόνο (μισή ώρα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος  $20^\circ\text{C}$ ). Οι μέσες τιμές της θλιπτικής και της εφελκυστικής αντοχής από κάμψη του τσιμεντοκονιάματος στις 28 ημέρες ήταν  $31.36 \text{ N/mm}^2$  και  $5.77 \text{ N/mm}^2$ , αντίστοιχα. Η οργανική μήτρα που χρησιμοποιήθηκε για την επικόλληση των πλεγμάτων ήταν τύπου εποξειδικής ρητίνης δύο συστατικών με αναλογία ανάμιξης ρητίνης:σκληρυντή ίσης προς 4:1. Σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο του προϊόντος, η εφελκυστική αντοχή της εποξειδικής ρητίνης ήταν ίση με  $30 \text{ N/mm}^2$  και το μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $3.8 \text{ kN/mm}^2$  (οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε ηλικία 7 ημερών μετά από συντήρηση του υλικού στους  $23^\circ\text{C}$ ).

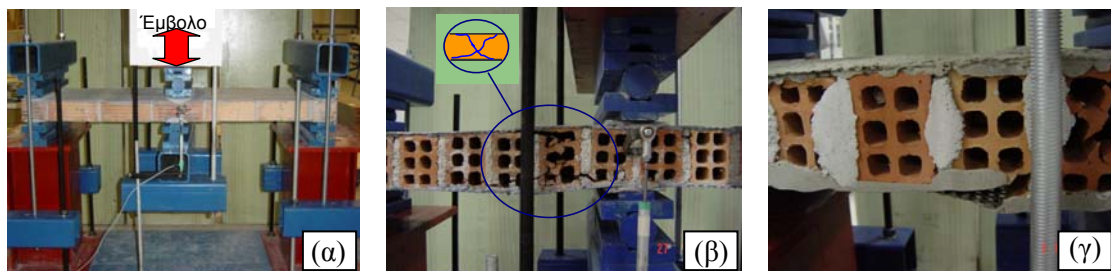
Για τα λιγοστά δοκίμια τα οποία ενισχύθηκαν με ινοπλισμένα πολυμερή σε εγκοπές (τεχνική NSM), χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι από ίνες άνθρακα εμποτισμένες σε εποξειδική ρητίνη, με διαστάσεις διατομής  $2 \times 16 \text{ mm}$  (πάχος  $\times$  πλάτος). Οι εγκοπές είχαν δημιουργηθεί κατά τη φάση κατασκευής των δοκιμίων κατά μήκος συγκεκριμένων αρμών. Το μέτρο ελαστικότητας και το ογκομετρικό ποσοστό των ινών στις ράβδους ήταν  $225 \text{ kN/mm}^2$  και  $40\%$ , αντίστοιχα. Οι εγγυημένες τιμές της εφελκυστικής αντοχής, του μέτρου ελαστικότητας και της παραμόρφωσης θραύσης των ράβδων ήταν ίσες με  $2070 \text{ N/mm}^2$ ,  $125 \text{ kN/mm}^2$  και  $0.17\%$ , αντίστοιχα. Για να ληφθούν υπόψη φαινόμενα κλίμακας, κάθε ράβδος κόπηκε κατά μήκος σε δύο ίσα τμήματα και έτσι το τελικό πλάτος των ράβδων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ίσο με  $7.5 \text{ mm}$ . Η στερέωση των ράβδων έγινε με τη χρήση εποξειδικής συνδετικής κονίας τριών συστατικών (εμπλουτισμένης και με τσιμεντοειδή υλικά λεπτής διαβάθμισης), με θλιπτική αντοχή και εφελκυστική αντοχή από κάμψη ίσες με  $40 \text{ N/mm}^2$  και  $9 \text{ kN/mm}^2$ , αντίστοιχα.

Η εφαρμογή των στρώσεων TRM και ΙΟΠ έγινε κατά τον συνήθη τρόπο επικόλλησης υφασμάτων ή ελασμάτων ΙΟΠ σε δομικά στοιχεία. Πρώτα, οι επιφάνειες των δοκιμίων προετοιμάστηκαν ελαφρά με ηλεκτρικό τριβείο και καθαρίστηκαν με τη χρήση μεταλλικής βούρτσας και πεπιεσμένου αέρα. Ακολούθως κατασκευάστηκαν οι μανδύες με επάλληλες στρώσεις συνδετικού υλικού (κονίαμα ή ρητίνη, κατά περίπτωση) και πλέγματος, το οποίο κάλυπτε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου. Το συνδετικό υλικό εφαρμόστηκε με σπάτουλα και

κυλίνδρωση. Όταν το συνδετικό μέσο ήταν κονίαμα, το πλέγμα πιεζόταν εντός του κονιάματος, έτσι ώστε το κονίαμα να διαπεράσει τις βροχίδες, εξασφαλίζοντας την αλληλεμπλοκή πλέγματος/μήτρας. Κάθε στρώση πλέγματος-κονιάματος είχε συνολικό πάχος περίπου ίσο με 2 mm. Η διαδικασία επαναλαμβανόταν έως ότου συμπληρωθεί ο απαιτούμενος αριθμός στρώσεων (κάθε επακόλουθη στρώση εφαρμοζόταν επί νωπής ακόμα προηγούμενης στρώσης) και η τελική στρώση πλέγματος καλυπτόταν από μία τελική στρώση συνδετικού υλικού.

