

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΡΑΒΔΩΝ ΑΠΟ ΙΝΕΣ ΥΑΛΟΥ ΚΑΙ ΡΗΤΙΝΗΣ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Hamid Abassi

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Queen Mary, University of London, Materials Department

Δημήτριος Τζέτζης

Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός, Queen Mary, University of London, Materials Department

Κυριάκος Μπερκέτης

Δρ. Μηχανικός Τεχνολογίας Υλικών, SpectrumLabs S.A

Paul Hogg

Δρ. Μηχανικός Τεχνολογίας Υλικών Queen Mary, University of London, Materials Department

Λέξεις κλειδιά: Σύνθετα Υλικά, Ράβδοι FRP, Οπλισμένο Σκυρόδεμα, Πειράματα Εξόλκευσης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η παρούσα εργασία μελετά τη μηχανική συμπεριφορά και συνάφεια με το σκυρόδεμα ράβδων από σύνθετα υλικά (Fibre Reinforced Polymers, FRP) σε επιταχυνόμενες καταστάσεις περιβαλλοντικής έκθεσης και υψηλών θερμοκρασιών. Εξετάζεται αρχικά η επίδραση του νερού και αλκαλικού διαλύματος θερμοκρασίας 15-20°C στη συνάφεια, με δοκιμές εξόλκευσης για τρεις διαφορετικές χρονικές περιόδους (30, 120 και 240 ημερών) σε μια σειρά θερμοκρασιών (20-120°C). Μετέπειτα μελετάται η εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας τριών τύπων ράβδων FRP βυθισμένων σε αλκαλικό διάλυμα θερμοκρασίας 60°C για τις ίδιες χρονικές περιόδους. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η συνάφεια δεν επηρεάζεται από το περιβάλλον σε αντίθεση με τη ίδια την ράβδο η οποία καταπονείται σημαντικά. Και στις δυο περιπτώσεις η θερμοκρασία δοκιμών επιφέρει σημαντική μείωση στις ιδιότητες που εξετάζονται. Η φύση της πολυμερούς μήτρας καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το μέγεθος και το ποσοστό καταπόνησης των ράβδων ενώ ο μηχανισμός καταπόνησης φαίνεται να είναι συνδεδεμένος με την μεταφορά τάσης μεταξύ ινών και μήτρας μέσα στο ίδιο το σύνθετο υλικό.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια σημαντική πρόκληση που αντιμετωπίζει ο κατασκευαστικός τομέας σήμερα είναι η γήρανση των υποδομών λόγω της διάβρωσης του χάλυβα ενίσχυσης. Ο μηχανισμός γήρανσης των δομικών στοιχείων οφείλεται στη μεταφορά υγρασίας και επιβλαβών χημικών ουσιών στον χάλυβα μέσω του σκυροδέματος. Μεταξύ των υλικών που έχουν αναπτυχθεί για να αντισταθούν στην διάβρωση είναι τα ενισχυμένα με ίνες υάλου πολυμερή (FRP) υλικά [Lees J.M., 2001]. Η χρήση σύνθετων υλικών υπό τη μορφή ράβδων ενίσχυσης σκυροδέματος ως εναλλακτική λύση του παραδοσιακού χάλυβα ενίσχυσης έχει πολλά πλεονεκτήματα όπως για παράδειγμα το ότι το υλικό έχει μεγάλη εφελκυστική αντοχή, είναι σχετικά ελαφρύ και αντιδιαβρωτικό [Hamilton H.R., 2000].

Υπάρχει ωστόσο ανάγκη δημιουργίας και αξιολόγησης πειραματικών δεδομένων από την επιστημονική κοινότητα και γενικότερα τον κατασκευαστικό κλάδο όσον αφορά τη δομική συμπεριφορά των ράβδων FRP. Σημαντική είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς των ράβδων FRP κατόπιν έκθεσης σε αλκαλικό περιβάλλον. Το υψηλό pH του διαλύματος που δημιουργείται κατά τη διάρκεια της ενυδάτωσης του σκυροδέματος μπορεί να προκαλέσει χημική επίθεση κατά των ινών με αποτέλεσμα την εξασθένηση τους [Micelli F., 2004]. Επίσης σημαντική θεωρείται η συνάφεια μεταξύ FRP ράβδων και σκυροδέματος, η οποία διαφέρει ποιοτικά και ποσοτικά από αυτή μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος [Takewaka K., 1996]. Η συνάφεια αποτελεί ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν την συμπεριφορά των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μελετήσει τις καταστάσεις των φαινομένων που αναφέρθηκαν. Μηχανικές ιδιότητες όπως το μέτρο ελαστικότητας και η εφελκυστική αντοχή των ράβδων εξετάζονται καθώς και οι δύο θεωρούνται καθοριστικής σημασίας στη δομική ακεραιότητα του οπλισμένου σκυροδέματος. Επιπλέον η συνάφεια μεταξύ των ράβδων και κύβων σκυροδέματος αξιολογείται μέσω πειραμάτων εξόλκευσης σε κύβους ακμής 100mm μετά από μακροπρόθεσμη έκθεση σε νερό καθώς και σε αλκαλικό περιβάλλον. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιούνται σε θερμοκρασίες 20 με 120°C.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

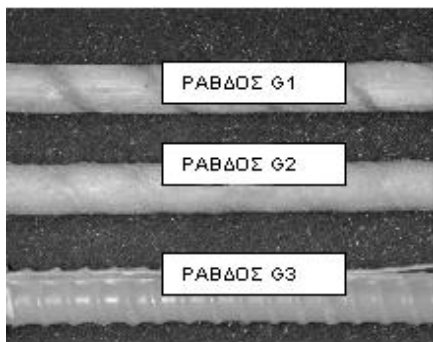
2.1 Υλικά

Στη παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τρία είδη ράβδων FRP με τους κωδικούς G1, G2 και G3 όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Οι ράβδοι τύπου G1

και G2 προμηθεύτηκαν από την εταιρεία Hughes Brothers, Inc. ενώ οι ράβδοι τύπου G3 από την εταιρεία Marshall Industries Composites, Inc. Οι ράβδοι τύπου G1 αποτελούνται από πυρήνα μονοκατευθυντικών ινών γυαλιού (E-glass) με ελικοειδή περιέλιξη, πολυμερή μήτρα από πολυεστέρα και εξωτερική κοκκώδη επικάλυψη.

