

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΜΕ FRP.

**ΜΠΑΖΑΙΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
ΠΑΠΠΑ ΣΟΦΙΑ**

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια νέα τεχνική ενίσχυσης με σύνθετα υλικά που χρησιμοποιεί ως συγκολλητικό υλικό κονίαμα τσιμεντοειδούς σύστασης. Εν αρχή παραθέτονται τα χαρακτηριστικά των ινοπλεγμάτων αυτών σε σχέση με τις αντίστοιχες ιδιότητες των ινοπλισμένων πολυμερών σε εποξειδική ρητίνη(τα γνωστά ως FRP). Εν συνεχεία παρουσιάζεται η μηχανική συμπεριφορά τους σε σχέση με τα FRP και οι διαφορές στον τρόπο αστοχίας. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των δύο τεχνικών σε κατασκευές φέρουσας τοιχοποιίας.

1. Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της ενίσχυσης κατασκευών με τη χρήση σύνθετων υλικών. Πέραν της υπάρχουσας τεχνογνωσίας για χρησιμοποίηση σ' αυτή την κατεύθυνση ινοπλισμένων πολυμερών με εποξειδικές ρητίνες ως συγκολλητικό υλικό, εξετάζεται η εναλλακτική προοπτική της χρησιμοποίησης ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα (κονίαμα με βάση το τσιμέντο).

Τα πλεονεκτήματα των ινοπλισμένων πολυμερών είναι πολλά και ιδιαίτερα γνωστά για τη σπουδαιότητά τους : εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή (πολλαπλάσια του κοινού χάλυβα), χαμηλό βάρος, ανθεκτικότητα σε διάβρωση, ευκολία στην εφαρμογή τους. Έτσι, σε διεθνές επίπεδο, ο αριθμός επεμβάσεων σε υφιστάμενες κατασκευές με χρήση ινοπλισμένων πολυμερών είναι ιδιαίτερα εκτεταμένος και ολοένα διευρύνεται τα τελευταία 20 χρόνια, όταν και αναπτύχθηκε για πρώτη φορά η συγκεκριμένη τεχνική.

Παρ' όλα τα πλεονεκτήματά της η τεχνική των ινοπλισμένων πολυμερών έχει ορισμένες εγγενείς αδυναμίες που οφείλονται κυρίως στη χρήση ρητινών. Τέτοιες είναι : [3],[5],[10]

- Η χαμηλή τους αντίσταση σε υψηλές θερμοκρασίες. Αν και η ρητίνη καίγεται σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 250 C, προβλήματα στις μηχανικές της ιδιότητες ξεκινούν από τις θερμοκρασίες της τάξης των 70-80 C.
- Σχετικά υψηλό κόστος ρητινών.
- Αδυναμία εφαρμογής σε υγρές επιφάνειες σε κανονικές συνθήκες.
- Ο περιορισμός της ικανότητας “αναπνοής” των δομικών στοιχείων που καλύπτονται από ινοπλισμένα πολυμερή.
- Η δυσκολία διεξαγωγής μη καταστροφικής αποτίμησης πιθανών βλαβών πίσω από τους εν λόγω μανδύες μετά από σεισμούς.

Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε και παρουσιάζεται εδώ η τεχνική της ενίσχυσης με μανδύες ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα, η οποία ξεκίνησε προ ολίγων ετών ακολουθώντας την αυξανόμενη παραγωγή δομικών κονιαμάτων υψηλών επιδόσεων. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να συγκρίνει τις δύο μεθόδους ενίσχυσης με τη χρήση σύνθετων υλικών σε

οργανική μήτρα (τα γνωστά ως FRP) και σε ανόργανη όχι μόνο ως προς τη συμπεριφορά τους, αλλά και ως προς την αποτελεσματικότητά τους.

2. Σύγκριση μεθόδων FRP και ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας

Όπως θα αποδειχτεί παρακάτω, οι δυο αυτές μέθοδοι, αν και παρόμοιες φιλοσοφίας, έχουν σημαντικές διαφορές. Η κυριότερη διαφοροποίηση μεταξύ ινοπλισμένων πολυμερών και ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα έγκειται στο υλικό που χρησιμοποιείται ως συγκολλητική ουσία. Στην περίπτωση της μεθόδου FRP ως συγκολλητική ουσία χρησιμοποιείται εποξειδική ρητίνη, που είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές (οργανικό υλικό), ενώ στη μέθοδο ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας χρησιμοποιείται κονίαμα τσιμεντοειδούς σύστασης (ανόργανο υλικό).

Πέρα από τις διαφορές στη χημική τους σύσταση τα δυο αυτά υλικά έχουν και διαφορές στη μορφή τους. Η εποξειδική ρητίνη είναι σε υγρή μορφή, ενώ το κονίαμα της ανόργανης μήτρας είναι παχύρευστο μείγμα κονιάς και λεπτόκοκκης άμμου που αναμειγνύεται με πολυμερή πρόσθετα. Συνεπώς η εποξειδική ρητίνη, λόγω της ρευστότητάς της παρουσιάζει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι της ανόργανης μήτρας. Οι ρητίνες έχουν την δυνατότητα να διεισδύσουν στις ίνες, δημιουργώντας ισχυρό δεσμό μεταξύ ινών και μήτρας σε αντίθεση με το κονίαμα, το οποίο λόγω της κοκκώδους μορφής του, είναι δύσκολο να διεισδύσει σε ένα πλέγμα ινών ώστε να γίνει σωστός ο εμποτισμός των ινών. Γι' αυτό άλλωστε η μέθοδος ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας χρησιμοποιεί τα σύνθετα υλικά σε πλέγμα αντί για τα συνεχή ύφασματα που χρησιμοποιούνται στην FRP μέθοδο.