### 3 ΕΚΤΟΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗ

Κύριες παράμετροι προς διερεύνηση σε αυτό το τμήμα του πειραματικού προγράμματος ήταν ο αριθμός των στρώσεων για τους αμφίπλευρους μανδύες (μία ή δύο) και το συνδετικό μέσο (κονίαμα ή ρητίνη). Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια τύπου Β και Γ, έτσι ώστε να εξασφαλισθεί αστοχία λόγω ορθών τάσεων κάθετα και παράλληλα προς τους αρμούς, αντίστοιχα. Η σήμανση των δοκιμών ήταν  $O_{F^{\perp}}YN$  (δοκίμια τύπου Β) και  $O_{F^{\parallel}}YN$  (δοκίμια τύπου Γ), όπου  $O$  δηλώνει φόρτιση εκτός επιπέδου (out-of-plane),  $Y$  η ένδειξη του συνδετικού υλικού ( $R$  για ρητίνη και  $M$  για κονίαμα),  $N$  ο αριθμός των στρώσεων (1 ή 2) και τα σύμβολα  $\perp$  και  $\parallel$  για κάμψη που προκαλεί ορθές τάσεις κάθετα και παράλληλα στους αρμούς, αντίστοιχα. Για την τελευταία περίπτωση (δοκίμια τύπου Γ), χρησιμοποιήθηκαν δύο επιπλέον δοκίμια, τα οποία ενισχύθηκαν με ράβδους σε εγκοπές (εντός των αρμών). Το ένα από τα δοκίμια αυτά ενισχύθηκε με δύο ράβδους ανά πλευρά, ενώ το άλλο με τρεις. Τα δοκίμια αναφοράς και αυτά με ράβδους σε εγκοπές διαφοροποιούνται ως προς τα υπόλοιπα με αντικατάσταση των συμβόλων  $YN$  με τα σύμβολα  $C$  και  $NSM$ , αντίστοιχα.

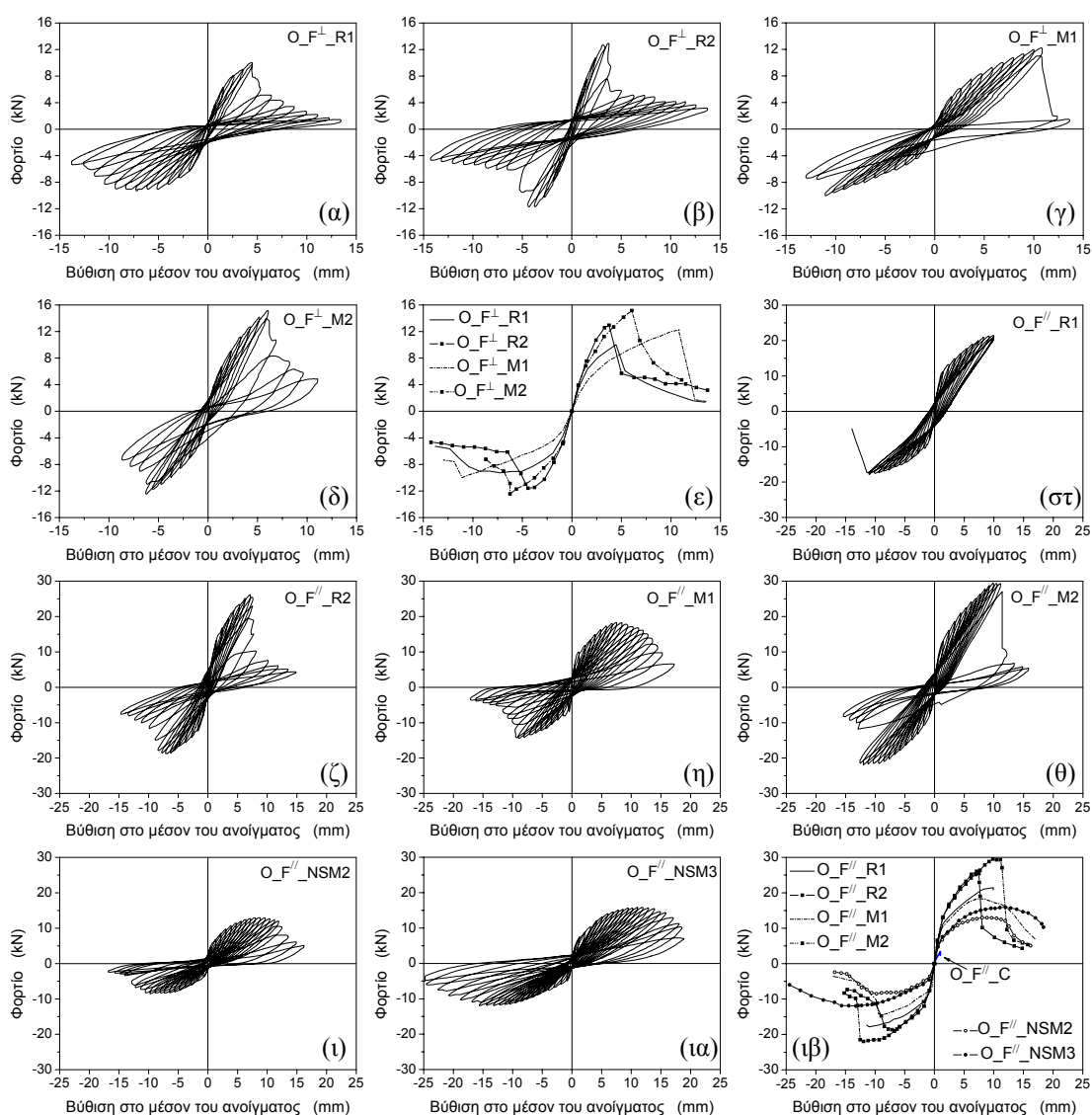


Σχήμα 2. (α) Πειραματική διάταξη ανακυκλιζόμενης φόρτισης εκτός επιπέδου. (β) Διαγώνια ρηγμάτωση των τοιχίσκων. (γ) Αποκόλληση του μανδύα TRM από το υπόστρωμα, σε μεγάλες μετατοπίσεις.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα δοκιμών σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση εκτός επιπέδου φόρτιση.

