

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΑΠΟ ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ (CFRP) ΚΑΙ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ (SRP)

Μιτολίδης Γιώργος

Πολιτικός Μηχανικός (MSc, DIC), Υπ. Διδάκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ

Σαλονικιός Θωμάς

Κύριος Ερευνητής, Ινστ. Τεχνικής Σεισμολογίας & Αντισεισμικών Κατασκευών (ITΣΑΚ)

Κάππος Ανδρέας

Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ

Λέξεις κλειδιά: Ινοπλισμένα Πολυμερή, Ανθρακοϋφάσματα (CFRP), Χαλυβδοϋφάσματα (SRP), Μηχανικά Χαρακτηριστικά, Πειραματικές Δοκιμές, Συνάφεια, Αριθμητικά Μοντέλα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Παρουσιάζονται πειραματικές δοκιμές για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών και των νόμων συνάφειας ινοπλισμένων πολυμερών από ίνες χάλυβα (SRP) και ίνες άνθρακα (CFRP). Για τις πειραματικές αυτές δοκιμές χρησιμοποιούνται διατάξεις από διεθνή πρότυπα. Για τις δοκιμές ελέγχου συνάφειας σχεδιάστηκε πρωτότυπη διάταξη εγκατάστασης δοκιμίου και καταγραφής της δύναμης συνάφειας και επιμήκυνσης σύνθετου υλικού στο πλαίσιο του παρόντος προγράμματος δοκιμών. Από τους ελέγχους συνάφειας προέκυψαν τα αντίστοιχα διαγράμματα δύναμης και τάσης συνάφειας – επιμήκυνσης σύνθετου υλικού στην περιοχή αγκύρωσης των CFRP και SRP σε πρισματικά δοκίμια σκυροδέματος. Οι παράμετροι που μεταβάλλονταν μεταξύ των δοκιμών ήταν το υλικό των ινοπλισμένων πολυμερών (ελάσματα άνθρακα και δύο τύποι χαλυβδοϋφασμάτων), το μήκος συνάφειας και το πλάτος συνάφειας. Τα αποτελέσματα των δοκιμών που εκτελέστηκαν, έδειξαν ότι τα SRP δεν παρουσιάζουν σημαντικό κλάδο ανελαστικής παραμόρφωσης. Επίσης βρέθηκε ότι τα CFRP παρουσίασαν μεγαλύτερη κατά μέσο όρο αντοχή έναντι αποκόλλησης από τα SRP, ενώ το πλάτος και όχι το μήκος αγκύρωσης του σύνθετου υλικού βρέθηκε να αποτελεί το βασικό κριτήριο της αύξησης της δύναμης αποκόλλησης. Επίσης τα ελάσματα άνθρακα (CFRP) έχουν μικρότερη επιμήκυνση αποκόλλησης απ' ό,τι τα ινοπλισμένα πολυμερή από ίνες χάλυβα (SRP).

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ινοπλισμένα πολυμερή εφαρμόζονται εκτενώς τα τελευταία χρόνια στην ενίσχυση και επισκευή δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Αυτό οφείλεται σε σημαντικό βαθμό στην ευκολία εφαρμογής τους σε σύγκριση με τις κλασσικές μεθόδους επισκευής και ενίσχυσης δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι προμηθεύτριες εταιρείες προτείνουν την χρήση των υλικών αυτών για την ενίσχυση κάθε μηχανισμού ανάληψης έντασης σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα και φέρουσα τοιχοποιία. Σε ερευνητικό πρόγραμμα που ολοκληρώθηκε προσφάτως Antoniadou et al (2003), (2006), (2007), βρέθηκε ότι είναι σημαντική η αποτελεσματικότητα των σύνθετων υλικών στην περίπτωση που ενισχύονται μηχανισμοί των οποίων η αστοχία είναι ανεπιθύμητη (λ.χ. μηχανισμοί διαγώνιας σύνθλιψης και διαγώνιου εφελκυσμού). Στην περίπτωση κατά την οποία ενισχύονται μηχανισμοί που ενδέχεται να παραμορφωθούν ανελαστικά, λ.χ. μηχανισμός κάμψης κατά τον σεισμό σχεδιασμού, βρέθηκε ότι δεν βελτιώνονται όλα τα μεγέθη ανελαστικής απόκρισης του ενισχυόμενου μηχανισμού. Αναφέρεται πως μέχρι την ανάπτυξη της μέγιστης αντοχής (μετά από ενίσχυση) τα μεγέθη ανελαστικής απόκρισης του ενισχυόμενου στοιχείου είναι βελτιωμένα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη από την δοκιμή του στοιχείου πριν την ενίσχυση. Ενδεικτικά αναφέρονται τα μεγέθη της δυσκαμψίας, της απορρόφησης ενέργειας και φυσικά της αντοχής. Μετά από την μέγιστη αντοχή και μέχρι το επίπεδο της αστοχίας τα μεγέθη ανελαστικής απόκρισης είναι δυσμενέστερα από τα αντίστοιχα μεγέθη που προσδιορίστηκαν κατά την πρώτη δοκιμή. Ενδεικτικά αναφέρονται τα μεγέθη της δυσκαμψίας, της απορρόφησης ενέργειας από το σημείο της μέγιστης αντοχής και έπειτα, της πλαστιμότητας μετατοπίσεων και η πολύ ψαθυρή (σχεδόν εκρηκτική) αστοχία. Τα δυσμενή αυτά χαρακτηριστικά αποδίδονται σε σημαντικό βαθμό στον γραμμικό ελαστικό νόμο τάσης παραμόρφωσης των ινοπλισμένων πολυμερών από άνθρακα, γυαλί και αραμίδιο όταν υπόκεινται σε εφελκυσμό. Τονίζεται ότι τα υλικά αυτά επιφέρουν ενίσχυση στα στοιχεία σκυροδέματος που εφαρμόζονται μέσω της καταπόνησής τους κυρίως σε εφελκυσμό. Τα τελευταία χρόνια δοκιμάζονται ως υλικό ενίσχυσης ινοπλισμένα πολυμερή από ίνες χάλυβα (Steel Reinforced Polymer, SRP). Από την ύπαρξη και μόνο του χάλυβα δημιουργείται η εντύπωση της ανελαστικής παραμόρφωσης του υλικού. Από δοκιμές που αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία και που εκτελέστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας βρέθηκε ότι η ικανότητα για ανελαστική παραμόρφωση του υλικού αυτού είναι σημαντικά περιορισμένη.