Συμπερασματικά, το πλεονέκτημα των ινοπλισμένων πολυμερών έγκειται στο γεγονός ότι συνεργάζονται πιο αποτελεσματικά με τις ίνες και εξασφαλίζουν προβλέψιμη μηχανική συμπεριφορά. Αντιθέτως, τα σύνθετα υλικά ανόργανης μήτρας δεν εξασφαλίζουν τόσο καλή μονολιθική σύνδεση. Ταυτόχρονα απαιτούνται περισσότερες στρώσεις πλέγματος για να επιτευχθεί η ίδια αποδοτικότητα (αντοχή) με τα ινοπλισμένα πολυμερή, μιας και η απόσταση των ινών είναι αρκετά μεγαλύτερη. Ωστόσο έχει αποδειχθεί ότι η συνεισφορά της αντοχής του μανδύα στη συνολική αντοχή του ενισχυμένου στοιχείου, από ένα σημείο και πέρα είναι αμελητέα.

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα της εποξειδικής ρητίνης έναντι της τσιμεντοκονιάς είναι η ταχύτερη πήξη, χωρίς ωστόσο αυτό να σημαίνει και ταχύτερη εφαρμογή του συστήματος ενίσχυσης.

Στον αντίποδα, το γεγονός ότι η μέθοδος ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας δεν εξασφαλίζει την ίδια μονολιθική σύνδεση με τη μέθοδο FRP στο στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος, δεν αποτελεί πάντα μειονέκτημα. Κατά τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος του μέλους, εμφανίζονται μικρές ρωγμές στην εξωτερική επιφάνεια του κονιάματος, προειδοποιώντας για την αστοχία, ενώ παράλληλα μειώνεται η πιθανότητα να συμβεί αποκόλληση των συνθέτων υλικών καθώς δεν αξιοποιείται όλη η εφελκυστική αντοχή των ινών.

Σε αντίθεση με τα κονιάματα, για την εφαρμογή της εποξειδικής ρητίνης απαιτείται κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας ενίσχυσης. Πιο συγκεκριμένα πρέπει να εκτραχύνεται η επιφάνεια εφαρμογής, έτσι ώστε να αποκαλύπτονται τα αδρανή του δομικού στοιχείου για να είναι εφικτή η καλή συνάφεια του μανδύα με το μέλος.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα της εποξειδικής ρητίνης είναι ότι για να επιτευχθεί καλή συνάφεια με το σκυρόδεμα πρέπει η επιφάνεια που θα εφαρμοστεί να

μην είναι υγρή, κάτι που δεν είναι απαραίτητο για τα τσιμεντοκονιάματα. Επίσης, η επιφάνεια εφαρμογής πρέπει να είναι καθαρή από σκόνη, για να υπάρχει μονολιθική σύνδεση μεταξύ μανδύα και υποστρώματος.

Οι μανδύες των ινοπλισμένων πολυμερών υστερούν έναντι των τσιμεντοκονιαμάτων στο γεγονός ότι είναι αδιαπέρατοι. Σαν αποτέλεσμα στο εσωτερικό του συστήματος ενίσχυσης εγκλωβίζεται υγρασία και συσσωρεύεται το οξυγόνο των πόρων προξενώντας προβλήματα απώλειας αντοχής στον πυρήνα του σκυροδέματος και στον εσωτερικό οπλισμό λόγω διάβρωσης. Αντίθετα, η μήτρα ανόργανης σύστασης προσφέροντας πλήρη, μηχανική, φυσική και χημική συμβατότητα του μανδύα με το ενισχυόμενο μέλος, εξασφαλίζει την επιθυμητή διαπερατότητα του μανδύα.

Επιπλέον οι εποξειδικές ρητίνες, όπως είναι γνωστό, έχουν πτωχή συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες, φωτιά και ακτινοβολίες. Συγκεκριμένα σε θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (που κυμαίνεται ενδεικτικά μεταξύ των 50 και 80 °C) απομειώνεται ραγδαία το μέτρο ελαστικότητάς τους, μειώνοντας έτσι την ικανότητά τους να μεταφέρουν δυνάμεις. Επίσης σε θερμοκρασίες της τάξης των 200 έως 300°C προκαλείται ανάφλεξη και η καύση τους απελευθερώνει τοξικές ουσίες που ενδέχεται να δημιουργήσουν ένα επιβλαβές περιβάλλον για το εργατικό προσωπικό. Αντίθετως, τα τσιμεντοειδή κονιάματα δεν έχουν πρόβλημα σε υψηλές θερμοκρασίες, φωτιά και ακτινοβολίες και παράλληλα είναι φιλικά προς το εργατικό προσωπικό. Παράλληλα, εξασφαλίζουν καλύτερη προστασία των ινών από περιβαλλοντικούς παράγοντες και εξωτερικές φθορές.

Γενικότερα η μέθοδος ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας υπερισχύει της μεθόδου FRP στον οικονομικό τομέα. Παρά το γεγονός ότι για την επίτευξη ίδιας αποδοτικότητας απαιτούνται περισσότερες στρώσεις σύνθετου υλικού, το υψηλό κόστος των εποξειδικών ρητινών έναντι των κονιαμάτων είναι ανασταλτικός παράγοντας στην επιλογή της μεθόδου των ινοπλισμένων πολυμερών. Τροχοπέδη στη χρήση των εποξειδικών ρητινών είναι η απαίτηση εξειδικευμένου προσωπικού και η υποχρεωτική χρήση προστατευτικού εξοπλισμού, σε αντίθεση με τα κονιάματα με τα οποία ο τεχνικός κόσμος είναι περισσότερο εξοικειωμένος.

Σοβαρό πρόβλημα της τεχνικής ενίσχυσης με FRP αποτελεί και η μεγάλη δυσκολία της αποτίμησης της σεισμικής επάρκειας της ενισχυμένης κατασκευής πίσω από τους πολυμερικά ινοπλισμένους μανδύες

Τέλος τα σύνθετα υλικά ανόργανης μήτρας εφαρμόζονται εύκολα και γρήγορα στην ενίσχυση, προκαλούν λιγότερη όχληση στο περιβάλλον, έχουν δυνατότητα ανακύκλωσης και απαιτούν λιγότερο εξοπλισμό για την εφαρμογή τους.