Σήμανση δοκιμών	Μέγιστο φορτίο (kN)		Βύθιση στο μέσον του ανοίγματος (mm) <sup>1</sup>		Αθροιστική απορροφώμενη ενέργεια (kNmm)		Μορφή αστοχίας (Διεύθυνση αστοχίας)
	Ωθηση	Έλξη	Ωθηση	Έλξη	4 <sup>ος</sup> κύκλος	10 <sup>ος</sup> κύκλος	
$O_{F^{\perp}}C$	~0.66	-	-	-	-	-	Αστοχία κατά τη μεταφορά
$O_{F^{\perp}}R1$	10.02	9.28	4.45	11.14	32.32	223.68	Καμπτοδιατμητική (Ωθηση)
$O_{F^{\perp}}R2$	12.94	11.72	3.75	4.35	32.09	248.77	Καμπτοδιατμητική (Ωθηση)
$O_{F^{\perp}}M1$	12.22	10.02	10.73	11.03	32.69	194.10	Καμπτοδιατμητική (Ωθηση)
$O_{F^{\perp}}M2$	15.15	12.45	6.05	6.25	38.60	290.51	Καμπτοδιατμητική (Ωθηση)
$O_{F^{\parallel}}C$	3.36	-	0.99	-	-	-	Καμπτική
$O_{F^{\parallel}}R1$	21.45	17.82	9.90	11.02	61.84	383.97	Ψαθυρή θραύση ΙΟΠ (Έλξη)
$O_{F^{\parallel}}R2$	26.15	18.81	7.11	7.11	67.29	429.24	Καμπτοδιατμητική (Ωθηση)
$O_{F^{\parallel}}M1$	18.31	14.42	12.92	9.45	64.18	368.75	Σταδιακή θραύση TRM (Έλξη)
$O_{F^{\parallel}}M2$	29.52	21.97	9.92	12.59	77.19	437.63	Καμπτοδιατμητική (Ωθηση)
$O_{F^{\parallel}}NSM2$	12.95	8.54	12.62	12.14	54.93	254.64	Καμπτική & αποκόλληση
$O_{F^{\parallel}}NSM3$	15.87	11.96	17.16	19.89	41.70	210.88	Καμπτοδιατμητική & αποκόλληση

Όλα τα ενισχυμένα δοκίμια υπεβλήθησαν σε ανακυκλιζόμενη εκτός επιπέδου κάμψη τριών σημείων με άνοιγμα 1.20 m και 1.15 m για τα δοκίμια τύπου Β και Γ, αντίστοιχα, και με ελεγχόμενη παράμετρο τη μετατόπιση. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν οριζόντια εντός ενός ισχυρού πλαισίου φόρτισης και το φορτίο εφαρμόστηκε μέσω ενός κατακόρυφου υδραυλικού εμβόλου δυναμικότητας 500 kN. Η πειραματική διάταξη, η οποία ήταν πανομοιότυπη για όλα τα δοκίμια (τύπου Β και Γ) δίνεται στο Σχήμα 2 μαζί με τυπικές μορφές αστοχίας. Η βύθιση στο μέσον του ανοίγματος καταγραφόταν μέσω ενός εξωτερικού αισθητήρα μετατόπισης τοποθετημένου στη μία πλευρά των δοκιμών. Η ιστορία φόρτισης περιελάμβανε διαδοχικούς κύκλους επιβαλλόμενης μετατόπισης (ώθηση/έλξη του εμβόλου) αυξανόμενου εύρους (κατά 1 mm) με ταχύτητα 0.1 mm/s. Τα δοκίμια αναφοράς δοκιμάστηκαν υπό μονοτονική φόρτιση ελεγχόμενης μετατόπισης με ρυθμό επίσης ίσο με 0.1 mm/s. Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε εκτός επιπέδου φόρτιση και οι αντίστοιχες μορφές αστοχίας δίνονται στον Πίνακα 1. Οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης (βύθιση στο μέσον του ανοίγματος) και οι αντίστοιχες περιβάλλουσες καμπύλες για όλα τα δοκίμια δίνονται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και αντίστοιχες περιβάλλουσες για δοκίμια σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση εκτός επιπέδου: (α)-(ε) Δοκίμια τύπου Β και (στ)-(ιβ) Δοκίμια τύπου Γ.

Για την περίπτωση των δοκιμών τύπου B, η μέθοδος ενίσχυσης με μανδύες TRM απεδείχθη εξαιρετικά αποτελεσματική και περισσότερο αποδοτική σε σχέση με την μέθοδο ΙΟΠ σε όρους αντοχής και παραμορφωσιμότητας των τοιχίσκων. Οι λόγοι των φορτίων και των μετατοπίσεων κατά την αστοχία των τοιχίσκων με μανδύες TRM προς τις αντίστοιχες τιμές των τοιχίσκων με μανδύες FRP ήταν της τάξης του 1.2 για το φορτίο και 2.0 για την παραμόρφωση αστοχίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι για όλες τις δοκιμές ως αστοχία ορίστηκε είτε το σημείο όπου παρατηρήθηκε απότομη πτώση του φορτίου, είτε το σημείο όπου το φορτίο μειώθηκε στο 80% της μέγιστης τιμής του, εάν η πτώση του φορτίου ήταν σταδιακή. Για την περίπτωση κάμψης των δοκιμών τύπου Γ, όταν η αστοχία επήλθε λόγω θραύσης των ινών του πλέγματος (σε δοκίμια με μία στρώση πλέγματος), η μέθοδος ενίσχυσης με μανδύες TRM απεδείχθη κατά 20% και 15% λιγότερο αποδοτική σε όρους αύξησης της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας, αντίστοιχα, σε σύγκριση με την μέθοδο TRM. Όταν όμως η αστοχία ήταν καμπτικού ή καμπτοδιαμητικού τύπου, οι μανδύες TRM ήταν κατά 13% και 40% περισσότερο αποδοτικοί σε όρους αντοχής και παραμορφωσιμότητας, αντίστοιχα, σε σχέση με τους μανδύες TRM.

Από σύγκριση των αθροιστικά απορροφούμενων ενεργειών που αναγράφονται στον Πίνακα 1, εξάγεται το συμπέρασμα ότι, γενικά, η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και των δύο συστημάτων ενίσχυσης (TRM και ΙΟΠ) είναι συγκρίσιμη. Σύγκριση των δυσκαμψιών των δοκιμών με τα δύο είδη μανδύων καταδεικνύει την ελαφρώς πιο πλάσιμη συμπεριφορά των δοκιμών με μανδύες TRM για τα αρχικά στάδια της φόρτισης και την αντιστροφή της εικόνας αυτής για μεγάλες μετατοπίσεις (στις οποίες τα δοκίμια με μανδύες ΙΟΠ είχαν ήδη αστοχήσει). Η μέθοδος ενίσχυσης με τη χρήση ράβδων ΙΟΠ σε εγκοπές σε σύγκριση με τη μέθοδο των μανδύων (με συγκρίσιμα ποσοστά ινών και ανεξαρτήτως συνδετικού μέσου) απεδείχθη περισσότερο αποδοτική σε όρους αύξησης της παραμορφωσιμότητας και λιγότερο αποδοτική ως προς την αύξηση της φέρουσας ικανότητας, της απορρόφησης ενέργειας και της δυσκαμψίας.