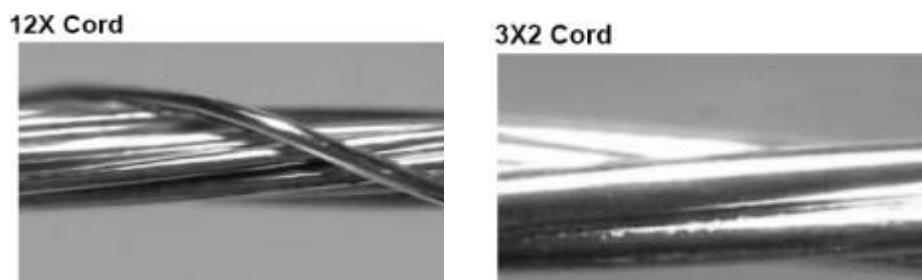
Στην παρούσα ερευνητική εργασία γίνονται συγκριτικές δοκιμές στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα ενισχυμένων με ανθρακοϋφάσματα και με χαλυβδοϋφάσματα. Οι δοκιμές χωρίζονται σε τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο προσδιορίζονται οι νόμοι τάσης – παραμόρφωσης των υλικών

ενίσχυσης που χρησιμοποιούνται. Στο δεύτερο στάδιο προσδιορίζονται οι νόμοι τάσης συνάφειας – επιμήκυνσης των υλικών ενίσχυσης με πρισματικά στοιχεία σκυροδέματος. Στο τρίτο στάδιο (Μιτολίδης κ.ά. 2006), γίνονται δοκιμές για τον προσδιορισμό του βαθμού καμπτικής και διατμητικής ενίσχυσης που επέρχεται με την χρήση των χαλυβδοϋφασμάτων και γίνονται συγκρίσεις με αντίστοιχες ενισχύσεις με την χρήση ανθρακούφασμάτων. Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα υλικά, αποτελέσματα δοκιμών και συγκρίσεις αριθμητικών προσομοιωμάτων της διεθνούς βιβλιογραφίας από τα πρώτα δύο στάδια του παρόντος ερευνητικού προγράμματος.

2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

2.1 Περιγραφή χαλυβδοϋφασμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται λεπτομερώς τα χαλυβδοϋφάσματα προκειμένου να γίνει κατανοητή η δομή τους. Αποτελούνται από δέσμες συρμάτων περιτυλιγμένων μεταξύ τους. Τα σύρματα αυτά συγκρατούνται το ένα δίπλα στο άλλο μέσω πλέγματος από υλικό πολύ μικρής αντοχής. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται οι δύο διαφορετικοί τύποι χαλυβδοϋφασμάτων οι οποίοι περιγράφονται παρακάτω και τα χαρακτηριστικά των υλικών που δίνονται από τον κατασκευαστή.



Εικόνα 1. Λεπτομέρειες των δύο τύπων χαλυβδοϋφασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν

2.1.1 SRP 3X2-23-12

Στο υλικό αυτό υπάρχουν δέσμες συρμάτων στις οποίες πλέκονται πέντε σύρματα διαμέτρου 0.35mm. Κάθε δέσμη συρμάτων έχει εμβαδό διατομής 0.481mm² και βρίσκονται σε διάταξη 9.0551 δεσμών ανά εκατοστόμετρο. Το πάχος του χαλυβδοϋφάσματος που διαμορφώνεται είναι 0.123cm. Το κενό μεταξύ των δεσμών των συρμάτων είναι 0.022cm, και ο όγκος τους είναι 35%. Ο όγκος της ρητίνης, όποτε χρησιμοποιείται, είναι 65% και η

απαιτήση είναι 0.764kg ρητίνης ανά τετραγωνικό μέτρο επιφανείας χαλυβδοϋφάσματος. Η εφελκυστική αντοχή του υλικού χωρίς την ρητίνη είναι 13,94kN/cm με μέτρο ελαστικότητας 160000MPa.

2.1.2 SRP 12X-23-12

Στο υλικό αυτό υπάρχουν δέσμες συρμάτων στις οποίες πλέκονται τρία σύρματα διαμέτρου 0.22mm, εννέα σύρματα διαμέτρου 0.20mm και εξωτερικά της δέσμης τυλίγεται σύρμα διαμέτρου 0.18mm. Κάθε δέσμη συρμάτων έχει εμβαδό διατομής 0.414mm² και βρίσκονται σε διάταξη 9.0551 δεσμών ανά εκατοστόμετρο. Το πάχος του χαλυβδοϋφάσματος που διαμορφώνεται είναι 0.123cm. Το κενό μεταξύ των δεσμών των συρμάτων είναι 0.022cm, και ο όγκος τους είναι 31%. Ο όγκος της ρητίνης, όποτε χρησιμοποιείται, είναι 69% και η απαίτηση είναι 0.821kg ρητίνης ανά τετραγωνικό μέτρο επιφανείας χαλυβδοϋφάσματος. Η εφελκυστική αντοχή του υλικού χωρίς την ρητίνη είναι 11,32kN/cm με μέτρο ελαστικότητας 138000MPa.

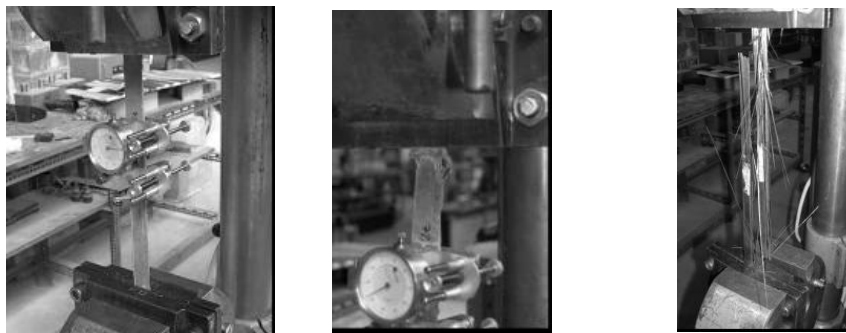
2.1.3 Σύνθετο υλικό

Στην περίπτωση κατά την οποία χρησιμοποιείται ρητίνη τα χαρακτηριστικά του σύνθετου υλικού όπως δίνονται από τον κατασκευαστή του χαλυβδοϋφάσματος είναι:

3X2-23, τάση 1171,1MPa, ενεργό μέτρο ελαστικότητας 77900MPa,
12X-23-12, τάση 951MPa, ενεργό μέτρο ελαστικότητας 67600MPa.