Οι ράβδοι τύπου G2 έχουν ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά με μόνη διαφορά την πολυμερή μήτρα η οποία είναι βινυλεστέρας. Οι ράβδοι G3 αποτελούνται από μονοκατευθυντικές ίνες γυαλιού (E-glass) και βινυλεστέρα. Επίσης κεραμικές ίνες σε σπειροειδή μορφή είναι τοποθετημένες στην εξωτερική επιφάνεια των ράβδων G3. Σε όλες τις ράβδους οι αναλογία όγκου ινών και ρητίνης είναι 60% προς 40% αντίστοιχα.

Για την κατασκευή των δοκιμών εξόλκευσης χρησιμοποιήθηκαν 372kg τσιμέντου Πόρτλαντ (OPC). Ως αδρανή χρησιμοποιήθηκε άμμος λατομείου (542kg) γνωστής κοκκομετρικής διαβάθμισης $250\mu\text{m} < d < 4\text{mm}$ καθώς και 1333kg χαλίκι 10mm. Ως νερό ανάμιξης (160lt) χρησιμοποιήθηκε νερό από το δίκτυο ύδρευσης του Λονδίνου στη Μ. Βρετανία. Αυτές οι αναλογίες ισοδυναμούν με θλιπτική αντοχή κύβου της τάξεως των 40MPa έπειτα από 28 μέρες.



Εικόνα 1. Οι τύποι ράβδων από σύνθετα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν

2.2 Πειραματικές Μέθοδοι

Δοκιμές εξόλκευσης εκτελέστηκαν προκειμένου να μετρηθεί η συνάφεια μεταξύ ράβδων και σκυροδέματος. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν για τις ράβδους τύπου G1 βυθισμένες στο κέντρο κύβων σκυροδέματος ακμής 100mm. Οι ράβδοι διαμέτρου, 12mm, κόπηκαν σε μήκη των 400mm. Το συνδεδεμένο μήκος ήταν 5 φορές η διάμετρος των ράβδων FRP. Σαράντα χιλιοστά από την άνω επιφάνεια του κύβου και με κατεύθυνση προς το κέντρο του, χρησιμοποιήθηκε επικάλυψη γράσου για να αποτραπεί η σύνδεση της ράβδου με το σκυρόδεμα. Η εφελκυστική φόρτιση εφαρμόστηκε σε μηχανή εφελκυσμού Schenck με κελί φόρτισης 100 kN και φούρνο με μέγιστη απόδοση θερμοκρασίας 250°C. Ο ρυθμός φόρτισης ήταν

1mm/min. Για τη δοκιμή εξόλκευσης οι ράβδοι αγκυρώθηκαν από τις σιαγόνες μηχανής ενώ οι τσιμεντένιοι κύβοι στερεώθηκαν σε ειδικό πλαίσιο. Δοκιμές εξόλκευσης πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα εκτεθειμένα σε δυο περιβαλλοντικές συνθήκες. Το ένα αφορούσε μακροπρόθεσμη έκθεση σε νερό (pH 7) και το άλλο σε αλκαλικό διάλυμα NaOH (pH 12.5), για 30, 120 ή 240 ημέρες. Η θερμοκρασία του νερού και του αλκαλικού διαλύματος ήταν 15-20°C. Τα πειράματα εξόλκευσης πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασίες 20-120°C. Σε κάθε σειρά θερμοκρασίας πέντε δείγματα εξετάστηκαν και αξιολογήθηκαν.

Δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν στις FRP ράβδους σε ένα συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος σύμφωνα με τις υποδείξεις του JSC 1992 [Japanese Society of Civil Engineers, 1992]. Το μήκος της κάθε ράβδου ήταν 40 φορές η διάμετρος (ϕ) με επιπλέον 100mm, δηλαδή 580mm. Οι άκρες της κάθε ράβδου καλύφθηκαν με σωλήνα χαλκού σε μήκος 70mm για αποφυγή αστοχίας του υλικού στις σιαγόνες της μηχανής εφελκυσμού. Οι σιαγόνες αγκύρωσαν τα δοκίμια έτσι ώστε να μην ολισθαίνουν κατά τη διάρκεια φόρτισης. Το μήκος αγκύρωσης ήταν 60mm σε κάθε άκρο έχοντας ωφέλιμο μήκος δοκιμίου 460mm. Η επιμήκυνση των ράβδων μετρήθηκε με κατάλληλα μηκυνσηόμετρα τοποθετημένα στο κεντρικό τμήμα της κάθε ράβδου. Η θερμοκρασία μετρήθηκε με θερμοστοιχεία τοποθετημένα στην επιφάνεια των δοκιμίων.

3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Πειράματα Εξόλκευσης

Τα αποτελέσματα από τα πειράματα εξόλκευσης δίνονται στο Πίνακα 1. Η φόρτιση μετρήθηκε από το ηλεκτρονικό κελί φόρτισης της μηχανής. Η μέση διατμητική τάση συνάφειας υπολογίστηκε από την εξίσωση (1):

$$u_{\max} = \frac{P_{\max}}{\pi 2r l_b} \quad (1)$$

όπου P = δύναμη συνάφειας, $2r$ = διάμετρος και l_b = μήκος ράβδου μέσα στο κύβο. Η διατμητική τάση που υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση (1) είναι η μέγιστη αριθμητική τιμή συνάφειας στην περιοχή αγκύρωσης και δείχνει τιμές οι οποίες χρησιμοποιούνται μόνο για λόγους σύγκρισης.