Περισσότερες λεπτομέρειες για αυτό το τμήμα του πειραματικού προγράμματος δίνονται στην εργασία των Papanicolaou et al. (2006α).

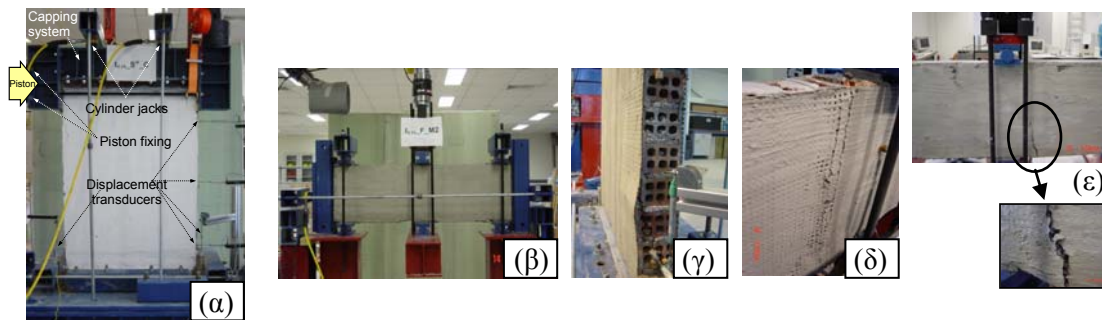
#### 4 ΕΝΤΟΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗ

Σε αυτή τη φάση του πειραματικού προγράμματος χρησιμοποιήθηκαν και οι τρεις τύποι δοκιμών (A, B, Γ). Οι παράμετροι υπό διερεύνηση ήταν οι ίδιες με την περίπτωση της εκτός επιπέδου φόρτισης, ενώ (κατά περίπτωση) περιελάμβαναν επιπλέον και την τιμή του εφαρμοζόμενου θλιπτικού αξονικού φορτίου (ως ποσοστού της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας). Για την ομάδα δοκιμών τύπου A μόνο διερευνήθηκε η αποτελεσματικότητα της μεθόδου ενίσχυσης με ράβδους σε εγκοπές (NSM) και συγκρίθηκε με εκείνη της μεθόδου μανδύων από ινοπλέγματα. Τα δοκίμια τύπου A (διαμητικά τοιχώματα) δοκιμάστηκαν ως κατακόρυφοι πρόβολοι φορτιζόμενοι με σταθερό αξονικό θλιπτικό φορτίο στην ανώτερη σειρά οπτοπλίνθων και με ένα συγκεντρωμένο πλευρικό φορτίο στην κορυφή, σε απόσταση 1.10 m από τη βάση τους. Τα δοκίμια τύπου B και Γ δοκιμάστηκαν ως οριζόντια στοιχεία σε κάμψη τριών σημείων και με άνοιγμα 1.17 m και 1.12 m, αντίστοιχα. Η πειραματική διάταξη για τα δοκίμια τύπου B στόχευε στην αναπαραγωγή των συνθηκών καμπτοδιαμητικής φόρτισης πεσσών (κατά τη διάρκεια σεισμού), οι οποίοι βρίσκονται στις κατώτερες στάθμες κατασκευών φέρουσας τοιχοποιίας, όπου τα αξονικά θλιπτικά φορτία είναι υπολογίσιμα. Για τον λόγο αυτό, καθ'όλη τη διάρκεια της ανακυκλιζόμενης εντός επιπέδου φόρτισης των δοκιμών τύπου B εφαρμόστηκε στα άκρα τους σταθερό αξονικό θλιπτικό φορτίο. Η πειραματική διάταξη για τα δοκίμια τύπου Γ στόχευε στην αναπαραγωγή των συνθηκών καμπτοδιαμητικής φόρτισης υπερθύρων κατά τη διάρκεια σεισμού.

Η σήμανση των δοκιμών ήταν η ακόλουθη:  $I_S^W\_YN$  (δοκίμια τύπου A),  $I_x\_F\_YN$  (δοκίμια τύπου B) και  $I_S^b\_YN$  (δοκίμια τύπου Γ), όπου το I δηλώνει εντός επιπέδου (in-plane) καταπόνηση, x η τιμή του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου εκπεφραζόμενου ως ποσοστού της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας (2.5% ή 10% για τα δοκίμια τύπου A και 10% ή 25% για τα δοκίμια τύπου Γ), Y η ένδειξη του συνδετικού υλικού (R για ρητίνη και M για κονίαμα) και N ο

αριθμός των στρώσεων (1 ή 2). Τα δοκίμια αναφοράς και τα δοκίμια με ράβδους σε εγκοπές διαφοροποιούνται με αντικατάσταση των συμβόλων ΥΝ με τα σύμβολα C και NSM, αντίστοιχα.

Όλα τα δοκίμια υπεβλήθησαν σε ανακυκλιζόμενη εντός επιπέδου φόρτιση με ελεγχόμενη παράμετρο τη μετατόπιση, εκτός από τα δοκίμια αναφοράς των δοκιμών τύπου Β και Γ, τα οποία δοκιμάστηκαν υπό μονοτονική φόρτιση. Η πειραματική διάταξη για τη φόρτιση των διατμητικών τοιχωμάτων δίνεται στο Σχήμα 4α. Η εφαρμογή του αξονικού θλιπτικού φορτίου πραγματοποιήθηκε μέσω ειδικού συστήματος μεταλλικών στοιχείων (συνδυασμός δοκών και σπειρωμάτων). Το πλευρικό φορτίο εφαρμόστηκε μέσω οριζόντιου σερβουδραυλικού εμβόλου MTS δυναμικότητας 250 kN.