2.2 Δοκιμές εφελκυσμού και αποτελέσματα

Οι δύο παραπάνω τύποι χαλυβδοϋφασμάτων δοκιμάστηκαν σε αξονικό εφελκυσμό για τον προσδιορισμό των νόμων τάσης – παραμόρφωσης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών συγκρίθηκαν με τις τιμές του κατασκευαστή.



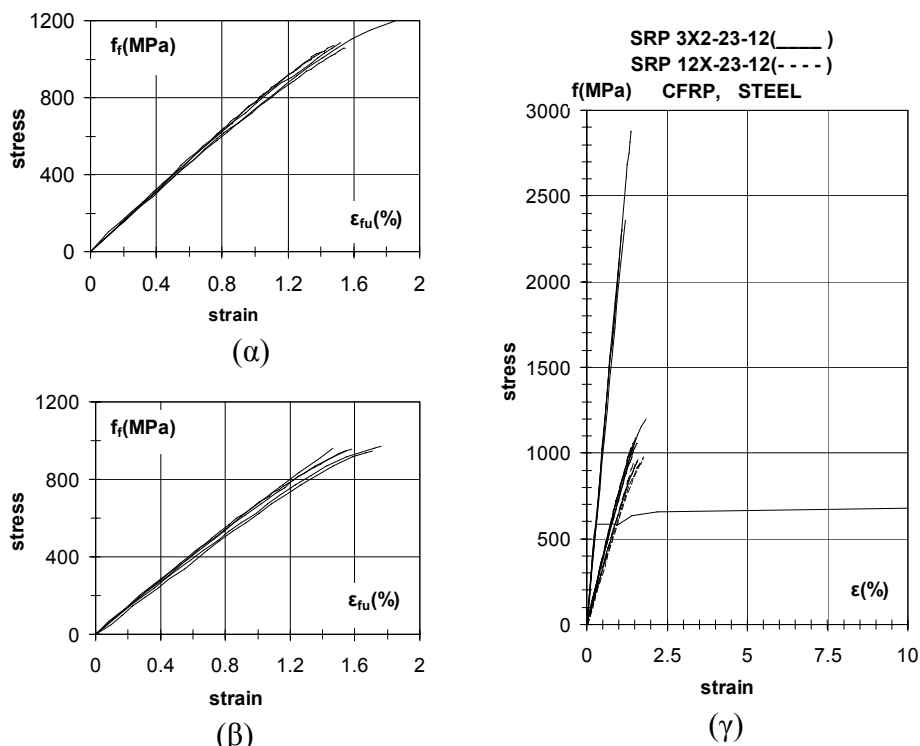
Εικόνα 2. Λεπτομέρειες από τις δοκιμές εφελκυσμού

Πίνακας 1. Τιμές ιδιοτήτων υλικών μετά τις δοκιμές

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΤΥΠΟΣ ΥΛΙΚΟΥ	ΔΙΑΤΟΜΗ	ΜΕΤΡΟ	ΤΑΣΗ	ΕΠΙΜΗΚΥΝΣ
		(mm)	ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ MPa	ΘΡΑΥΣΗΣ MPa	Η ΘΡΑΥΣΗΣ (%)
I11	SRP 3X2	16.6×1.23	75000	1200.8	1.85
I21	SRP 3X2	15.5×1.23	80100	1088.2	1.52
I12	SRP 3X2	28.7×1.23	79340	1069.2	1.48
I22	SRP 3X2	29.8×1.23	77280	1058.9	1.55
I13	SRP 3X2	49.6×1.23	80020	1035.2	1.41
I11	SRP 12X	16.6×1.23	62750	948.5	1.71
I21	SRP 12X	16.6×1.23	65160	972.5	1.76
I12	SRP 12X	28.5×1.23	67810	960.5	1.46
I22	SRP 12X	28.5×1.23	70130	948.4	1.55
I13	SRP 12X	48.0×1.23	70740	956.8	1.58
ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ	SRP 3X2		78348	1090.5	1.56
ΤΙΜΕΣ ΚΑΤΑΣΚ.	SRP 3X2		77900	1171.1	
ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ	SRP 12X		67318	957.3	1.61
ΤΙΜΕΣ ΚΑΤΑΣΚ.	SRP 12X		67600	951.0	

Στον πίνακα 1, δίνονται οι αριθμητικές τιμές των χαρακτηριστικών των υλικών που μετρήθηκαν για το κάθε δοκίμιο χωριστά καθώς και οι μέσες τιμές των μεγεθών αυτών. Επίσης γίνεται συγκριτική παράθεση των αντίστοιχων τιμών που δίνει ο κατασκευαστής για τα υλικά αυτά. Η σύμπτωση μεταξύ των ιδιοτήτων των δοκιμίων που μετρήθηκαν και του κατασκευαστή κρίνεται ως ικανοποιητική. Τονίζεται ότι η τάση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν υπολογίστηκε για το εμβαδό του τελικού προϊόντος με την ρητίνη (laminate).

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης από τις δοκιμές εφελκυσμού των υλικών. Σε συγκριτικό διάγραμμα παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες για ελάσματα άνθρακα και για τον χάλυβα ράβδων οπλισμού.



Εικόνα 3. Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για: α)SRP 3X2-23-12, β)SRP 12X-23-12 και γ) SRP, CFRP και χάλυβα οπλισμών.

Από τα διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ανελαστική επιμήκυνση των χαλυβδούφασμάτων είναι μικρή. Γίνονται αντιληπτές οι διαφορές των ιδιοτήτων των δύο τύπων χαλυβδούφασμάτων τόσο μεταξύ τους όσο και σε σχέση με τον χάλυβα των οπλισμών και με τα ελάσματα άνθρακα.