Όλα τα στοιχεία που αναφέρθηκαν παραπάνω δείχνουν την υπεροχή των συνθέτων υλικών ανόργανης μήτρας έναντι των ινοπλισμένων πολυμερών και συνηγορούν στο γεγονός ότι η μέθοδος ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας είναι κατάλληλη να αντικαταστήσει τη μέθοδο FRP.[5]

Παρακάτω παρατίθενται οι ενδεικτικές μηχανικές ιδιότητες των υλικών.[3]

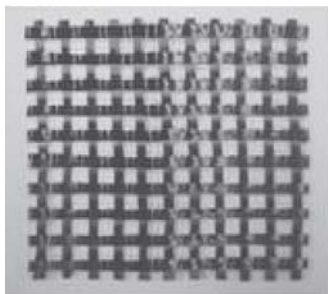
	Σκυρόδεμα	Μεταλλικός Οπλισμός	Ανθρακονήματα	Εποξειδική ρητίνη
Θλιπτική Αντοχή (MPa)	25-150	240-690	-	55-130
Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	1-4	240-690	2200-4500	9-30
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	20-50	200-210	230-600	0.5-20
Συντ.Θερμικής Διαστολής (10 ⁻⁶ /°C)	8-16	10-15	7-12	25-30
Πυκνότητα (kg/m ³)	2350	7800	1750-1950	1100-1300

3. Διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου ενίσχυσης με ινοπλεγμάτα σε ανόργανη μήτρα [5]

Παρά τις διαφορές που αναφέρθηκαν παραπάνω, η διαδικασία εφαρμογής και των δυο μεθόδων είναι παρόμοια :

Αρχικά, γίνεται κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας εφαρμογής της ενίσχυσης (εκτράχυνση, καμπύλωμα των γωνιών, καθαρισμός από σκόνη) ώστε να είναι αποτελεσματική η περίσφιξη. Το πλέγμα ξετυλίγεται στην προεμποτισμένη με τσιμεντοκονίαμα επιφάνεια του δομικού στοιχείου που πρόκειται να ενισχυθεί. Ταυτόχρονα γίνεται ο εμποτισμός των συνθέτων υλικών με τη συγκολλητική ουσία. Ο εμποτισμός του πλέγματος των ινών με κονίαμα γίνεται έπειτα από κάθε στρώση σύνθετου υλικού που εφαρμόζεται στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου. Για να εξασφαλιστεί η πλήρης ενεργοποίηση του μανδύα είναι απαραίτητη η αγκύρωση του πλέγματος κατά τα 2/3 περίπου της πλευράς του στοιχείου που ενισχύεται. Αφού τελειώσει η περιτύλιξη του στοιχείου με το μανδύα, τοποθετείται ένα εξωτερικό στρώμα τσιμεντοκονίας, ίδιας σύστασης με το υλικό της μήτρας, για προστασία του συστήματος ενίσχυσης. Το σύστημα ενίσχυσης αποκτά πλήρη αντοχή ύστερα από την πάροδο περίπου δεκαπέντε ημερών.

Παρακάτω φαίνονται εικόνες από την ενίσχυση υποστυλωμάτων με χρήση ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα :



Εικ. 1 : Ινόπλεγμα 2 Διευθύνσεων. [7]



Εικ.2: Επάλειψη Επιφάνειας με Κονίαμα [5]



Εικ. 3: Περιτύλιξη Πλέγματος [5]



Εικ. 4: Τελική Επίστρωση με Τσιμεντοκονία [5]

4. Μηχανική Συμπεριφορά Στοιχείων Ενισχυμένων με Σύνθετα Υλικά.

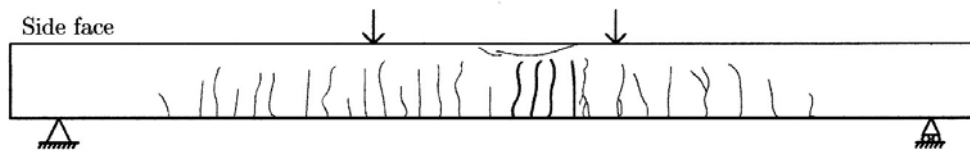
Για τη μελέτη της συμπεριφοράς στοιχείων ενισχυμένων με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας έχουν λάβει χώρα αρκετές πειραματικές έρευνες την τελευταία οκταετία τόσο στην Ελλάδα όσο και στο εξωτερικό. Οι παράμετροι που ερευνώνται αφορούν τη συμπεριφορά των ενισχυμένων μελών σε διάφορων ειδών καταπονήσεις, τα ιδιαίτερα μηχανικά χαρακτηριστικά τους, τους τρόπους και μηχανισμούς αστοχίας τους, το βέλτιστο τρόπο εφαρμογής των μανδύων. Επίσης, επιχειρείται σύγκριση με την αντίστοιχη συμπεριφορά των μελών πριν την ενίσχυση ή μετά από ενίσχυση με ινοπλισμένα πολυμερή εποξειδικών ρητινών για καλύτερη, συγκριτική αξιολόγηση. Λόγω της σχετικά σύντομης μελέτης της εν λόγω τεχνικής πλήρης ταύτιση αποτελεσμάτων δεν είναι δυνατή. Γι' αυτό επιχειρείται μια ανασκόπηση της ερευνητικής διαδικασίας με κριτήριο την ταύτιση των συμπερασμάτων τους.

4.1 Ενίσχυση Έναντι Κάμψης.