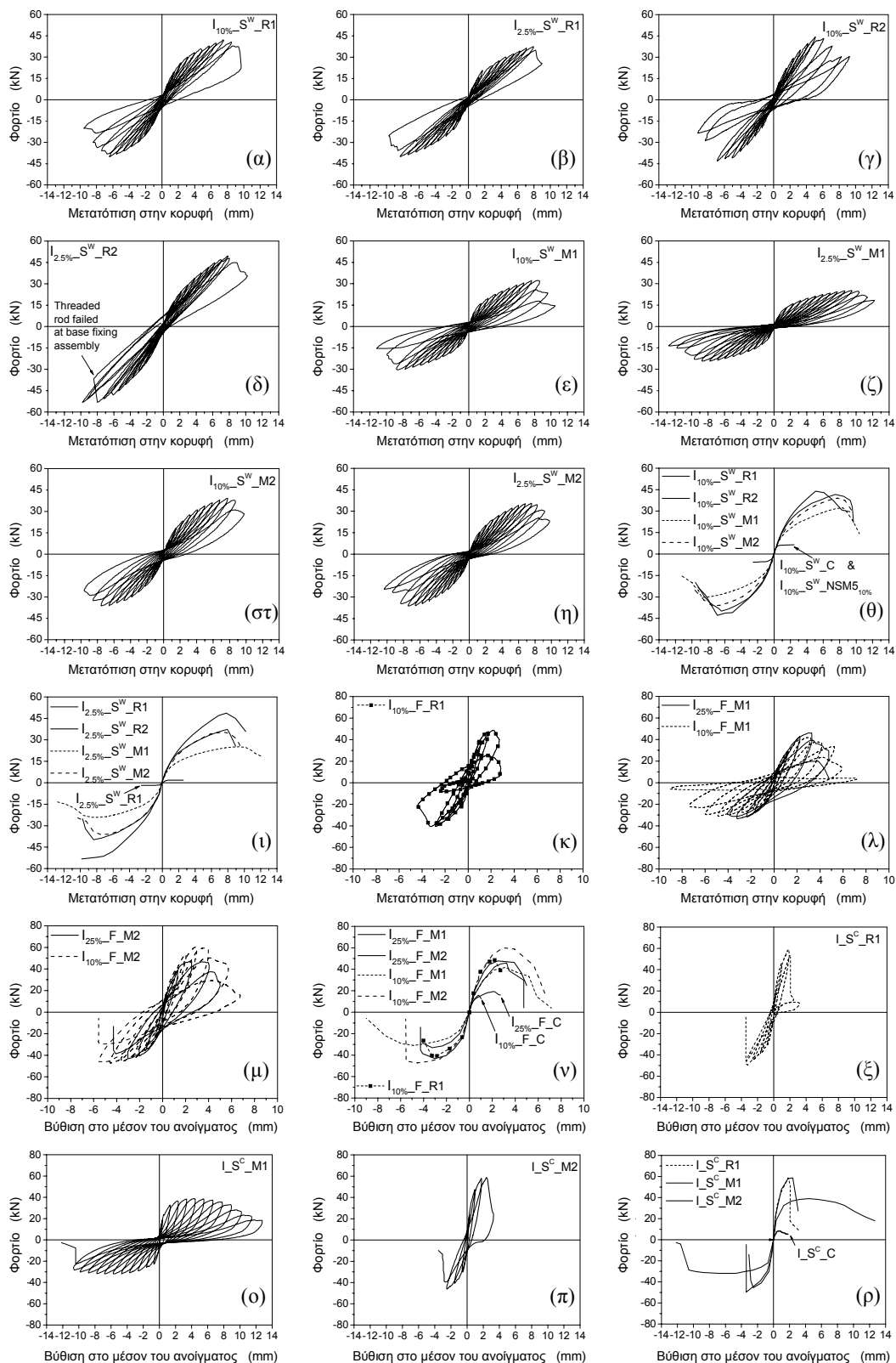


Σχήμα 4. (α) Πειραματική διάταξη δοκιμών τύπου Α και (β) πειραματική διάταξη δοκιμών τύπου Β και Γ. (γ) Λυγισμός του μανδύα TRM στη βάση του διατμητικού τοιχώματος. (δ) Καμπτική ρηγμάτωση του μανδύα TRM σε δοκίμιο τύπου Β λίγο πριν τον λυγισμό. (ε) Εκτεταμένη αποκόλληση του πλέγματος από την τοιχοποιία σε δοκίμιο τύπου Γ.

Η εφαρμογή θλιπτικού φορτίου ίσου με το 10% της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δύο υδραυλικών γρύλων δυναμικότητας 120 kN. Το σύστημα ελέγχου των υδραυλικών γρύλων επέτρεπε την αυτόματη ρύθμιση της εφαρμοζόμενης πίεσης κατά τη διάρκεια των δοκιμών και τη διατήρησή της στο προκαθορισμένο επίπεδο. Η εφαρμογή θλιπτικού φορτίου ίσου με το 2.5% της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας πραγματοποιήθηκε με προσθήκη βαρών στην κορυφή των διατμητικών τοιχωμάτων. Για τον έλεγχο της ανασήκωσης του πόδα των τοιχίσκων από την επιφάνεια έδρασής τους (λόγω λικνισμού) και για την καταγραφή των οριζοντίων μετατοπίσεων σε προκαθορισμένα σημεία του ύψους των δοκιμών (σε αποστάσεις 0.20 m, 0.55 m και 0.85 m από τη βάση των στοιχείων) χρησιμοποιήθηκε μία διάταξη πέντε ηλεκτρικών μηχανοσυστημάτων. Η πειραματική διάταξη για τα δοκίμια τύπου Β δίνεται στο Σχήμα 4β. Η εφαρμογή του αξονικού φορτίου πραγματοποιήθηκε μέσω της χρήσης ενός υδραυλικού γρύλου (δυναμικότητας 120 kN) και ενός συστήματος περισφιγξης (για το δοκίμιο και τον γρύλο) μέσω ζεύγους μεταλλικών σπειρωμάτων. Όπως και στην περίπτωση της εκτός επιπέδου φόρτισης, το φορτίο στα δοκίμια τύπου Β και Γ εφαρμόστηκε από ένα έμβολο δυναμικότητας 500 kN κατακόρυφα τοποθετημένο στο πλαίσιο φόρτισης, ενώ οι μετατοπίσεις καταγράφονταν από ένα ηλεκτρικό μηχανοσυστήμα στερεωμένο στο μέσον του ανοίγματος των δοκιμών. Η πειραματική διάταξη για τα δοκίμια Β και Γ ήταν όμοια, με τη διαφορά ότι για τα δοκίμια τύπου Γ απουσίαζε το αξονικό φορτίο. Η ιστορία φόρτισης ήταν ίδια με την περίπτωση της εκτός επιπέδου καταπόνησης, με το ρυθμό επιβολής μετακίνησης να είναι ίσος με 0.1 mm/s για τα δοκίμια τύπου Α και 0.01 mm/s για τα δοκίμια τύπου Β και Γ. Ο ρυθμός επιβολής μετακίνησης για τη μονοτονική φόρτιση (δοκίμια αναφοράς τύπου Β και Γ) ήταν ίσος με 0.003 mm/s.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε εντός επιπέδου φόρτιση και οι αντίστοιχες μορφές αστοχίας δίνονται στον Πίνακα 2. Οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης και οι αντίστοιχες περιβάλλουσες καμπύλες για όλα τα δοκίμια δίνονται στο Σχήμα 5.





