

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ, ΔΟΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΦΥΛΛΑ FRP(ΙΟΠ).

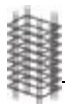
ΚΑΤΣΙΚΑΣ Α. ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ - ΚΟΥΡΤΕΣΗΣ Α. ΛΕΩΝΙΔΑΣ

Περίληψη

Η εργασία αυτή παρουσιάζει τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα από δύο πειραματικά προγράμματα που πραγματοποιήθηκαν για να διερευνηθεί η απόδοση της συνάφειας διαφόρων τύπων φύλλων ΙΟΠ, με την επιφάνεια σκυροδέματος και η μηχανική συμπεριφορά ενισχυμένων δοκών με φύλλα ΙΟΠ, υπό την επίδραση συνδυασμένων περιβαλλοντικών συνθηκών. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες του πρώτου πειράματος περιλαμβάνουν την έκθεση των ενισχυμένων δοκών με φύλλα ΙΟΠ σε θερμοκρασία δωματίου +20 °C και σε 300 κύκλους υγρασίας/ξηρασίας (χρησιμοποιήθηκε αλμυρό νερό για τους κύκλους υγρασίας και θερμός αέρας στους 35 °C για τους κύκλους ξηρασίας). Στο δεύτερο πείραμα οι ενισχυμένες δοκοί εκτέθηκαν σε συνδυασμένες περιβαλλοντικές συνθήκες όπως: κύκλους ψύξης-τήξης, σχετικής υγρασίας, υψηλών θερμοκρασιών και έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία. Μετά και κατά την έκθεση στις περιβαλλοντικές συνθήκες (των δύο πειραμάτων) οι ενισχυμένες δοκοί φορτίζονταν έτσι ώστε να περιγραφούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους και να μελετηθεί η επίδραση των συγκεκριμένων περιβαλλοντικών συνθηκών στην αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης δοκών με φύλλα ΙΟΠ.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρησιμοποίηση προηγμένων σύνθετων υλικών φαίνεται πολλά υποσχόμενη στο ζήτημα αποκατάστασης των κατασκευών. Τα σύνθετα υλικά προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα στις δομικές χρήσεις, όπως είναι η ανάληψη μεγαλύτερων δυνάμεων, τα μικρότερα βάρη, η ανθεκτικότητα στη διάβρωση, η ευκολία μόρφωσης, η οποία επιτρέπει τη δημιουργία μεγάλων και περίπλοκων σχημάτων. Άλλοι παράγοντες που απαιτούν τη χρήση σύνθετων φύλλων ΙΟΠ κατά την αποκατάσταση των κατασκευών είναι ο χρόνος και η κατασκευαστική ακρίβεια. Οι τεχνικές ενίσχυσης με τη χρήση φύλλων ΙΟΠ επιτρέπουν την οικονομικότερη επιλογή επέμβασης, παρότι το κόστος των φύλλων ΙΟΠ είναι υψηλότερο από τα συμβατικά υλικά. Παρ' όλο που έχουν γίνει εντυπωσιακές μεταβολές στις εφαρμογές των υποδομών των κατασκευών, υπάρχουν ακόμα εμπόδια που χρειάζεται να ξεπεραστούν προκειμένου να επιτευχθεί το πλήρες δυναμικό της χρήσης αυτών των υλικών στον τομέα των κατασκευών. Στις μέρες μας, ύψιστη σημασία έχει το ζήτημα της αντοχής. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν και άλλα ζητήματα, όπως είναι η εξασθένιση της απόδοσης σε ακραία λειτουργικά περιβάλλοντα όπως τα θαλάσσια, οι ακραίες θερμοκρασίες, η σχετική υγρασία, οι κύκλοι ψύξης-τήξης, η υπεριώδης ακτινοβολία και η μακρόχρονη έκθεση σε αποπαγωγικά άλατα. Διάφορες μελέτες υποστηρίζουν ότι υπάρχει μια ανάγκη να αξιολογηθεί η αντοχή της απόδοσης των σύνθετων υλικών σε συνδυασμένες περιβαλλοντικές συνθήκες προκειμένου να προσομοιωθούν οι φυσικές καιρικές συνθήκες. Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι να εξετάσουμε την εξασθένιση της ένωσης των διαφόρων φύλλων ΙΟΠ με το σκυρόδεμα, η οποία οφείλεται σε συνδυασμένες περιβαλλοντικές συνθήκες υπό φόρτιση για δοκούς από σκυρόδεμα που έχουν ενισχυθεί με ΙΟΠ.