Στην Εικόνα 2 φαίνεται η μεταβολή της συνάφειας λόγω θερμοκρασίας για τα δείγματα τα οποία εκτέθηκαν σε νερό και για τα δείγματα τα οποία εκτέθηκαν σε αλκαλικό διάλυμα για 28, 120 και 240 μέρες. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων εξόλκευσης δείχνουν ότι η συνάφεια μειώνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Δύο τύποι αστοχίας παρατηρήθηκαν. Απόσπαση της ράβδου από τον κύβο και διαχωρισμός του τσιμεντένιου κύβου κατά μήκος της ράβδου.

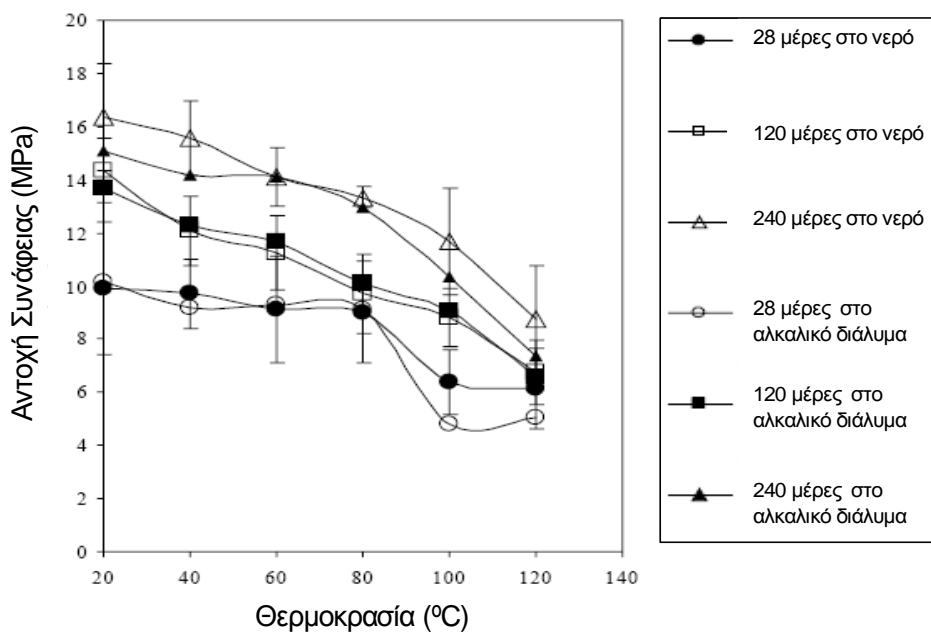
Πίνακας 1. Αποτελέσματα των δοκιμών εξόλκευσης

Περιβάλλον Βύθισης των Δειγμάτων σε Θερμοκρασία 15-20°C	Θερμοκρασία Δοκιμής (°C)	Αντοχή Συνάφειας (MPa) για 30 Μέρες Έκθεσης	Αντοχή Συνάφειας (MPa) για 120 Μέρες Έκθεσης	Αντοχή Συνάφειας (MPa) για 240 Μέρες Έκθεσης
Νερό	20	9,9 ± 2,5	14,36 ± 1,2	16,37 ± 2,0
	40	9,71 ± 1,3	12,09 ± 1,3	15,57 ± 1,4
	60	9,11 ± 2,0	11,27 ± 1,4	14,11 ± 1,1
	80	9,02 ± 1,9	9,7 ± 1,5	13,33 ± 0,4
	100	6,39 ± 1,2	8,83 ± 1,1	11,67 ± 2,0
	120	6,13 ± 1,5	6,76 ± 1,2	8,73 ± 2,0
Αλκαλικό Διάλυμα	20	10,14 ± 1,5	13,65 ± 2,0	15,07 ± 1,9
	40	9,17 ± 2,1	12,27 ± 1,8	14,17 ± 2,0
	60	9,33 ± 2,3	11,65 ± 2,1	14,11 ± 1,3
	80	9,13 ± 1,9	10,11 ± 1,9	12,93 ± 2,0
	100	4,83 ± 2,0	9,04 ± 0,9	10,33 ± 1,6
	120	5,02 ± 1,5	6,56 ± 0,7	7,34 ± 1,2

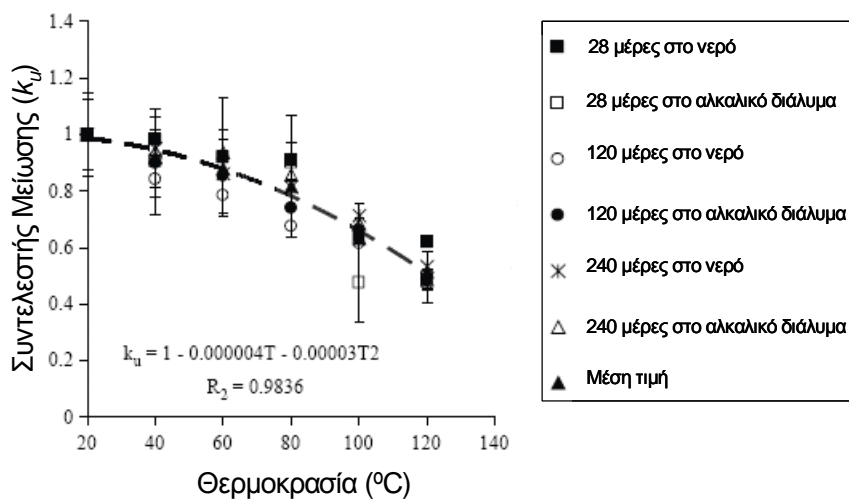
Τα αποτελέσματα δοκιμών σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, δηλ. 20, 40 και 60°C παρουσίασαν αύξηση στη αντοχή συνάφειας περισσότερο από 40% μετά από 8 μήνες έκθεσης συγκρινόμενα με τον 1 μήνα στο νερό και στο αλκαλικό διάλυμα. Στις υψηλότερες θερμοκρασίες, δηλ. 80, 100 και 120°C η συνάφεια των δειγμάτων που βυθίστηκαν για 240 ημέρες ήταν 10-30% μεγαλύτερη από ότι για εκείνα τα δείγματα που βυθίστηκαν για 1 μήνα. Έτσι, η μείωση της συνάφειας για όλα τα δείγματα εμφανίζεται να εξαρτάται πρωτίστως από τη θερμοκρασία που έλαβε μέρος η δοκιμή. Στην Εικόνα 3 έχουν σχεδιαστεί τα αποτελέσματα των δοκιμών εξόλκευσης σε όλες τις θερμοκρασίες και των δύο περιβαλλοντικών εκθέσεων. Παίρνοντας τη μέση τιμή των αποτελεσμάτων για κάθε θερμοκρασία προκύπτει μία δευτεροβάθμια σχέση, όπως η εξίσωση (2):