Σχήμα 5. Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και περιβάλλουσες για δοκίμια σε εντός επιπέδου φόρτιση: (α)-(ι) Δοκίμια τύπου A, (ια)-(ιδ) δοκίμια τύπου B και (ιε)-(ιη) δοκίμια τύπου Γ.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα δοκιμών σε εντός επιπέδου φόρτιση.

Σήμανση δοκιμών	Μέγιστο φορτίο (kN)		Μετατόπιση στην αστοχία <sup>a</sup> (mm)		$\frac{P_{max}}{P_{max,C}}$	$\frac{\delta_u}{\delta_{u,C}}$	Αθροιστική απορροφώμενη ενέργεια (kNmm)		Μορφή αστοχίας (Διεύθυνση αστοχίας)
	Ωθηση	Έλξη	Ωθηση	Έλξη					
<i>Τύπος Α</i>							5 <sup>ος</sup> κύκλος	10 <sup>ος</sup> κύκλος	
I <sub>10%</sub> _S <sup>W</sup> _C	6.35	5.74	0.69	0.65	1.00	1.00	--	--	Λικνισμός (Ωθηση)
I <sub>10%</sub> _S <sup>W</sup> _R1	42.11	40.16	9.28	8.12	7.00	12.49	97.65	537.51	Θραύση ΙΟΠ (Έλξη)
I <sub>10%</sub> _S <sup>W</sup> _R2	44.31	43.21	7.52	7.77	6.98	10.90	86.12	669.79	Σύνθλιψη πόδα (Ωθηση)
I <sub>10%</sub> _S <sup>W</sup> _M1	32.23	30.52	9.29	9.39	5.08	13.46	94.81	474.36	Σύνθλιψη πόδα (Ωθηση)
I <sub>10%</sub> _S <sup>W</sup> _M2	39.18	36.25	9.36	9.00	6.17	13.57	103.64	583.00	Σύνθλιψη πόδα (Ωθηση)
I <sub>10%</sub> _S <sup>W</sup> _NSM5	6.47	6.35	0.85	0.66	1.02	1.23	--	--	Λικνισμός (Ωθηση)
I <sub>2.5%</sub> _S <sup>W</sup> _C	1.95	1.83	0.70	0.75	1.00	1.00	--	--	Λικνισμός (Ωθηση)
I <sub>2.5%</sub> _S <sup>W</sup> _R1	37.48	39.92	7.93	8.38	19.22	11.33	67.58	350.91	Θραύση ΙΟΠ (Ωθηση)
I <sub>2.5%</sub> _S <sup>W</sup> _R2	49.56	53.34	8.00	-- <sup>b</sup>	25.42	11.43	91.71	435.22	Σύνθλιψη πόδα (Ωθηση)
I <sub>2.5%</sub> _S <sup>W</sup> _M1	25.27	24.29	11.44	10.37	13.27	13.83	83.44	365.39	Σύνθλιψη πόδα (Έλξη)
I <sub>2.5%</sub> _S <sup>W</sup> _M2	35.52	36.25	9.24	9.03	18.22	13.20	79.66	416.26	Σύνθλιψη πόδα (Ωθηση)
<i>Τύπος Β</i>							2 <sup>ος</sup> κύκλος	3 <sup>ος</sup> κύκλος	
I <sub>25%</sub> _F_C	19.20	--	2.05	--	1.00	1.00	--	--	Καμπτική
I <sub>25%</sub> _F_M1	46.14	33.45	3.26	4.04 <sup>c</sup>	2.40	1.59	31.98	92.45	Σύνθλιψη <sup>d</sup> (Ωθηση)
I <sub>25%</sub> _F_M2	47.61	43.21	4.43	4.27	2.48	2.16	41.07	137.18	Σύνθλιψη <sup>d</sup> (Ωθηση)
I <sub>10%</sub> _F_C	15.91	--	0.80	--	1.00	1.00	--	--	Καμπτική
I <sub>10%</sub> _F_R1	48.57	40.65	2.21	3.24	3.05	2.76	37.92	104.66	Σύνθλιψη <sup>d</sup> (Ωθηση)
I <sub>10%</sub> _F_M1	41.74	31.10	5.18	6.79	2.62	6.48	34.46	88.67	Σύνθλιψη <sup>d</sup> (Ωθηση)
I <sub>10%</sub> _F_M2	60.13	47.29	5.12	5.56	3.78	6.40	37.48	103.40	Σύνθλιψη <sup>d</sup> (Ωθηση)
<i>Τύπος Γ</i>							2 <sup>ος</sup> κύκλος	3 <sup>ος</sup> κύκλος	
I_S <sup>C</sup> _C	8.24	--	0.82	--	1.00	1.00	--	--	Καμπτική
I_S <sup>C</sup> _R1	58.62	49.69	2.08	3.45	7.11	2.54	43.34	118.17	Σύνθλιψη <sup>d</sup> (Ωθηση)
I_S <sup>C</sup> _M1	38.82	31.98	9.41	10.72	4.71	11.48	50.77	118.72	Αποκόλληση TRM (Ωθηση)
I_S <sup>C</sup> _M2	58.84	46.14	2.41	2.82	7.14	2.94	54.23	139.21	Σύνθλιψη <sup>d</sup> (Ωθηση)