3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ

Για την καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού βάσει του οποίου επιτυγχάνεται η ενίσχυση δομικών στοιχείων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα, με την χρήση εξωτερικά εφαρμοζόμενων σύνθετων υλικών, εκτός από τον προσδιορισμό των νόμων τάσης – παραμόρφωσης που διέπουν τα υλικά αυτά απαιτείται και ο προσδιορισμός των νόμων που σχετίζονται με την συνεργασία τους με το σκυρόδεμα. Ακολούθως παρουσιάζονται αποτελέσματα από την δεύτερη φάση του παρόντος ερευνητικού προγράμματος. Ειδικότερα, γίνονται δοκιμές ελέγχου της συνάφειας χαλυβδούφασμάτων με πρισματικά δοκίμια σκυροδέματος. Για λόγους

σύγκρισης δοκιμάζεται επίσης η συνάφεια ελασμάτων άνθρακα με όμοια πρισματικά δοκίμια σκυροδέματος. Εκτός από την δύναμη συνάφειας καταγράφεται και η συνολική ολίσθηση στα άκρα του υλικού ενίσχυσης. Τα μεγέθη αντοχής που καταγράφονται συγκρίνονται με αντίστοιχα μεγέθη τα οποία υπολογίζονται βάσει σχέσεων της διεθνούς βιβλιογραφίας. Οι κυριότερες παράμετροι που μεταβάλλονταν στα δοκίμια που ελέγχθηκαν ήταν το μήκος επικόλλησης του υλικού ενίσχυσης (150mm and 300mm), το πλάτος του υλικού ενίσχυσης (50mm and 80mm), ο τύπος του υλικού ενίσχυσης (ελάσματα CFRP and SRP) και η ποιότητα σκυροδέματος των πρισματικών στοιχείων. Η ποιότητα σκυροδέματος επιλέχθηκε ως παράμετρος προς διερεύνηση καθώς σε ορισμένα προτεινόμενα μοντέλα για τον υπολογισμό της δύναμης συνάφειας δεν χρησιμοποιείται όρος ο οποίος να λαμβάνει υπόψη την ποιότητα σκυροδέματος. Στις ενότητες που ακολουθούν δίνονται πίνακες, διαγράμματα και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις πειραματικές δοκιμές συνάφειας που έγιναν και από την σύγκριση των τιμών αυτών με τις σχέσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας που αναφέρονται.

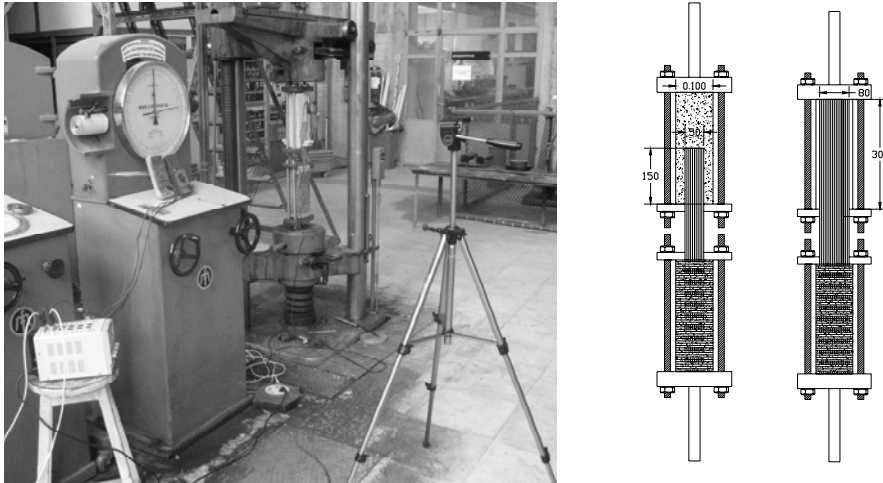
3.1 Ποιότητες υλικών

Για τις δοκιμές συνάφειας χρησιμοποιήθηκαν οι δύο τύποι χαλυβδοϋφασμάτων που δοκιμάστηκαν στα προηγούμενα πειράματα εφελκυσμού και ελάσματα άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας 160000MPa. Οι δύο ποιότητες σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκαν κατασκευάστηκαν βάσει της λογικής ότι για τα πολυώροφα κτίρια που κατασκευάζονταν πριν 30-40 έτη χρησιμοποιούνταν ποιότητα σκυροδέματος B225, ενώ στην γεφυροποιία χρησιμοποιούνταν ποιότητα σκυροδέματος B450. Το σκυρόδεμα, κανονικής αντοχής, που παράχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας είχε μέση κυλινδρική θλιπτική αντοχή 21.98MPa και εφελκυστική αντοχή 2.42MPa. Το σκυρόδεμα υψηλότερης αντοχής είχε μέση κυλινδρική θλιπτική αντοχή 38.5MPa και εφελκυστική αντοχή 3.5MPa. Το μέτρο ελαστικότητας για τις δύο παραπάνω ποιότητες σκυροδέματος λήφθηκε 29GPa και 33.7GPa, αντίστοιχα.

3.2 Πειραματικές δοκιμές συνάφειας

Για τους ελέγχους συνάφειας δοκιμάστηκαν συνολικά 16 δοκίμια από σκυρόδεμα. Στα πρισματικά αυτά δοκίμια έγινε επεξεργασία της επιφάνειας και κολλήθηκαν με ρητίνη τεμάχια χαλυβδοϋφάσματος και ελασμάτων άνθρακα. Στο ένα άκρο τα υλικά που εφαρμόστηκαν περιτυλίχθηκαν με δύο στρώσεις ανθρακοϋφάσματος προκειμένου να εξασφαλισθεί ότι θα αστοχήσει το άλλο άκρο του δοκιμίου στο οποίο είχαν τοποθετηθεί οι μετρητές των επιμηκύνσεων (LVDT). Η καταγραφή των επιμηκύνσεων γινόταν με κινηματογράφηση των ενδείξεων των βολτόμετρων που ήταν συνδεδεμένα με αυτά τα όργανα. Στο ίδιο πλάνο κινηματογραφούνταν οι

ενδείξεις της δύναμης. Από τις ενδείξεις των οργάνων έγιναν τα διαγράμματα δύναμης – επιμήκυνσης για όλα τα δοκίμια. Η πειραματική διάταξη και τα σχήματα δύο δοκιμίων παρουσιάζονται στην εικόνα 4.



Εικόνα 4. Γενική άποψη πειραματικής διάταξης δοκιμών συνάφειας και σκαριφήματα αντιπροσωπευτικών δοκιμίων

Στον πίνακα 2 περιγράφονται τα δοκίμια που ελέγχθηκαν, και παρουσιάζονται τα κυριότερα αποτελέσματα. Για τις παραμέτρους που μεταβάλλονταν στα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε δοκιμές συνάφειας (direct shear tests) προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα από την επεξεργασία των μετρήσεων. Σε όλες τις δοκιμές προέκυψε σαφής ανελαστικός κλάδος (με σχεδόν σταθερή τη δύναμη) κατά την αστοχία του μηχανισμού συνάφειας.