$$k_u = 1 - 0.000004T - 0.00003T^2 \quad (2)$$

Η εξίσωση (2) είναι μια καλή προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων όπου το k_u είναι η αναλογία της συνάφειας σε θερμοκρασία T(°C) προς τη συνάφεια σε θερμοκρασία δωματίου με αντίστοιχες εκθέσεις στο νερό ή αλκαλικό περιβάλλον. Η παρακάτω γραφική παράσταση δείχνει ότι η διαφορά των αποτελεσμάτων μεταξύ έκθεσης σε νερό ή αλκαλικό διάλυμα είναι μηδαμινή. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται οι ράβδοι κατά την έκθεσή τους στο νερό αναμένεται να είναι αλκαλικό λόγω της δράσης των διαλυμένων συστατικών του κύβου σκυροδέματος.

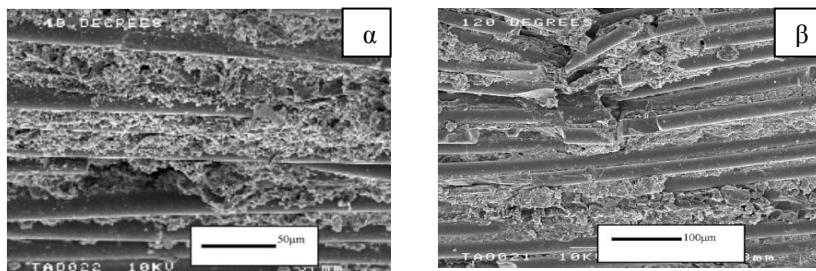


Εικόνα 2. Γράφημα αποτελεσμάτων από τα πειράματα εξόλκευσης για τις ράβδους τύπου G1 κατόπιν χρονικής έκθεσης σε περιβάλλον νερού και αλκαλικού διαλύματος



Εικόνα 3. Γράφημα του συντελεστή μείωσης (k_u) της αντοχής συνάφειας προς τη θερμοκρασία δοκιμής για ράβδους τύπου G1

Στην Εικόνα 4 απεικονίζονται από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης φωτογραφίες από την μορφολογία της επιφάνειας αστοχίας των ράβδων. Η πολυμερής μήτρα στην επιφάνεια των ράβδων εμφανίζεται να έχει εκτριφθεί σε όλες τις περιπτώσεις. Οι φωτογραφίες φανερώνουν σημαντική θραύση των ινών στο ελεύθερο μήκος των ράβδων για τις δοκιμές στους 120°C σε αντίθεση με τα δείγματα στους 40°C όπου η θραύση των ινών ήταν πολύ περιορισμένη. Καμία άλλη σημαντική διαφορά δεν παρατηρήθηκε στις δοκιμές στους 40°C και 120°C εκτός από τον ελαφρώς μεγαλύτερο θρυμματισμό της ρητίνης σε υψηλότερες θερμοκρασίες δοκιμής.



Εικόνα 4. Αστοχίες στη επιφάνεια των ράβδων FRP κατόπιν πειραμάτων εξόλκευσης. α) Θραύση της πολυμερούς μήτρας της ράβδου σε θερμοκρασία δοκιμών τους 40°C και β) θραύση των ινών υάλου αντίστοιχα σε θερμοκρασία δοκιμών τους 120°C

3.2 Πειράματα Εφελκυσμού

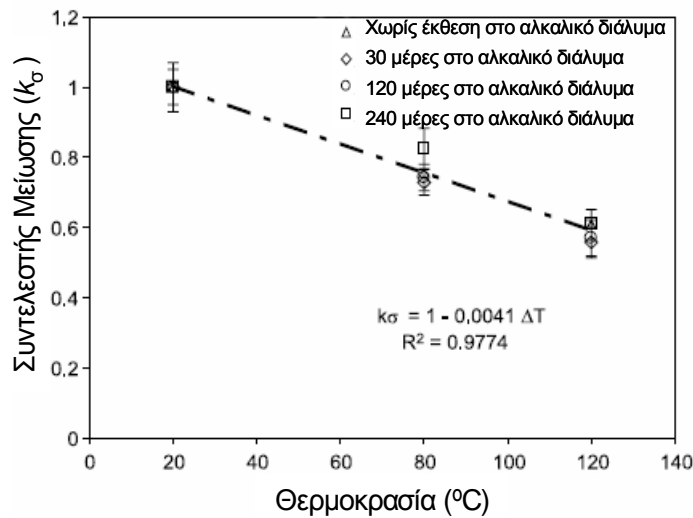
Όλα τα δείγματα των πειραμάτων εφελκυσμού παρουσίασαν θραύση των ινών στο ωφέλιμο μήκος των ράβδων. Ο καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για όλες τις θερμοκρασίες δοκιμής ήταν γραμμικές μέχρι αστοχίας των δειγμάτων. Το μέτρο ελαστικότητας μετρήθηκε με τη λήψη της κλίσης από τις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης. Η εφελκυστική αντοχή της ράβδου ορίστηκε σαν το μέγιστο φορτίο διαιρούμενο με την αρχική διατομή της ράβδου.