<sup>a</sup> Οι μετατοπίσεις μετρούνταν στην κορυφή των στοιχείων για τα δοκίμια τύπου Α και στο μέσον του ανοίγματος για τα υπόλοιπα δοκίμια. Για δοκίμια με αστοχία λόγω λικνισμού (I<sub>10%</sub>\_S<sup>W</sup>\_C, I<sub>2.5%</sub>\_S<sup>W</sup>\_C και I<sub>10%</sub>\_S<sup>W</sup>\_NSM5) το  $\delta_u$  αντιστοιχεί στο σημείο όπου το άκρο του πόδα του στοιχείου ανασηκώνεται από την επιφάνεια έδρασής του. <sup>b</sup> Αστοχία σπειρώματος (στη συναρμογή τοιχίσκου -πλασιού έδρασης) κατά την έλξη του εμβόλου. <sup>c</sup> Η αστοχία η οποία επήλθε κατά την ώθηση του εμβόλου δεν επέτρεψε τη συμπλήρωση του κύκλου φόρτισης – εδώ η τιμή του  $\delta_u^-$  αντιστοιχεί στο 88% του  $P_{max}^-$ . <sup>d</sup> Σύνθλιψη οπτοπλίνθων στο μέσον του ανοίγματος.

Όλα τα δοκίμια αναφοράς τύπου Α καθώς και το δοκίμιο με πέντε ράβδους FRP ανά πλευρά τοποθετημένες εντός κάθε τρίτου αρμού αστόχησαν λόγω λικνισμού, ο οποίος επήλθε μετά από εκτεταμένη ρηγματώση κοντά στη βάση των στοιχείων (κατά μήκος της βάσης). Αυτός ο τύπος αστοχίας οφείλεται στο σχετικά μικρού μεγέθους θλιπτικό φορτίο και στον λόγο διαστάσεων των στοιχείων (τοιχίσκοι μέτριας λυγηρότητας). Η απόκριση των διατμητικών τοιχωμάτων τα οποία είχαν ενισχυθεί με αμφίπλευρους μανδύες από πλέγματα ινών άνθρακα μίας στρώσης ήταν όμοια ως προς την εξέλιξη της βλάβης και τη μορφή αστοχίας, ανεξαρτήτως συνδετικού μέσου (κονίαμα ή ρητίνη). Μετά από έντονη (και συμμετρική) ρηγματώση στους πόδες των στοιχείων (στα άκρα των βάσεων τους) επήλθε στις θέσεις αυτές (στην εφελκυσόμενη πλευρά) θραύση μερικών κατακορύφων δεσμών ινών. Η θραύση αυτή οδήγησε στην πλήρη σύνθλιψη του θλιβόμενου πόδα, με αποτέλεσμα τον τοπικό λυγισμό του μανδύα (Σχήμα 4γ) και την απότομη πτώση του φορτίου. Στην περίπτωση στοιχείων με μανδύες TRM, η ρηγματώση της ανόργανης μήτρας στην περιοχή της βάσης είχε προηγηθεί της θραύσης του ινοπλέγματος, σηματοδοτώντας με τον τρόπο αυτό την επικείμενη αστοχία (σε αντίθεση με τους μανδύες ρητίνης). Αύξηση του αξονικού φορτίου σε τοιχώματα με μανδύες FRP είχε ως αποτέλεσμα μία πολύ μικρή αύξηση στην αντοχή των στοιχείων και μία ασήμαντη αύξηση στην παραμορφωσιμότητά τους. Για τοιχώματα με μανδύες TRM, η αντίστοιχη αύξηση στην αντοχή ήταν σημαντικά μεγαλύτερη, ενώ παρατηρήθηκε μείωση

της παραμορφωσιμότητας. Ανεξαρτήτως αριθμού στρώσεων, οι μανδύες TRM κρίνονται ως λιγότερο αποδοτικοί σε σύγκριση με τους αντίστοιχους μανδύες FRP ως προς την αύξηση της αντοχής, αλλά περισσότερο αποδοτικοί ως προς την αύξηση της παραμορφωσιμότητας. Επίσης, ανεξαρτήτως συνδετικού μέσου, οι μανδύες δύο στρώσεων (σε σύγκριση με αυτούς μίας στρώσης) προσφέρουν αύξηση της φέρουσας ικανότητας και μικρή μείωση της παραμορφωσιμότητας. Αυτό καταδεικνύεται και από το γεγονός ότι δεν παρατηρήθηκε θραύση του πλέγματος πριν από τη σύνθλιψη του πόδα και τον επακόλουθο λυγισμό του μανδύα σε κανένα από τα τοιχώματα με μανδύα δύο στρώσεων. Από σύγκριση των αθροιστικά απορροφούμενων ενεργειών που αναγράφονται στον Πίνακα 2 εξάγεται το συμπέρασμα ότι, γενικά, η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και των δύο συστημάτων ενίσχυσης (TRM και FRP) είναι συγκρίσιμη.