Τύπος υλικού: Τα CFRP επέδειξαν μεγαλύτερη κατά μέσο όρο αντοχή έναντι αποκόλλησης από τα SRP. Ειδικότερα η μέση δύναμη αποκόλλησης για τα CFRP ήταν 37.45kN έναντι 27.7 kN για τα SRP12 και 29.0kN για τα SRP3X2. Η μέση δύναμη αποκόλλησης για τα SRP συνολικά ήταν 28.35 kN, δηλαδή περίπου το 75% της δύναμης αποκόλλησης των CFRP.

Πλάτος σύνθετου υλικού: Το πλάτος του σύνθετου υλικού βρέθηκε να επηρεάζει σαφώς την δύναμη αποκόλλησης. Για τα δοκίμια με πλάτος σύνθετου υλικού 80mm η μέση δύναμη αποκόλλησης μετρήθηκε 41.13kN ενώ για τα δοκίμια με πλάτος σύνθετου υλικού 50mm η μέση δύναμη αποκόλλησης μετρήθηκε 28.35kN (SRP12 27.7kN, SRP3X2 29.0kN).

Μήκος σύνθετου υλικού: Το διαφορετικό μήκος του σύνθετου υλικού (300mm και 150mm) δεν βρέθηκε να επηρεάζει σημαντικά την δύναμη αποκόλλησης. Για τα δοκίμια με μήκος σύνθετου υλικού 300mm η μέση δύναμη αποκόλλησης μετρήθηκε 34.38kN ενώ για τα δοκίμια με μήκος σύνθετου υλικού 150mm η μέση δύναμη αποκόλλησης μετρήθηκε 33.26kN.

Αυτό δείχνει πως για κάθε περίπτωση σύνθετου υλικού που χρησιμοποιήθηκε το ενεργό μήκος αγκύρωσης ήταν κάτω από 150mm, τιμή η οποία είναι σύμφωνη με την διεθνή βιβλιογραφία.

Επιμήκυνση αποκόλλησης: Για τους τρεις τύπους σύνθετων υλικών που δοκιμάστηκαν προέκυψαν σαφείς διαφορές στην επιμήκυνση αστοχίας. Για τα CFRP η μέση επιμήκυνση αστοχίας ήταν 0.52mm, για τα SRP12 η μέση επιμήκυνση αστοχίας ήταν 0.95mm και για τα SRP3X2 η αντίστοιχη τιμή ήταν 0.71mm. Αυτές οι διαφορές αιτιολογούνται από τις διαφορές στο μέτρο ελαστικότητας των CFRP και SRP12, SRP3X2 οι οποίες μετρήθηκαν και δόθηκαν πιο πάνω.

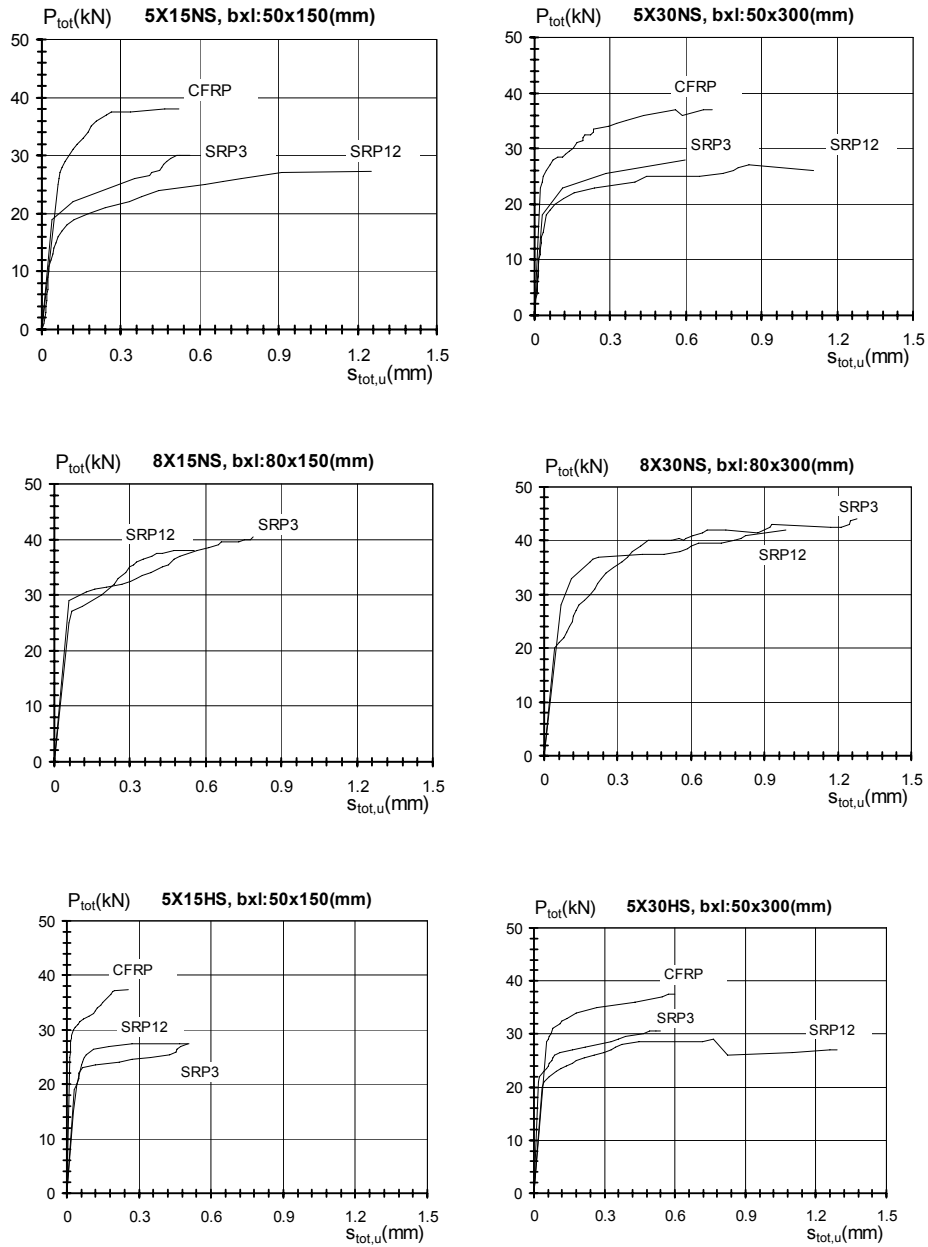
Πίνακας 2. Αποτελέσματα ελέγχων συνάφειας.