Τα αποτελέσματα για την δοκιμή των ράβδων για διαφορετικές χρονικές εκθέσεις στο αλκαλικό διάλυμα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Όπως φαίνεται υπάρχει μια γενική μείωση στη εφελκυστική αντοχή λόγω υψηλών θερμοκρασιών και διάρκεια έκθεσης στο αλκαλικό περιβάλλον. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις οι αποκλίσεις ήταν μικρότερες του 10%. Η μείωση της εφελκυστικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας συνδέεται με την καταπόνηση των ινών και άρα τις ίδιες τις ιδιότητες λόγω των θερμοκρασιών και έκθεσης σε αλκαλικό περιβάλλον. Η μείωση της εφελκυστικής αντοχής προς κάθε θερμοκρασία δοκιμής διαιρούμενη προς την εφελκυστική αντοχή μετρημένη στους 20°C κατόπιν ίδιας έκθεσης σε αλκαλικό περιβάλλον φαίνεται στην Εικόνα 5 για ράβδους τύπου G1. Αντίστοιχα αποτελέσματα δίνουν και οι ράβδοι τύπου G2 και G3.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού των ράβδων με και χωρίς προγενέστερη έκθεση σε αλκαλικό διάλυμα NaOH σε θερμοκρασία 60°C

Τύπος Ράβδου	Θερμοκρασία Δοκιμής (°C)	Περιβαλλοντική Έκθεση	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)
G1	20-25	Χωρίς Έκθεση	366 ± 5%	39 ± 3%
G1	80	Χωρίς Έκθεση	277 ± 9%	27 ± 5%
G1	120	Χωρίς Έκθεση	223 ± 5%	18 ± 5%
G1	20-25	30 μέρες	346 ± 5%	36 ± 2%
G1	80	30 μέρες	252 ± 5%	20 ± 2%
G1	120	30 μέρες	193 ± 8%	18 ± 5%
G1	20-25	120 μέρες	326 ± 5%	27 ± 3%
G1	80	120 μέρες	242 ± 5%	19 ± 13%
G1	120	120 μέρες	186 ± 9%	19 ± 3%
G1	20-25	240 μέρες	286 ± 7%	22 ± 5%
G1	80	240 μέρες	236 ± 7%	18 ± 5%
G1	120	240 μέρες	174 ± 7%	18 ± 5%
G2	20-25	Χωρίς Έκθεση	416 ± 5%	37 ± 5%
G2	80	Χωρίς Έκθεση	362 ± 5%	33 ± 5%
G2	120	Χωρίς Έκθεση	332 ± 5%	31 ± 5%
G2	20-25	30 μέρες	349 ± 7%	31 ± 5%
G2	80	30 μέρες	289 ± 9%	28 ± 5%
G2	120	30 μέρες	268 ± 9%	26 ± 8%
G2	20-25	120 μέρες	333 ± 9%	29 ± 9%
G2	80	120 μέρες	280 ± 11%	26 ± 8%
G2	120	120 μέρες	223 ± 5%	24 ± 15%
G3	20-25	Χωρίς Έκθεση	396 ± 3%	41 ± 8%
G3	80	Χωρίς Έκθεση	330 ± 7%	35 ± 5%
G3	120	Χωρίς Έκθεση	246 ± 11%	22 ± 9%
G3	20-25	30 μέρες	375 ± 9%	39 ± 5%
G3	80	30 μέρες	295 ± 7%	32 ± 5%
G3	120	30 μέρες	240 ± 8%	21 ± 5%
G3	20-25	120 μέρες	299 ± 5%	33 ± 5%
G3	80	120 μέρες	260 ± 5%	31 ± 12%
G3	120	120 μέρες	210 ± 9%	17 ± 10%

Γίνεται μια παραδοχή ότι για το εύρος θερμοκρασιών των δοκιμών ισχύει μια γραμμική σχέση του συντελεστή μείωσης με τη θερμοκρασία. Αυτό επιτρέπει στο να παραχθεί μια εξίσωση που προβλέπει τη σχετική μείωση της εφελκυστικής αντοχής συναρτήσει της θερμοκρασίας, ανεξάρτητα από την αρχική κατάσταση της ράβδου δηλαδή:



Εικόνα 5. Η επίδραση της θερμοκρασίας στην εφελκυστική αντοχή των ράβδων τύπου G1

$$\frac{\sigma_{fT}}{\sigma_{f20^{\circ}C}} = k_{\sigma} \quad (3)$$

όπου $\sigma_{f20^{\circ}C}$ και σ_{fT} είναι η αντοχή θραύσης των ράβδων στους $20^{\circ}C$ και $20 + \Delta T^{\circ}C$, αντίστοιχα, όπου οι ράβδοι στους $20^{\circ}C$ και $20 + \Delta T^{\circ}C$ έχουν την ίδια χρονική έκθεση στο αλκαλικό διάλυμα. Σύμφωνα με τα διαγράμματα οι τιμές των k_{σ} για κάθε τύπο ράβδου είναι συγκρίσιμες με αντίστοιχες που αναφέρονται στη βιβλιογραφία [Blontrock H., 1998] και είναι:

Ράβδος τύπου G1:
 $k_{\sigma} = 1 - 0.0041 \Delta T$ για $20^{\circ}C \leq T \leq 120^{\circ}C$ (4)