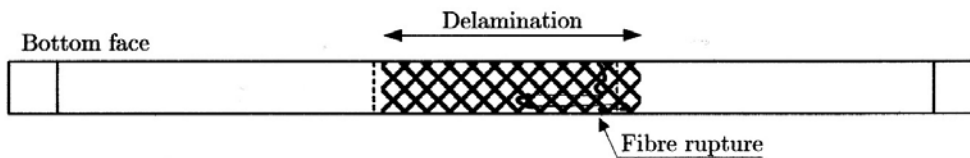
Σκοπός της ενίσχυσης μελών έναντι κάμψης είναι η ανάληψη μέρους των τάσεων του εφελκόμενου πέλματος από τους μανδύες σύνθετων υλικών,

εκμεταλλεζόμενοι έτσι την εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή των υλικών αυτών. Συνήθως αυτού του είδους η ενίσχυση έχει εφαρμογή σε δοκούς και πλάκες που κρίνονται ανεπαρκείς στην κρίσιμη - μεσαία - διατομή σε κάμψη. Σ' αυτή την περίπτωση η εφαρμογή είναι σχετικά απλή, αφού συγκολλάται ο μανδύας στο εφελκζόμενο πέλμα. Υπάρχει, όμως, και η περίπτωση υποστρωμάτων με κρίσιμες σε κάμψη τις ακραίες διατομές. Στην περίπτωση αυτή η εφαρμογή των σύνθετων υλικών είναι γενικά δύσκολη, δεδομένου ότι στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να εξασφαλιστεί η αγκζρωση των οπλισμών εντός των κόμβων. [9]

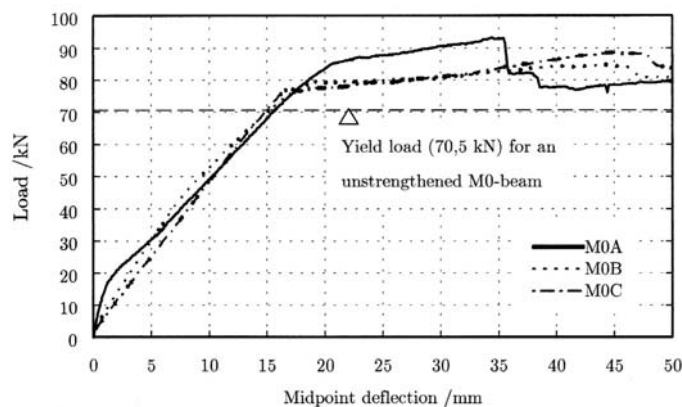
Πειράματα που έχουν εκπονηθεί μελετούν, ως επί των πλείστον, την κάμψη 2 σημείων αμφιέριστων δοκών στις οποίες είχε τοποθετηθεί μανδύας σε ανόργανη μήτρα στο εφελκζόμενο (κάτω) πέλμα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [2]:



Η πιθανότερη μορφή αστοχίας δοκών ενισχυμένων με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας (αν και είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων όπως της έντασης της φόρτισης, του υπάρχοντος οπλισμού κτλ) είναι η θραύση των ινών και ακολούθως η τοπική αποκόλληση των ινών από το δοκίμιο, όπως διακρίνεται στο σχήμα [3]



Παρακάτω φαίνεται και ένα τυπικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης στο μέσον μιας ανάλογης δοκού [3]:



Σε γενικές γραμμές η συμπεριφορά των οπλισμών ενίσχυσης ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα είναι εξίσου ικανοποιητική με αυτή των οπλισμών σε πολυμερική μήτρα, αν και μειονεκτεί ελαφρώς. Παρόλο που και οι δυο τεχνικές δεν οδηγούν σε σημαντική αύξηση του φορτίου αστοχίας, στοιχεία ενισχυμένα με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας είχαν μικρότερο φορτίο διαρροής, μικρότερη δυσκαμψία μετά τη

διαρροή, αλλά και μεγαλύτερη παραμορφωσιμότητα κατά την αστοχία συγκριτικά με τα αντίστοιχα με FRP [2],[3]. Τα χαρακτηριστικά αυτά αποδίδονται στην ελαφρά μειωμένη διατμητική συνεργασία μεταξύ εξωτερικών οπλισμών και σκυροδέματος στην περίπτωση των με ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας συγκριτικά με τα FRP.

Συγκεκριμένα, από την πειραματική διαδικασία έχει προκύψει ότι η ενίσχυση μελών με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας οδηγεί σε αύξηση του φορτίου αστοχίας κατά 10-20 %. Όμως, η αντίστοιχη αύξηση της αντοχής έναντι κάμψης με FRP είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με αυτή των ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα. Οι αντίστοιχες συγκριτικές έρευνες την προσδιορίζουν σε ποσοστό 35-45% [2],[3].

Καλό θα ήταν να επισημάνουμε εδώ τη σημασία της χρήσης κονιαμάτων υψηλής αντοχής και δυσθραυστότητας κατά την εφαρμογή των με ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας για την αποφυγή μιας ιδιαίτερης μορφής αστοχίας, της διαστρωματικής απόσχισης. Πρόκειται για την αποκόλληση του οπλισμού ενίσχυσης δια μέσου του κονιάματος στη διεπιφάνεια μεταξύ δυο στρώσεων ινοπλεγμάτων (και όχι κοντα στη διεπιφάνεια σκυροδέματος- οπλισμών ενίσχυσης, όπως συμβαίνει στην ενίσχυση με FRP), λόγω χαμηλής διατμητικής αντοχής του κονιάματος

Η καμπτική ενίσχυση δοκών οδηγεί σε πλάστιμη συμπεριφορά του μέλους. Μάλιστα, η παραμόρφωση αστοχίας του προκύπτει της τάξης του 0.5%. Αυτή η παραμόρφωση είναι επιθυμητή γιατί η διαρροή του χάλυβα συμβαίνει σε μικρότερη τιμή (0.2-0.3%), γεγονός που επιτρέπει στις ίνες να αξιοποιήσουν όσο το δυνατόν περισσότερο τη δυνατότητα ανάληψης εφελκυστικών τάσεων.[5]

Πάντως, αξίζει να σημειωθεί ότι η τεχνική αυτή χρίζει περαιτέρω διερεύνησης για καμπτική ενίσχυση στοιχείου τύπου πλάκας (και όχι δοκού), ώστε να γίνεται πλήρης αξιοποίηση των ινών και στις δυο διευθύνσεις των πλεγμάτων.

4.2 Ενίσχυση Έναντι Τέμνουσας

Η ενίσχυση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος σε διάτμηση αποσκοπεί αφενός στη αύξηση της διατμητικής τους αντοχής και αφετέρου στην αποφυγή του ψαθυρού τρόπου αστοχίας -που είναι ανεπιθύμητος- καθώς και στη βελτίωση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας του μέλους σε ανακυκλιζόμενη (σεισμική) φόρτιση.