Δοκίμιο	f_{cm}/f_{ctm}	$L \times b_f$	Τύπος Υλικού	$0.5P_{tot}$	$S_{tot}/S_{tot,u}$
	MPa	mm × mm		kN	mm
CFRP-5X15NS	22.0/2.4	50×150	CFRP	19.0	0.38/0.52
CFRP-5X30NS	22.0/2.4	50×300	CFRP	18.5	0.50/0.70
SRP12-5X15NS	22.0/2.4	50×150	SRP12X	13.7	1.09/1.25
SRP12-5X30NS	22.0/2.4	50×300	SRP12X	13.5	0.55/1.11
SRP12-8X15NS	22.0/2.4	80×150	SRP12X	19.0	0.55/ ---
SRP12-8X30NS	22.0/2.4	80×300	SRP12X	21.0	0.58/0.99
SRP3X2-5X15NS	22.0/2.4	50×150	SRP3X2	15.0	0.45/0.56
SRP3X2-5X30NS	22.0/2.4	50×300	SRP3X2	14.0	--- /0.60
SRP3X2-8X15NS	22.0/2.4	80×150	SRP3X2	20.3	0.37/0.79
SRP3X2-8X30NS	22.0/2.4	80×300	SRP3X2	22.0	1.29/1.28
CFRP-5X15HS	38.5/3.5	50×150	CFRP	18.7	0.21/0.25
CFRP-5X30HS	38.5/3.5	50×300	CFRP	18.8	0.23/0.60
SRP12-5X15HS	38.5/3.5	50×150	SRP12X	13.8	0.23/0.51
SRP12-5X30HS	38.5/3.5	50×300	SRP12X	14.5	0.51/1.29
SRP3X2-5X15HS	38.5/3.5	50×150	SRP3X2	13.8	--- / 0.50
SRP3X2-5X30HS	38.5/3.5	50×300	SRP3X2	15.3	0.28/0.54

S_{tot} : Συνολική ολίσθηση υλικού. $S_{tot,u}$: Συνολική ολίσθηση αστοχίας υλικού.

Ποιότητα σκυροδέματος: Σύμφωνα με τα ισχύοντα αναλυτικά μοντέλα η αύξηση της αντοχής σε συνάφεια δεν είναι ανάλογη της αύξησης της αντοχής της ποιότητας σκυροδέματος. Η συσχέτιση αυτή πρέπει να γίνεται με την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος και ιδιαίτερα με την

επιφανειακή εφελκυστική αντοχή. Επίσης σε ορισμένα αναλυτικά μοντέλα δεν χρησιμοποιείται ως παράμετρος η αντοχή του σκυροδέματος.



Εικόνα 5. Διαγράμματα συνολικής δύναμης συνάφειας – συνολικής μετατόπισης

Δεδομένου ότι οι μέγιστες αντοχές που επέδειξαν τα δοκίμια για το σκυρόδεμα κανονικής αντοχής προσεγγίζονται ικανοποιητικά από τα αναλυτικά προσομοιώματα της διεθνούς βιβλιογραφίας, επιχειρείται ο υπολογισμός της αντοχής σε συνάφεια για τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν με σκυρόδεμα υψηλής αντοχής.

Στην Εικόνα 5 δίνονται τα διαγράμματα συνολικής δύναμης (P_{tot}) – συνολικής μετατόπισης αστοχίας ($s_{tot,u}$) για τα δοκίμια που δοκιμάστηκαν. Γίνεται κατάλληλη ομαδοποίηση ως προς το γινόμενο του πλάτους με το μήκος του σύνθετου υλικού. Τονίζεται ότι στα παραπάνω διαγράμματα η αντοχή της συνάφειας εκφράζεται με δύναμη και όχι με κάποια ισοδύναμη τάση συνάφειας “ $P/(L_e \cdot b_f)$ ” επειδή δεν υπάρχει μία κοινά αποδεκτή μέθοδος για τον καθορισμό του ενεργού μήκους “ L_e ” και το μήκος αυτό ορίζεται διαφορετικά σε κάθε αναλυτικό μοντέλο. Επίσης έχει βρεθεί ότι η αύξηση της αντοχής δεν είναι απευθείας ανάλογη της αύξησης του πλάτους του ινοπλισμένου πολυμερούς. Για τους παραπάνω λόγους δεν ανάγεται η δύναμη συνάφειας σε ισοδύναμη τάση συνάφειας καθώς τα διαγράμματα που θα προέκυπταν σε αυτή την περίπτωση δεν θα ήταν άμεσα συγκρίσιμα μεταξύ τους.

4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ

4.1 Παρουσίαση των θεωρούμενων προσομοιωμάτων

Τα μοντέλα που παρουσιάζονται παρακάτω διερευνήθηκαν από τους Toutanji et al. (2007) για τον υπολογισμό της δύναμης συνάφειας. Στην παρούσα εργασία τα μοντέλα αυτά λήφθηκαν από την εργασία αυτή.

Chen and Teng (2001)

$$P_u = 0.427 \beta_p \beta_L \sqrt{f'_c} b_f L_e \quad (1)$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f'_c}}}, \beta_p = \sqrt{\frac{2 - b_f/b_c}{1 + b_f/b_c}}, \beta_L = 1 \text{ if } L \geq L_e, \beta_L = \sin \frac{\pi L}{2L_e} \text{ if } L < L_e \quad (2)$$

Neubauer and Rostasy (1999), από Τριανταφύλλου (2003)

$$P_u = 0.64 k_f b_f \sqrt{E_f t_f f_{ctm}} \text{ if } L \geq L_e \quad (3)$$

$$P_u = 0.64 k_f b_f \sqrt{E_f t_f f_{ctm}} \frac{L}{L_e} \left(2 - \frac{L}{L_e} \right) \text{ if } L < L_e \quad (4)$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2f_{ctm}}}, k_f = \sqrt{\frac{1.125 \left(2 - \frac{b_f}{b_c}\right)}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1 \quad (5)$$

Yang et al. (2001), από Toutanji et al. (2007)

$$P_u = \left(0.5 + 0.08 \sqrt{\frac{E_f t_f}{100f_{ctm}}}\right) L_e b_f (0.5f_{ctm}), L_e=100\text{mm} \quad (6)$$