Ράβδος τύπου G2:
 $k_{\sigma} = 1 - 0.0025 \Delta T$ για $20^{\circ}C \leq T \leq 120^{\circ}C$ (5)

Ράβδος τύπου G3:
 $k_{\sigma} = 1 - 0.0034 \Delta T$ για $20^{\circ}C \leq T \leq 120^{\circ}C$ (6)

Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία μπορεί να εκφραστεί με παρόμοιο τρόπο, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$\frac{E_{fT}}{E_{f20^{\circ}C}} = k_E \quad (8)$$

όπου $E_{f20^{\circ}C}$ και E_{fT} είναι το μέτρο ελαστικότητας της ράβδου στους $20^{\circ}C$ και $20^{\circ}C + \Delta T^{\circ}C$, αντίστοιχα. Η μείωση του μέτρου ελαστικότητας ακολουθεί παρόμοια συμπεριφορά με την εφελκυστική αντοχή για τις ράβδους τύπου

G2 και G3 και είναι επίσης δυνατό να δοθεί μια εξίσωση που καλύπτει όλες τις καταστάσεις χρονικής έκθεσης στο αλκαλικό περιβάλλον. Εντούτοις, για τη ράβδο τύπου G1, η αλλαγή στο μέτρο ελαστικότητας με τη θερμοκρασία είναι διαφορετική και χωριστές εξισώσεις απαιτούνται, Εικόνες 6 και 7. Ο λόγος για τον οποίο οι ράβδοι τύπου G1 έχουν διαφορετική συμπεριφορά είναι συνδεδεμένος με την φύση της πολυμερούς μήτρας. Η πολυεστερική ρητίνη που χρησιμοποιείται στις ράβδους τύπου G1 έχει μειωμένη χημική αντίσταση στα αλκάλια έναντι του βινυλεστέρα που χρησιμοποιείται στις ράβδους τύπου G2 και G3. Η μείωση του αρχικού μέτρου ελαστικότητας λόγω χημικής επίθεσης στην πολυμερή μήτρα έχει σαν συνέπεια ότι η περαιτέρω θερμική επίδραση είναι λιγότερο σημαντική. Η διαφορά μεταξύ της συμπεριφοράς ράβδων τύπου G1 όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας και την εφελκυστική αντοχή δείχνει την ελάχιστη επιρροή των ιδιοτήτων της πολυμερούς μήτρας στις παραμέτρους αυτές. Οι σχετικές μαθηματικές εκφράσεις που προέρχονται από τα σχετικά διαγράμματα είναι:

Ράβδος τύπου G1:

$$k_E = 1 - 0.0054\Delta T \text{ (χωρίς περιβαλλοντική έκθεση) για } 20^\circ\text{C} \leq T \leq 120^\circ\text{C}$$

$$k_E = 1 - 0.0051\Delta T \text{ (30 μέρες στο αλκαλικό διάλυμα)}$$

$$k_E = 1 - 0.0031\Delta T \text{ (120 μέρες στο αλκαλικό διάλυμα)} \quad (7)$$

$$k_E = 1 - 0.0019\Delta T \text{ (240 μέρες στο αλκαλικό διάλυμα)}$$

Ράβδος τύπου G2:

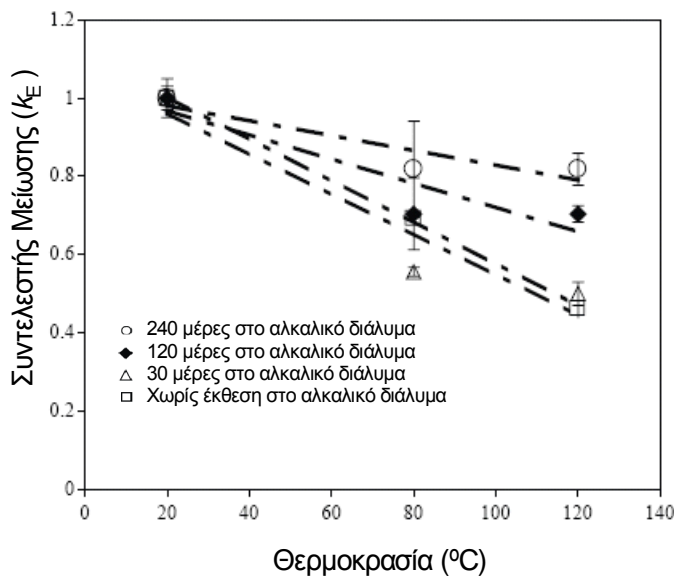
$$k_E = 1 - 0.0017\Delta T \text{ για } 20^\circ\text{C} \leq T \leq 120^\circ\text{C} \quad (8)$$

Ράβδος τύπου G3:

$$k_E = 1 - 0.0045\Delta T \text{ για } 20^\circ\text{C} \leq T \leq 120^\circ\text{C} \quad (9)$$