Τα δοκίμια αναφοράς των ομάδων Β και Γ αστόχησαν λόγω της διάνοιξης μίας μοναδικής καμπτικής ρωγμής στο μέσον του ανοίγματος. Η απόκριση όλων των ενισχυμένων δοκιμίων τύπου Β ήταν γενικά παραπλήσια. Κατά τα αρχικά στάδια της φόρτισης παρατηρήθηκε αποκόλληση στην διεπιφάνεια οπτοπλίνθων/κονιάματος στις θέσεις των αρμών στην περιοχή της επιβολής του φορτίου (μέσον του ανοίγματος), ενώ στη συνέχεια αναπτύχθηκε σταδιακή ρηγμάτωση της οπτοπλινθοδομής στην ίδια θέση (λόγω θλίψης). Αυτό οδήγησε στην πλήρη σύνθλιψη των οπτοπλίνθων και στον λυγισμό του μανδύα (Σχήμα 4δ), γεγονός που συνοδεύτηκε από απότομη πτώση του φορτίου. Τα δοκίμια τύπου Γ, τα οποία είχαν ενισχυθεί με μία στρώση μανδύα FRP ή δύο στρώσεις μανδύα TRM αστόχησαν ψαθυρά λόγω σύνθλιψης της οπτοπλινθοδομής στο μέσον του ανοίγματος, ενώ δοκίμια με μανδύες μίας στρώσης TRM αστόχησαν λόγω αποκόλλησης του πλέγματος από το υπόστρωμα (Σχήμα 4ε). Συγκρίνοντας τους δύο τύπους μανδύων σε δοκίμια τύπου Β και Γ, φαίνεται ότι οι μανδύες TRM είναι λιγότερο αποδοτικοί ως προς την αύξηση της αντοχής, αλλά πολύ περισσότερο αποδοτικοί ως προς την αύξηση της παραμορφωσιμότητας.

Περισσότερες λεπτομέρειες για αυτό το τμήμα του πειραματικού προγράμματος δίνονται στην εργασία των Papanicolaou et al. (2006β).

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αναπτύσσεται μια νέα τεχνική ενίσχυσης στοιχείων φέρουσας τοιχοποιίας. 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 τοιχίσκων σε εντός και εκτός επιπέδου ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Βάσει της απόκρισης άοπλων τοιχίσκων τύπου διατμητικού τοιχώματος, τύπου δοκού-υποστρώματος και τύπου δοκού, οι οποίοι υπεβλήθησαν σε εκτός και εντός επιπέδου ανακυκλιζόμενη φόρτιση στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, συμπεραίνεται ότι οι μανδύες TRM παρέχουν μεγάλη αύξηση τόσο της αντοχής όσο και της παραμορφωσιμότητας.

Για την περίπτωση της εκτός επιπέδου φόρτισης, η ενίσχυση με μανδύες TRM αποδεικνύεται γενικά περισσότερο αποδοτική σε σύγκριση με την ενίσχυση με μανδύες FRP ίσης δυστένειας, τόσο ως προς την αύξηση της αντοχής, όσο και ως προς την αύξηση της παραμορφωσιμότητας. Στην περίπτωση που ο μηχανισμός αστοχίας των ενισχυμένων στοιχείων χαρακτηρίζεται από θραύση των ινών του πλέγματος, η αποδοτικότητα της μεθόδου TRM υστερεί ελάχιστα σε σύγκριση με την αντίστοιχη της μεθόδου FRP.

Για την περίπτωση της εντός επιπέδου φόρτισης, οι μανδύες από TRM σε σύγκριση με εκείνους από FRP αποδεικνύονται λιγότερο αποδοτικοί ως προς την αύξηση της αντοχής, με το βαθμό αποδοτικότητας της μεθόδου να εξαρτάται από τον τύπο της φόρτισης και από τον αριθμό των στρώσεων. Σε όρους αύξησης της αντοχής η αποδοτικότητα των μανδύων TRM είναι τουλάχιστον ίση με το 65-70% της αποδοτικότητας των μανδύων FRP. Σε όρους αύξησης της παραμορφωσιμότητας η αποδοτικότητα των μανδύων TRM είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την

αντίστοιχη των μανδύων FRP. Βάσει των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, η αύξηση της αποδοτικότητας αυτής (TRM συγκριτικά με FRP) είναι 15%-30% για την περίπτωση των διατηρητικών τοιχωμάτων, 135% για την περίπτωση στοιχείων τύπου δοκού-υποστυλώματος και 350% για την περίπτωση στοιχείων τύπου δοκού. Επιπλέον, ανεξάρτητα από το συνδετικό υλικό (κονίαμα ή ρητίνη), η αντοχή αυξάνεται με την αύξηση των στρώσεων και του εφαρμοζόμενου αξονικού φορτίου, με ταυτόχρονη μείωση της παραμορφωσιμότητας του στοιχείου.

Αναμένεται ότι η τεχνική των TRM, στο εγγύς μέλλον θα αποτελεί μια ενδιαφέρουσα πρόταση για την αναβάθμιση κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία εκπονήθηκε εν μέρει 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”, και εν μέρει στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος STREP του FP6 “Open and Fully Compatible Next Generation of Strengthening System for the Rehabilitation of the Mediterranean Building Heritage” – OPERHA. Στην υλοποίηση της εργασίας έχουν συμβάλει οι πρώην προπτυχιακοί φοιτητές Χ. Μπαβέλλας και Μ. Μπουζούκου στα πλαίσια εκπόνησης διπλωματικής εργασίας.

## 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. & Ortlev, 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).
- Kolsch, H. 1998. Carbon Fiber Cement Matrix (CFCM) Overlay System for Masonry Strengthening. *Journal of Composites for Construction, ASCE*, 2(2), 105-109.
- Papanicolaou, C. G., Triantafyllou, T. C., Papathanasiou, M. & Karlos, K. 2006α. Textile Reinforced Mortar (TRM) versus FRP as Strengthening Material of URM Walls – Part I: Out-of-Plane Cyclic Loading. *RILEM Materials & Structures*, υπό κρίση.
- Papanicolaou, C. G., Triantafyllou, T. C., Karlos, K. & Papathanasiou, M. 2006β. Textile Reinforced Mortar (TRM) versus FRP as Strengthening Material of URM Walls – Part II: In-Plane Cyclic Loading. *RILEM Materials & Structures*, υπό κρίση.
- Triantafyllou, 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.
- Triantafyllou, T. C. & Papanicolaou, C. G. 2006. Shear Strengthening of RC Members with Textile Reinforced Mortar (TRM) Jackets. *Materials and Structures, RILEM*, in press.
- Triantafyllou, 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.
- Τριανταφύλλου, Α. Χ., Παπανικολάου, Κ. Γ., Μπουρνάς, Δ. και Λόντου, Π. 2006. Νέα Γενιά Συνθέτων Υλικών Ανόργανης Μήτρας (TRM) για την Ενίσχυση Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος. Πρακτικά 15<sup>ου</sup> Συνεδρίου Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη, 18-20 Οκτωβρίου.