Yuan and Wu (1999), από Toutanji et al. (2007)

$$P_u = \sqrt{\frac{2E_f t_f G_f}{1 + \alpha_Y}} \cdot b_f, \quad \alpha_Y = \frac{b_f E_f t_f}{b_c E_c t_c} \quad (7)$$

4.2 Αριθμητικές συγκρίσεις

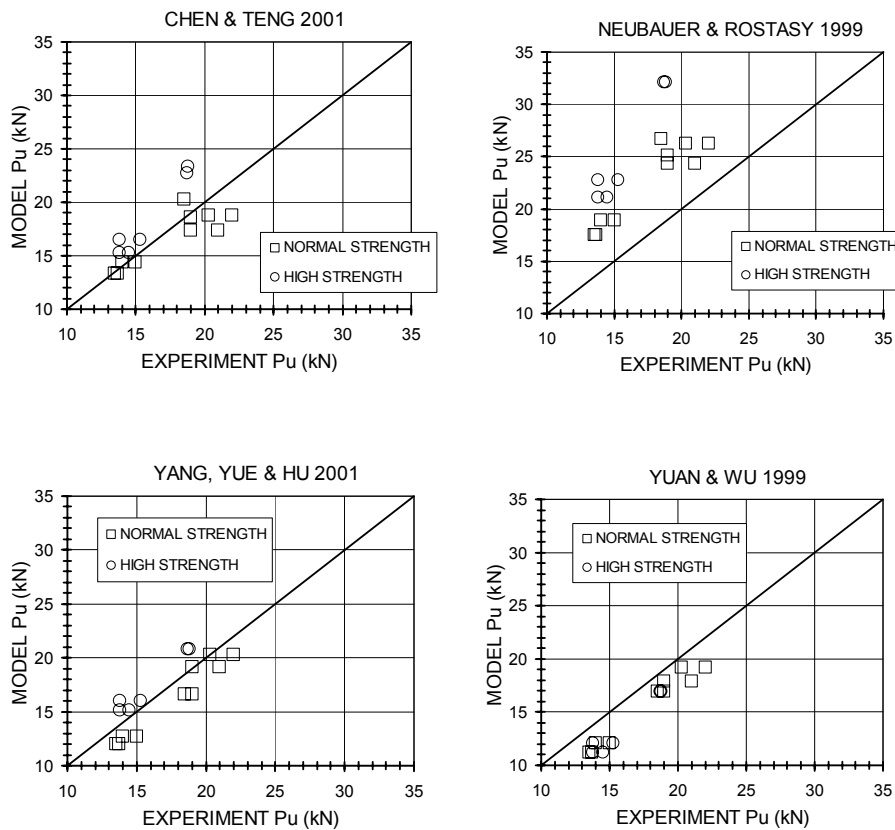
Για τα τέσσερα επιλεγμένα μοντέλα γίνεται ο υπολογισμός της αντοχής συνάφειας των δοκιμίων της παρούσας εργασίας, και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 3. Αντοχές συνάφειας όπως προέκυψαν από τα θεωρούμενα προσομοιώματα (εξισώσεις 1 – 7) και από τις δοκιμές.

SPECIMEN	P_u (1)	P_u (3,4)	P_u (6)	P_u (7)	$0.5P_{tot,experiment}$
	(kN)				
CFRP-5X15NS	18.6	25.1	16.7	16.9	19.0
CFRP-5X30NS	20.3	26.7	16.7	16.9	18.5
SRP12-5X15NS	13.3	17.5	12.0	11.2	13.7
SRP12-5X30NS	13.3	17.5	12.0	11.2	13.5
SRP12-8X15NS	17.4	24.3	19.2	17.9	19.0
SRP12-8X30NS	17.4	24.3	19.2	17.9	21.0
SRP3X2-5X15NS	14.4	18.9	12.7	12.1	15.0
SRP3X2-5X30NS	14.4	18.9	12.7	12.1	14.0
SRP3X2-8X15NS	18.7	26.2	20.3	19.2	20.3
SRP3X2-8X30NS	18.7	26.2	20.3	19.2	22.0
CFRP-5X15HS	22.7	32.1	20.8	16.9	18.7

CFRP-5X30HS	23.3	32.1	20.8	16.9	18.8
SRP12-5X15HS	15.3	21.1	15.1	11.2	13.8
SRP12-5X30HS	15.3	21.1	15.1	11.2	14.5
SRP3X2-5X15HS	16.5	22.8	16.0	12.1	13.8
SRP3X2-5X30HS	16.5	22.8	16.0	12.1	15.3

Ακολούθως δίνονται σε συγκριτικά διαγράμματα οι τιμές του πίνακα 3. Όπως προκύπτει από τον πίνακα 3 και την Εικόνα 6, τα μοντέλα που προτείνονται από τους Chen και Teng (2001) και από τους Yang et al. 2001, δίνουν την καλύτερη προσέγγιση για όλους τους τύπους των σύνθετων υλικών που δοκιμάστηκαν.



Εικόνα 6. Σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τις αντοχές σε συνάφεια των θεωρούμενων αναλυτικών προσομοιωμάτων.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ακολούθως παρουσιάζονται κάποια συμπεράσματα που προέκυψαν από τις πρώτες δοκιμές των υλικών αυτών. Κατά την δοκιμή εφελκυσμού των CFRP και SRP πρέπει το πλάτος των δοκιμίων να είναι σημαντικά μικρότερο από το μήκος τους. Με τον τρόπο αυτόν η αγκύρωση του υλικού είναι πιο αποτελεσματική και μειώνονται τα σφάλματα λόγω αθέλητων εκκεντροτήτων. Πριν τις δοκιμές εφελκυσμού απαιτείται κατάλληλη προεργασία των ελασμάτων προκειμένου να λειανθούν υπάρχουσες ανωμαλίες της ρητίνης, μέτρηση της κατακορυφότητας των ακμών των δοκιμίων και έλεγχος του άξονα του δοκιμίου σε σχέση με τον άξονα της διάταξης εφελκυσμού. Και για τους δύο τύπους χαλυβδοϋφασμάτων που δοκιμάστηκαν τα δοκίμια με ρητίνη παρουσιάζουν κατά μέσον όρο 25% αύξηση αντοχής σε σχέση με τα δοκίμια χωρίς ρητίνη. Αυτό αποδίδεται στην ανακατανομή της έντασης που επέρχεται στη διατομή του υλικού αυτού μέσω της ρητίνης. Η αναγωγή έγινε, και στις δύο περιπτώσεις, στις διαστάσεις του ελάσματος με ρητίνη. Τα ελάσματα των χαλυβδοϋφασμάτων έχουν σημαντικά χαμηλότερη τάση αστοχίας από τα ελάσματα των ανθρακούφασμάτων και σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα των οπλισμών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της αναπτυσσόμενης τάσης στην διεπιφάνεια υλικού - σκυροδέματος και την απαίτηση για μικρότερα μήκη αγκύρωσης. Το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης των χαλυβδοϋφασμάτων παρουσιάζει μικρό κλάδο ανελαστικής παραμόρφωσης. Ο αντίστοιχος κλάδος των CFRPs που είναι ευθύγραμμος. Η επιμήκυνση θραύσης των SRP and CFRPs βρέθηκε να έχει παρόμοιες τιμές, ενώ το μέτρο ελαστικότητας είναι σημαντικά μεγαλύτερο για τα ελάσματα CFRP. Το χαλυβδοϋφασμα τύπου 3X2 έχει μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας και τάση θραύσης από το χαλυβδοϋφασμα τύπου 12X.