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

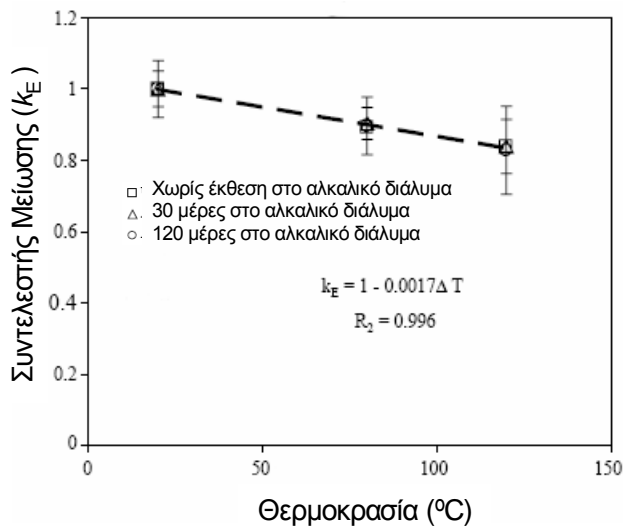
Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης δείχνουν σαφώς ότι οι ιδιότητες των ράβδων FRP επιδεινώνονται με τη θερμοκρασία και το χρόνο έκθεσης στο αλκαλικό περιβάλλον. Αντίθετα η αντοχή της συνάφειας των ράβδων με το σκυρόδεμα αυξάνεται με το χρόνο και σχετικά μένει ανεπηρέαστη από την έκθεση στο αλκαλικό περιβάλλον. Μια πιθανή εξήγηση για αυτήν την αύξηση μπορεί να είναι και η αύξηση της αντοχής στο σκυρόδεμα με την πάροδο του χρόνου. Η πραγματική αλλαγή στη αντοχή του σκυροδέματος δεν μετρήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία, αλλά αναφορές στη βιβλιογραφία συνιστούν ότι η συνεχιζόμενη έκθεση σκυροδέματος σε νερό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της θλιπτικής αντοχής για περιόδους μέχρι και μερικά έτη [Tastani S.P, 2002]. Μια συνεχής αύξηση στη αντοχή του σκυροδέματος θα συνιστούσε αύξηση στη συνάφεια λόγω ισχυρότερης μηχανικής σύμπλεξης μεταξύ των επιφανειών με πιθανή αλλαγή στη περιοχή θραύσης, από αυτή στο ίδιο το σκυρόδεμα τοπικά στην επιφάνεια της ράβδου FRP.



Εικόνα 6. Η επίδραση της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας των ράβδων τύπου G1

Από την εξέταση των στοιχείων που παρουσιάζονται στην Εικόνα 2 είναι φανερό ότι τα δείγματα που εξετάστηκαν μετά από 28 ημέρες, παρουσίασαν αρχικά αντοχή συνάφειας περίπου 10MPa και δεν παρουσίασαν μεγάλη μείωση της τιμής αυτής σε υψηλότερες θερμοκρασίες, μέχρι τη θερμοκρασία δοκιμής στους 80°C. Αυτό σημαίνει ότι στις χαμηλότερες θερμοκρασίες η συνάφεια εξαρτάται από την αντοχή του σκυροδέματος και δεν αναμένεται να εξασθενήσει πολύ με αυτές τις θερμοκρασίες [Eurocode 2, 1992, Katz A.,1999]. Μετά τη θερμοκρασία των 80°C η αντοχή της μήτρας πολυεστέρα του σύνθετου υλικού μειώθηκε σημαντικά και άρα η συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και ράβδου. Για τα υπόλοιπα δείγματα, η αντοχή συνάφειας αρχικά αυξήθηκε σε 14-16MPa ακολουθούμενη από προοδευτική μείωση με τη θερμοκρασία. Από τη διαδικασία αυτή προτείνεται ότι η θραύση μετατοπίζεται από το σκυρόδεμα στο σύνθετο υλικό και επέρχεται σχετικά γρήγορα κάτω από αυτές τις συνθήκες. Η αύξηση του αριθμού θραύσης των ινών και η ψαθυρή θραύση στη επιφάνεια της πολυμερούς μήτρας σε υψηλές θερμοκρασίες είναι προφανείς.

Η μείωση της εφελκυστικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας των ράβδων με τη θερμοκρασία είναι ίδια στις περισσότερες περιπτώσεις για τους τρεις τύπους ράβδων ανεξάρτητα με το χρόνο έκθεσης στο αλκαλικό περιβάλλον. Τα αποτελέσματα της παρούσης μελέτης όσον αφορά την εφελκυστική αντοχή είναι παρόμοια με εκείνα που δημοσιεύονται στην βιβλιογραφία [Blontrock H., 1998] και δείχνουν γραμμική μείωση στη



Εικόνα 7. Η επίδραση της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας των ράβδων τύπου G2

εφελκυστική αντοχή για ράβδους από ίνες υάλου ξεκινώντας από θερμοκρασιακές αυξήσεις της τάξεως των 20°C. Η συγκεκριμένη μελέτη, εντούτοις, αναφέρει ότι η ακαμψία των ράβδων δεν μειώθηκε μέχρι τη θερμοκρασία των 100°C. Έκτοτε η μείωση ήταν γραμμική με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Είναι απίθανο η επίδραση της θερμοκρασίας να συνδέεται με οποιαδήποτε σημαντική μείωση στη αντοχή των ινών υάλου στη θερμοκρασίες που εξετάστηκαν τα δείγματα. Είναι πιθανό όμως η μείωση της εφελκυστικής αντοχής να οφείλεται στη μεταφορά τάσης μεταξύ των ινών και της μήτρας. Όταν μια ίνα αστοχίσει τοπικά τότε μπορεί να συνεχίσει να συμβάλλει στη αντοχή του σύνθετου υλικού και να φέρει κάποιο φορτίο σε περιοχές μακρινές από το σημείο θραύσης. Πολλαπλές αστοχίες των ινών συνήθως εμφανίζονται πριν από την τελική ρήξη της ράβδου. Όταν η διεπαφή μεταξύ των ινών εξασθενεί, η μεταφορά τάσης που απαιτείται για να συνεχίσουν τα δύο τμήματα της ίνας να φορτίζονται μειώνεται και έτσι η αντοχή του σύνθετου υλικού μειώνεται αναλόγως. Ως ακραία κατάσταση μπορεί να θεωρηθεί η περίπτωση που υπάρχουν ίνες χωρίς ρητίνη σε μορφή δέσμης. Η αντοχή μιας χαλαρής δέσμης ινών συγκρινόμενη με το μέσο όρο αντοχής των μεμονωμένων ινών ποικίλλει και εξαρτάται από τη πιθανότητα των ρωγμών στις ίνες. Είναι δυνατό η επίδραση της θερμοκρασίας να μειώσει τη σύνδεση των ινών μεταξύ τους και να εξασθενήσει τη μεταφορά τάσης μέσα στο σύνθετο έτσι ώστε οι ράβδοι να ενεργούν σταδιακά περισσότερο όπως μια δέσμη χαλαρών ινών παρά ένα στερεό σύνθετο καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Η επίδραση της αλκαλικής έκθεσης θα μπορούσε έπειτα να μειώσει τη αντοχή των ινών υάλου χωρίς να επηρεάσει τη μεταφορά τάσης σε κάθε θερμοκρασία