Η τοποθέτηση του μανδύα και στους δύο τρόπους ενίσχυσης είναι βέλτιστος όταν οι ίνες των σύνθετων υλικών είναι παράλληλες προς τις εφελκυστικές τάσεις, δηλαδή κάθετες στις ρωγμές. Για αυτό το λόγο έχει δοκιμαστεί τοποθέτηση των μανδύων σε ελικοειδή μορφή. Το επικρατέστερο, όμως, είναι οι ίνες να εφαρμόζονται με διεύθυνση κάθετη στον άξονα του μέλους.

Από τη μελέτη περιπτώσεων υποδιαστασιοποιημένων διατομών έναντι διάτμησης η ενίσχυσή τους με σύνθετα υλικά (και με τις δυο προαναφερθείσες μεθόδους) έχει αποδειχθεί ότι οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της συμπεριφοράς τους. Συνήθως, μάλιστα, οδηγεί σε αλλαγή του μηχανισμού αστοχίας τους από διατμητικού τύπου-ψαθυρό σε πλάστιμου τύπου-καμπτικό. Αυτό εξαρτάται από τον αριθμό στρώσεων του μανδύα. Η αύξηση του φορτίου αστοχίας για ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας είναι της τάξης του 85-100%. Τα ινοπλισμένα πολυμερή υπερτερούν σ' αυτό τον τομέα αφού επιτυγχάνουν καλύτερα αποτελέσματα περίπου 100-150%. [7], [11]

4.3 Περίσφιξη υποστρωμάτων.

Ένας πολύ συχνός και εξαιρετικά αποτελεσματικός τρόπος εφαρμογής των σύνθετων υλικών είναι η περίσφιξη σκυροδέματος. Ιδιαίτερα σε περιπτώσεις σημαντικής καταπόνησης υποστρωμάτων η περίσφιξη τους εμποδίζει την εγκάρσια διόγκωση του σκυροδέματος μέσω ενεργοποίησης του μανδύα, οι ίνες του οποίου παραλαμβάνουν εφελκυστικές τάσεις εκμεταλλευόμενες έτσι την εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική τους αντοχή. Οι τάσεις περίσφιξης που επιβάλλονται στο μέλος έχουν ως αποτέλεσμα [9]:

- i) Την αύξηση της θλιπτικής αντοχής και παραμορφωσιμότητας του σκυροδέματος.
- ii) Την αύξηση της πλαστιμότητας του μέλους.
- iii) Την βελτίωση των συνθηκών συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος σε περιοχές μάτισης.
- iv) Την καθυστέρηση εμφάνισης λυγισμού των διαμήκων ράβδων.

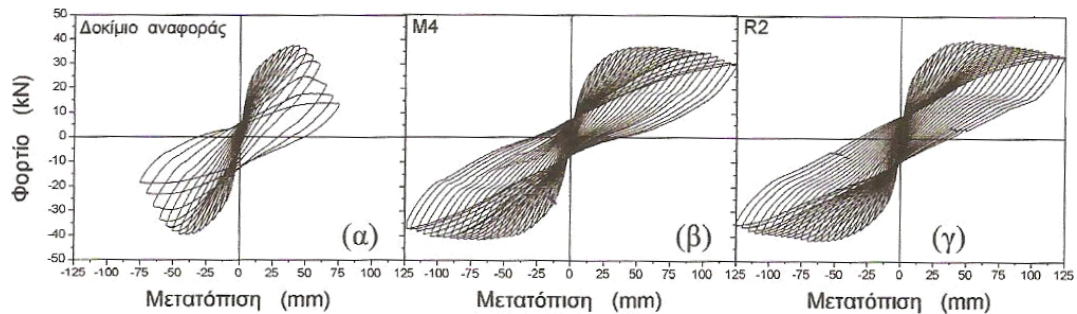
- Όπως έχει διαπιστωθεί, η αποτελεσματικότητα των μανδύων από ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας ως προς την αύξηση της θλιπτικής αντοχής και παραμορφωσιμότητας στοιχείων άοπλου ή οπλισμένου σκυροδέματος είναι γενικώς υψηλή και μόνο ελαφρώς μειωμένη ως προς την αντίστοιχη των μανδύων από FRP. Η μείωση αυτή είναι εντονότερη στην περίπτωση άοπλων κυλινδρικών στοιχείων, αλλά εξαιρετικά περιορισμένη, της τάξης του 10%, στην περίπτωση οπλισμένων στοιχείων, όπου κύριος στόχος της περίσφιξης είναι η καθυστέρηση του λυγισμού των διαμήκων ράβδων.
- Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης περισφιγμένου σκυροδέματος που υποβάλλεται σε αξονική θλίψη έχουν παρόμοια, διγραμμική, μορφή και στις δύο τεχνικές ενίσχυσης. Οι μανδύες, όμως, ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας είναι δυνατόν να εξαντλήσουν την εφελκυστική αντοχή τους με κατάλληλη επιλογή κονιάματος.
- Η αστοχία τους, μάλιστα, λόγω εγκάρσιας διόγκωσης του περισφιγμένου σκυροδέματος είναι γενικώς βαθμιαία και όχι τόσο ψαθυρή όπως στην περίπτωση των FRP. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη σταδιακή θραύση δεσμών ινών, η οποία επεκτείνεται σχετικά αργά στις γειτονικές. Έτσι, η συμπεριφορά υποστρωμάτων ενισχυμένων με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας καταλήγει να είναι πιο πλάστιμη σε σχέση με αυτή υποστρωμάτων ενισχυμένων με FRP.
- Η αποτελεσματικότητα των μανδύων και στις δυο τεχνικές αυξάνεται μη αναλογικά με τον αριθμό των στρώσεων. [1]

4.4 Αύξηση Πλαστιμότητας σε Υποστρώματα.

Μια σημαντική εφαρμογή των μανδύων σύνθετων υλικών είναι σε περιπτώσεις που υπάρχει απαίτηση αύξησης της πλαστιμότητας του μέλους. Οι μανδύες περισφιγγουν τις κρίσιμες διατομές υποστρωμάτων (κορυφή και βάση) τα οποία παρουσιάζουν μειωμένη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε σεισμικές καταπονήσεις (π.χ. παλαιές κατασκευές με αραιούς συνδετήρες στα υποστρώματα).