Από τις δοκιμές ελέγχου συνάφειας προέκυψε ότι τα CFRP επέδειξαν μεγαλύτερη κατά μέσο όρο αντοχή έναντι αποκόλλησης από τα SRP. Αυτό οφείλεται στο σημαντικά υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας των ελασμάτων άνθρακα έναντι των χαλυβδοϋφασμάτων. Το πλάτος του σύνθετου υλικού βρέθηκε να επηρεάζει σαφώς την δύναμη αποκόλλησης. Το διαφορετικό μήκος του σύνθετου υλικού, πέρα από το ενεργό μήκος επικόλλησης (300mm και 150mm) δεν βρέθηκε να επηρεάζει την δύναμη αποκόλλησης. Για τους τρεις τύπους σύνθετων υλικών που δοκιμάστηκαν προέκυψαν σαφείς διαφορές στην επιμήκυνση για την οποία επήλθε η αποκόλληση αστοχίας λόγω του διαφορετικού μέτρου ελαστικότητας. Κατά την αναλυτική αποτίμηση των δυνάμεων συνάφειας, καλύτερη προσέγγιση για όλες τις δοκιμές που έγιναν επιτεύχθηκε με τα προσομοιώματα των Chen and Teng (2001) και των Yang et al (2001). Για τις δύο ποιότητες σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε ή αύξηση της θλιπτικής αντοχής ήταν 75%, η αύξηση της εφελκυστικής αντοχής ήταν 45% και η αύξηση της αντοχής της συνάφειας, όπως προέκυψε από τις εξισώσεις (1) και (6), ήταν

περίπου 20%. Στις πειραματικές δοκιμές διαπιστώθηκε μικρή αύξηση 5%, η οποία οφείλεται στην χρήση μη κατάλληλου τρόπου αφαίρεσης της τσιμεντοεπιδερμίδας (μέθοδος τριβείου).

ΣΗΜΕΙΩΣΗ

Τα παρακάτω σύμβολα χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή:

b_c	=	πλάτος του πρίσματος σκυροδέματος
b_f	=	πλάτος του ινοπλισμένου πολυμερούς
E_c	=	μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος
E_f	=	μέτρο ελαστικότητας του ινοπλισμένου πολυμερούς
f'_c	=	θλιπτική αντοχή σκυροδέματος
f_{cm}	=	Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (κύλινδρος 30×15εκ.)
f_{ctm}	=	εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος
G_f	=	ενέργεια θραύσης ανά μονάδα επιφανείας
k_f	=	συντελεστής γεωμετρίας
L	=	μήκος αγκύρωσης
L_e	=	ενεργό μήκος αγκύρωσης
P_u	=	δύναμη συνάφειας
t_c	=	πάχος του πρίσματος σκυροδέματος
t_f	=	πάχος του ινοπλισμένου πολυμερούς
β_L, β_l	=	συντελεστές του μήκους αγκύρωσης
β_p, β_w	=	συντελεστές πλάτους

6 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα δύο πρώτα μέρη ερευνητικού προγράμματος τριών φάσεων. Το ερευνητικό αυτό πρόγραμμα συγχρηματοδοτείται κατά 67.5% από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο, κατά 22.5% από την Γ.Γ.Ε.Τ. στο πλαίσιο του Μέτρου 8.3 του Ε.Π.ΑΝ.- Γ' Κ.Π.Σ. και κατά 10% από την εταιρεία Sika – Hellas. Η ερευνητική ομάδα εκφράζει τις ευχαριστίες της στους παραπάνω φορείς.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Antoniades, K., Salonikios, T., Kappos, A., “Cyclic tests on seismically damaged R/C walls strengthened using FRP reinforcement”, ACI Structural Journal, Vol.100, No. 4 (2003) 510 – 518.

Antoniades, K., Salonikios, T., Kappos, A., “Tests on Seismically Damaged R/C Walls Repaired and Strengthened Using Fiber-Reinforced Polymers” *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol 9, No 3 (2005) 236 – 246.

Antoniades, K., Salonikios, T., Kappos, A., “Evaluation of Hysteretic Response and Strength of Repaired R/C Walls Strengthened with FRPs”, *Engineering Structures Journal*, Vol 29, No 9 (2007) 2158-2171.

Chen, J. F., and Teng, J. G., “Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete”. *Journal of structural engineering*, ASCE, Vol 127, No 7, (2001) 784-791.

Toutanji, H., Saxena, P., Zhao, L., Ooi, T. “Prediction of Interfacial Bond Failure of FRP – Concrete Surface”. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol 11, No4 (2007) 427-436.

Μιτολίδης, Γ., Σαλονικίος, Θ., Κάππος, Α., “Μηχανικά Χαρακτηριστικά Ανθρακούφασμάτων (CFRP) και Χαλυβδοϋφασμάτων (SRP) και Διερεύνηση της Εφαρμογής του στην Ενίσχυση Δοκών Οπλισμένου Σκυροδέματος”, πρακτικά 15^{ου} Συνέδριου Σκυροδέματος, (Αλεξανδρούπολη, 25 – 27 Οκτωβρίου, 2006), Τόμος Γ, 347 – 359.

Τριανταφύλλου, Α., “Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά”, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα (2003), 26-27.