δοκιμής. Αυτό εξηγεί γιατί η μείωση της αντοχής με τη θερμοκρασία είναι παρόμοια για κάθε τύπο ράβδου κατόπιν αλκαλικής έκθεσης. Εντούτοις, αυτό μπορεί να είναι μόνο μέρος της εξήγησης. Είναι πιθανό οι ίνες να έχουν καταπονηθεί από διαδικασίες που περιλαμβάνονται κατά την κατασκευή τους.

Το μέτρο ελαστικότητας επίσης μειώνεται στις θερμοκρασίες που εξετάζονται. Η συμπεριφορά των ινών υάλου δεν τροποποιείται καθόλου σε αυτές τις θερμοκρασίες που εξετάζονται και η πολυμερής μήτρα έχει ασημαντη συμβολή στο μέτρο ελαστικότητας. Η μόνη εφικτή εξήγηση είναι πάλι ότι η μεταφορά τάσης μεταξύ της ίνας και της μήτρας εξασθενεί καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Έτσι οι αλλαγές στη μείωση του μέτρου ελαστικότητας με τη θερμοκρασία μπορούν να αποδοθούν στη πολυμερής μήτρα. Η πολυμερής μήτρα στις ράβδους τύπου G1 είναι πολυεστέρας, ο οποίος έχει πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g) από τους βινυλεστέρες των ράβδων τύπου G2 και G3. Ο πολυεστέρας είναι επίσης πιο ευαίσθητος στη χημική επίθεση από τα αλκάλια που σημαίνει ότι το μέτρο ελαστικότητας των ράβδων αυτού του τύπου μειώνεται ακόμα και σε θερμοκρασίες δωματίου. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η μείωση του μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλότερη για τις ράβδους με μήτρα πολυεστέρα που έχουν εκτεθεί σε αλκάλια. Αυτό σημαίνει ότι το σύνθετο υλικό είναι σχεδόν πλήρως εξασθενημένο και η μεταφορά τάσης είναι στο κατώτερο όριο ακόμα και σε θερμοκρασίες δωματίου, οπότε αυξάνοντας τη θερμοκρασία το σύνθετο υλικό δεν μπορεί να καταπονηθεί περαιτέρω.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γίνεται κατανοητό από τα αποτελέσματα ότι το περιβάλλον νερού ή αλκαλικού διαλύματος δεν επηρεάζει σημαντικά τη συνάφεια μεταξύ ράβδων FRP και σκυροδέματος σε αντίθεση με τη αύξηση της θερμοκρασίας η οποία επιφέρει σημαντική μείωση. Η μείωση αυτή της αντοχής συνάφειας με την αύξηση της θερμοκρασίας ακολουθεί μια συγκεκριμένη σχέση. Ωστόσο, με την επίδραση της θερμοκρασίας και του αλκαλικού περιβάλλοντος μειώνεται η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας των ράβδων FRP σε εφελκυσμό. Σε μεγάλο βαθμό η φύση της πολυμερούς μήτρας φαίνεται να καθορίζει το μέγεθος και ποσοστό καταπόνησης. Προτείνεται ότι ο μηχανισμός και το μέγεθος της μείωσης της εφελκυστικής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας των ράβδων, κατόπιν αλκαλικής έκθεσης και δοκιμασίας στις υψηλές θερμοκρασίες, είναι συνδεδεμένα με την μεταφορά τάσης μεταξύ ινών και μήτρας μέσα στο ίδιο το σύνθετο υλικό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Blontrock H., Taerwe L., Matthys S., Properties of fibre reinforced plastics at elevated temperatures with regard to fire resistance of reinforced concrete members. *Fibre reinforced polymer reinforcement SP-188-5* (1998) 43–54

Concrete Library of JSCE (Japanese Society of Civil Engineers), Research Subcommittee on Continuous Fibre Reinforcing Materials. Application of continuous fibre reinforcing materials to concrete structures, No. 19 (1992) 89–130

Eurocode 2. Design of concrete structures. ENV EC2 Part 1.2 (1992)

Hamilton H.R., Dolan C.W., Durability of FRP reinforcements for concrete, *Prog. Struct. Engng Mater*, Vol. 2 (2000) 139-145

Katz A., Berman N., Banks L.C., Effect of high temperature on bond strength of FRP rebars. *J Compos Construct* Vol. 3, No2 (1999) 73–81

Lees J.M., Fibre-reinforced polymers in reinforced and prestressed concrete applications: moving forward, *Prog. Struct. Engng Mater.*, Vol. 3 (2001) 122-131

Micelli F., Nanni A., Durability of FRP rods for concrete structures, *Constr Build Mater*. Vo. 18 (2004) 491–503

Takewaka K., Myo K., Deterioration and stress-rupture of FRP rods in alkaline solution simulating as concrete environment. In: El- Bardy MM, editor. *Advanced composite materials in bridges and structures*. Montreal, Que.: Canadian Society for Civil Engineering, (1996) 647–656

Tastani S.P, Pantazopoulou S.J. Experimental evaluation of the direct tension-pullout bond test. In: *Bond in concrete—from research to standards*, Budapest (2002) 1–8