Όπως έχει διαπιστωθεί από πειραματικές διαδικασίες, η απόκριση των ενισχυμένων υποστρωμάτων βελτιώνεται σημαντικά λόγω της περίσφιξης στις κρίσιμες διατομές. Η αστοχία των μελών προέρχεται από καμπτική διαρροή στην

κρίσιμη διατομή στο ίδιο περίπου φορτίο, ωστόσο ο επακόλουθος λυγισμός των διαμήκων ράβδων είναι ελεγχόμενος λόγω της περισφιζής. Έτσι, καθίσταται δυνατή η ανάπτυξη μεγάλης οριζόντιας μετατόπισης, η οποία συνοδεύεται από μικρή πτώση του φορτίου για ενίσχυση με FRP έως οριακή για ενίσχυση με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας.

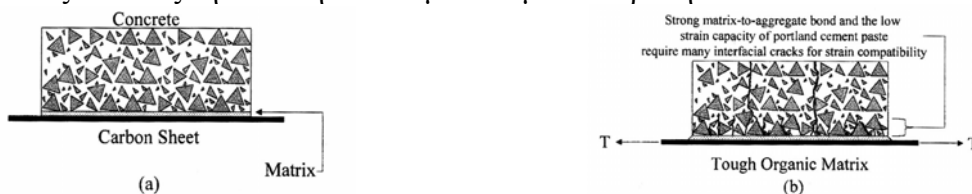


Σχ.1 : Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης : i) δοκίμιο χωρίς ενίσχυση, ii) δοκίμιο ενισχυμένο με μανδύα ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας iii) δοκίμιο ενισχυμένο με FRP.[1]

4.5 Μηχανισμοί Αστοχίας

Παρατηρούμε, λοιπόν, πως παρά τις διαφορές στις μηχανικές ιδιότητες της οργανικής από την ανόργανη μήτρα, η συμπεριφορά των δύο μεθόδων είναι σχεδόν ισοδύναμη. Η διαπίστωση αυτή είναι εντυπωσιακή, αν αναλογιστεί κανείς ότι η οργανική μήτρα είναι 1000 φορές σκληρότερη από την ανόργανη και έχει 65 φορές μεγαλύτερη δυνατότητα παραμόρφωσης από την ανόργανη. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στις σημαντικές διαφορές στον μηχανισμό μεταφοράς των τάσεων κατά την αστοχία στα δυο συστήματα ενίσχυσης.

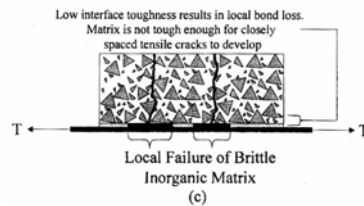
Κατά τη φόρτιση στοιχείου ενισχυμένου με FRP, αρχίζουν να σχηματίζονται πολλές τριχωειδείς ρωγμές στη διεπιφάνεια του στοιχείου με το σύνθετο υλικό (Σχ.2b). Αυτό συμβαίνει, γιατί οι οργανικές μήτρες (εποξειδικής ρητίνης) είναι σημαντικά σκληρότερες από το τσιμέντο. Επομένως, απαιτείται λιγότερη ενέργεια για να θραυτεί το σκυρόδεμα της επικάλυψης σε σχέση με την αντίστοιχη ενέργεια που απαιτείται για τη θραύση της διεπιφάνειας της οργανικής μήτρας με τα αδρανή του σκυροδέματος. Η σύνδεση ρητίνης-αδρανών είναι τόσο ισχυρή που δε χάνεται ακόμα και σε μεγάλες παραμορφώσεις. Ως εκ τούτου και με δεδομένο τη μικρή δυνατότητα παραμόρφωσης του τσιμέντου, δημιουργούνται πολλές μικρές ρωγμές στο εξωτερικό σκυρόδεμα, προκειμένου να παραμείνουν συμβατές οι παραμορφώσεις του στοιχείου. Εν τέλει, οι ρωγμές μεγαλώνουν αρκετά μέχρι που διαπερνούν το στοιχείο διαλύοντας εντελώς την ένωση του τσιμέντου με τα αδρανή.



Σχ.2: Στοιχείο Σκυροδέματος Ενισχυμένο με σύνθετα υλικά: (α) Αφόρτιστο, (β) σε Εφελκυσμό με Οργανική μήτρα.[2]

Σ' ένα αντιστοιχο στοιχείο ενισχυμένο με τη μέθοδο της ανόργανης μήτρας, δεν εμφανίζονται τέτοιου είδους ρωγμές (σχ.3c). Αυτό συμβαίνει, γιατί στην μήτρα

ανόργανης σύστασης λόγω της συγκρίσιμης σκληρότητάς τους με το τσιμέντο, η σύνδεσή της με τα αδρανή δεν είναι τόσο ισχυρή, έτσι ώστε να εμποδίσει τη μεταφορά των τάσεων στο γειτονικό σκυρόδεμα, κάτι που είναι απαραίτητο για την περαιτέρω δημιουργία μικρορωγμών. Σε περιπτώσεις δηλαδή μεγάλων παραμορφώσεων το πιθανότερο είναι να αστοχήσει η μήτρα παρά το σκυρόδεμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ύπαρξη διακεκριμένων ρωγμών ανά διαστήματα και τη δημιουργία τοπικών περιοχών συγκέντρωσης τάσεων στις ίνες άνθρακα. Η αστοχία, επομένως, προκύπτει εξαιτίας της θραύσης των ινών, συνοδευόμενη από λίγες και αραιές ρωγμές στην τσιμεντοειδή μήτρα. Τέλος παρατηρήθηκε πως όταν η συγκολλητική ουσία μεταξύ των ινών είναι το κονίαμα, οι ίνες ενεργούν ανεξάρτητα μεταξύ τους και όχι σαν ένα συμπαγές σώμα, με αποτέλεσμα να μειώνεται η πιθανότητα αποκόλλησης τους από το σκυρόδεμα. [2]



Σχ.3: Ινόπλεγμα σε Εφελκυσμό σε Ανόργανη Μήτρα [2]

Στον μηχανισμό αυτό της μεταφοράς των τάσεων οφείλεται και η διαφορά των δυο τεχνικών ως προς τον τρόπο αστοχίας. Η αστοχία των μανδύων από πλέγματα ινών με τσιμεντοειδή μήτρα δεν είναι απότομη σε αντίθεση με τον τρόπο αστοχίας των ινοπλισμένων πολυμερών, που οφείλεται στην αποκόλληση του μανδύα και άρα είναι ψαθυρής φύσης. Στην περίπτωση των μανδύων από ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα η θραύση ξεκινά από ορισμένες ίνες και επεκτείνεται σταδιακά στις γειτονικές προκαλώντας έτσι έναν πιο πλαστικό τρόπο αστοχίας. [2]

5. Ενίσχυση Τοιχοποιίας με Σύνθετα Υλικά.[6]

Οι κατασκευές φέρουσας τοιχοποιίας αποτελούν έναν από τους παλαιότερους τύπους κατασκευών στον κόσμο. Όπως έχει διαπιστωθεί λόγω της παλαιότητάς τους και της συσσωρευόμενης σεισμικής καταπόνησης οι κατασκευές αυτές είναι επιρρεπείς σε αστοχία σε περιπτώσεις σεισμών ακόμα και μέτριας έντασης και σε ισχυρούς ανέμους, αποτελώντας σημαντικό κίνδυνο για την δημόσια ασφάλεια.

Η αναγκαιότητα της ενίσχυσής τους έχει οδηγήσει σε πληθώρα μεθόδων επεμβάσεων. Η μέθοδος των ινοπλισμένων πολυμερών (FRP) έχει εφαρμοστεί κι εδώ με σημαντικά πλεονεκτήματα. Τα μειονεκτήματα όμως της χρήσης εποξειδικών ρητινών που έχουν αναφερθεί οδήγησαν στην ανάπτυξη της τεχνικής των ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας. Εδώ εξετάζονται τα αποτελέσματα της ενίσχυσής τους με την εν λόγω μέθοδο σε σύγκριση με αυτή των FRP, όπως έχουν προκύψει από πειραματική έρευνα του πανεπιστημίου της Πάτρας (Papanicolaou C. Et al. 2007).

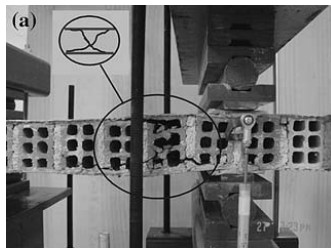
Πειραματική διαδικασία: Τοίχοι οπτοπλινθοδομής ενισχύθηκαν με αμφίπλευρους μανδύες σύνθετων υλικών (Ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας – FRP). Εν συνεχεία δοκιμάστηκαν υπό συνθήκες ανακυκλιζόμενης φόρτισης σε εκτός επιπέδου κάμψη 3 σημείων. Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν ήταν δοκίμια με διαφορετικό αριθμό στρώσεων μανδύα και τοίχοι με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Συμπεράσματα: Η ενίσχυση φέρουσας τοιχοποιίας με τις δύο υπό εξέταση μεθόδους έδωσε εξαιρετικά αποτελέσματα τόσο στην αύξηση της αντοχής όσο και στην παραμορφωσιμότητα σε σχέση με τα αρχικά χωρίς ενίσχυση στοιχεία. Η συμπεριφορά, όμως, των ενισχυμένων τοίχων μπορεί να κατηγοριοποιηθεί βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων ως εξής :

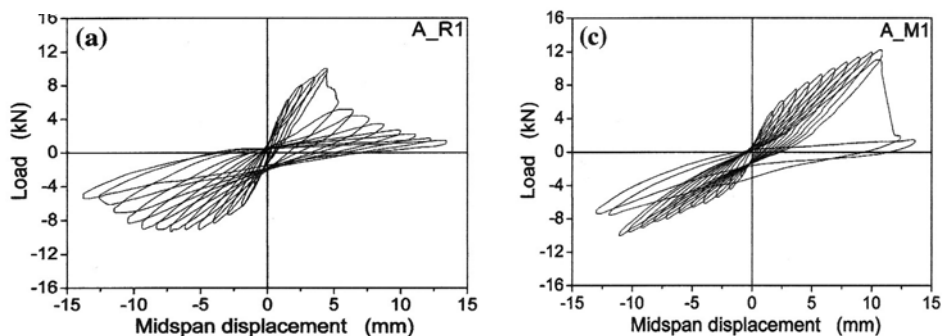
1. Αστοχία μέλους λόγω καταστροφής της τοιχοποιίας και αποκόλλησης του μανδύα.

Στην περίπτωση αυτή τα ενισχυμένα στοιχεία και των δύο μεθόδων παρουσίασαν τάσεις αποκόλλησης των οπτόπλινθων μέσω σχηματισμού ρωγμών στον αρμό πλήρωσης της τοιχοποιίας. Παρ' όλα αυτά, λόγω της παρουσίας των μανδύων συγκρατήθηκαν και η τελική αστοχία επήλθε από την ανάπτυξη διαγώνιων ρωγμών κάθετα στο επίπεδο του τοίχου (όπως διακρίνεται στην εικόνα 5). Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα την πτώση της δύναμης και της δυσκαμψίας του στοιχείου και συνοδεύτηκε από αποκόλληση των μανδύων. Στην ανόργανη μήτρα λόγω της χαμηλότερης αντοχής της η κατανομή των τάσεων ήταν περισσότερο ομοιόμορφη, γεγονός που οδήγησε σε ομαλότερη συμπεριφορά του στοιχείου και εν τέλει σε αύξηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητάς του σε σχέση με αυτές των FRP. Η αύξηση αυτή (υπέρ των ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας) κυμαίνεται μεταξύ:

- 13-22% για την αντοχή
- 39-140% για την παραμορφωσιμότητα.



Εικ.5 : Αστοχία δοκιμίου λόγω ανάπτυξης χιαστί ρωγμών.[6]



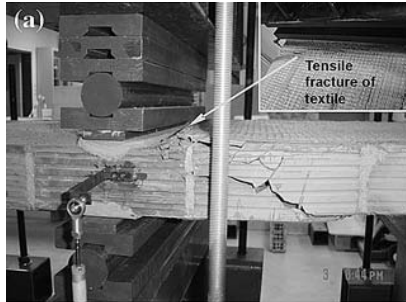
Σχ.4 : Διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης για: α) Στοιχείο Ενισχυμένο με FRP, β) Στοιχείο Ενισχυμένο με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας.[6]

2. Αστοχία μέλους λόγω θραύσης των ινών των σύνθετων υλικών.

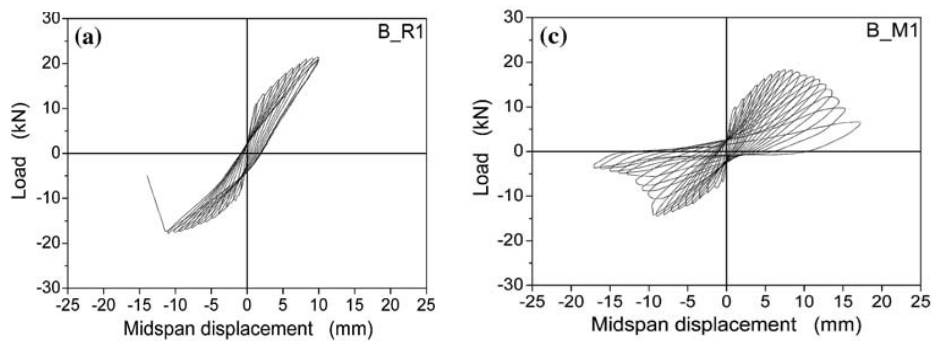
Η εν λόγω μορφή αστοχίας είναι πιο σπάνια και εμφανίστηκε σε περιπτώσεις τοιχοποιίας που ήταν λιγότερο επιρρεπής σε κάμψη και η ενίσχυση έγινε με τον ελάχιστο αριθμό στρώσεων μανδύα. Κατά τη διάρκεια της ανακυκλιζόμενης φόρτισης άρχισαν να αναπτύσσονται οι διαγώνιες ρωγμές όπως αναμενόταν αλλά παρουσιάστηκε ξαφνική αστοχία των ινών, που οδήγησε σε απότομη

πτώση της ικανότητας του στοιχείου να φέρει φορτία. Βέβαια, στην περίπτωση των στοιχείων με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας η τελική παραμόρφωση ναι μεν ήταν μειωμένη (και μάλιστα περισσότερο σε σχέση με αυτή των FRP), αλλά διατήρησαν μια μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, όπως διακρίνεται στα διαγράμματα. Στην περίπτωση που ο τρόπος αστοχίας είναι η θραύση των ινών η μέθοδος των FRP εμφανίζεται πιο αποτελεσματική, αφού παρουσιάζει σε σύγκριση με τα ινοπλεγμάτα ανόργανης μήτρας αύξηση:

- 19% στην αντοχή
- 14% στην παραμορφωσιμότητα.



Εικ.6: Αστοχία δοκιμίου λόγω θραύσης των ινών.[6]



Σχ.5 : Διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης για: α) Στοιχείο Ενισχυμένο με FRP, β) Στοιχείο Ενισχυμένο με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας.[6]

6. Συμπεράσματα

Βάσει της ερευνητικής προσπάθειας που έχει γίνει τόσο στην Ελλάδα όσο και διεθνώς αναπτύχθηκε η τεχνική των ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα, η οποία αποτελεί μία ενδιαφέρουσα εναλλακτική πρόταση που αποσκοπεί στην αντιμετώπιση των προβλημάτων των FRP. Καταδεικνύεται ότι η αποτελεσματικότητα μανδύων σε ανόργανη μήτρα είναι υψηλή και συγκρίσιμη με αυτή των FRP αν και ελαφρώς μειωμένη σε πολλές περιπτώσεις.

Βιβλιογραφία

- [1] Αθ.Τριανταφύλλου, Αικ.Παπανικολάου, Δ.Μπουρνάς, Π.Λόντου, «Νέα γενιά σύνθετων υλικών ανόργανης μήτρας για την ενίσχυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος», 15^ο συνέδριο σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη, 2006
- [2] Kurtz S., Balaguru P. (2001) “Comparison of Inorganic and Organic Matrices for Strengthening of RC Beams with Carbon Sheets ”
Journal of Structural Engineering, V.127, No1, 2001
- [3] Wiberg A. “Strengthening of Concrete Beams Using Cementitious Carbon Fiber Composites ” , Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2003
- [4] Toutanji H. , Deng Y. M. (2003) “Flexural behaviour of RC Beams Strengthened with Carbon Sheets Bonded with Inorganic and Organic Matrices ” , Structural Faults and Repair, (2003)
- [5] Ζυγούρης Κ. «Σεισμική ενίσχυση μέσω περίσφιγξης υποστηλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος σε περιοχές ματίσεων με πλέγματα συνεχών ινών σε ανόργανη μήτρα» Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης (2007)
- [6] C G. Papanicolaou , T C. Triantafyllou, M Papathanasiou , K Karlos, “Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: out-of-plane cyclic loading” , Materials and Structures (2008) 41:143–157
- [7] T C. Triantafyllou, C G. Papanicolaou, “Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening materials of Concrete Structures”, Proceedings of the symposium “Keep Concrete Attractive”, 2005
- [8] T C. Triantafyllou, C G. Papanicolaou, P Zissimopoulos, T Laourdekis, “ Concrete Confinement with Textile-Reinforced Mortar Jackets”, ACI Structural Journal Title no.103-S04 (2006)
- [9] «Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας με Σύνθετα Υλικά», Α. Τριανταφύλλου, Πάτρα 2006
- [10] Δικτυακός Τόπος : [http://: eclass.upatras.gr](http://eclass.upatras.gr)
- [11] T. C. Triantafyllou, C G. Papanicolaou, “Shear strengthening of reinforced concrete members with textile reinforced mortar (TRM) jackets”, Materials and Structures (2006)