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ**

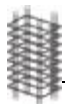
Για το **πρώτο πείραμα** που η κυριότερη περιβαλλοντική επίδραση είναι η έκθεση σε κύκλους υγρού/ξηρού περιβάλλοντος κατασκευάστηκαν δοκοί 51x51x356mm ανευ οπλισμού. Χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα συμβατικής αντοχής για τις δοκούς:ASTM Portland, τύπου II. Προκειμένου να καθοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν τέσσερις κύλινδροι διαστάσεων 100x200mm.Ο μέσος όρος αντοχής 28 ημερών σε θλίψη και κάμψη ήταν 30 MPa και 4.6 MPa αντίστοιχα. Όλα τα δείγματα υπέστησαν επεξεργασία κατά της υγρασίας πριν περιβληθούν εξωτερικά με φύλλα ΙΟΠ. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις τύποι σύνθετου υλικού ΙΟΠ:δύο με βάση τον άνθρακα(C1 και C2) και δύο με βάση το γυαλί(G1 και G2).Στον πίνακα 1 παρουσιάζουμε μια σύνοψη των ιδιοτήτων των φύλλων ΙΟΠ. Χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά συστήματα εποξικής κόλλας δύο συστατικών:I,II και III. Στον πίνακα 2 παρουσιάζουμε μια σύνοψη των ιδιοτήτων των τριών τύπων εποξικής κόλλας

Πίνακας 1: Μηχανικές ιδιότητες των φύλλων FRP

Φύλλο FRP	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	E (Gra)	Οριακή Παραμόρφωση (%)	Πάχος (mm)
C1	3485	228	1.5	0.165
C2	2940	373	0.8	0.165
G1	1518	69	2.1	0.118
G2	2270	72	3.2	1.30

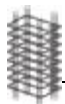
Πίνακας 2: Μηχανικές ιδιότητες του συγκολλητικού μέσου

Ιδιότητες	Εποξική κόλλα - Τύπος I	Εποξική κόλλα - Τύπος II	Εποξική κόλλα - Τύπος II
Χημική ονομασία	Τροποποιημένο μίγμα αμινικής/εποξικής κόλλας	Σκληρυντικό/εποξική κόλλα από πολυοξυπροπυλενεδιαμίνη	Κορεστής αμίνης/ εποξική κόλλα χωρίς διαλυτικό
Χημική σύνθεση	Τροποποιημένη αμίνη 30%	Διαφέρει αναλόγα με τον παρασκευαστή	Εποξική κόλλα με βισφαινόλη 50%
	Αμίνη αλκυλικού ιαθέρα 40%		Πολυοξυπροπυλενεδιαμίνη 25% Ισοφορνική διαμίνη 15% Αλφατική αμίνη 10%
Αναλογία μίξης	1:2	3:7	1:2
Αναμειξιμότητα στο νερό	>10%/<0.1%	>10%/ αμελητέο	>10%/αδιάλυτη
Πυκνότητα (g/cm ³)	1.1	1.11	N/A
Ιξώδες @ 25° C (cPs)	12350	9415	18000
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	55.9	69.7	4
Καμπτική αντοχή (MPa)	78.7	79.4	9
Συντελεστής τάσης (GPa)	2.35	3.06	2.3
Επιμήκυνση (%)	2.4	3.5-5.0	2.68



Δοκιμάστηκαν συνολικά 56 δοκοί που είχαν προσαρμοστεί σε διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος. Οι μισές δοκοί εκτέθηκαν σε κύκλους υγρασίας/ξηρασίας σε θάλαμο και οι άλλες μισές διατηρήθηκαν σε σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τέσσερις δοκοί που δεν είχαν καλυφθεί με ΙΟΠ εκτέθηκαν σε κύκλους υγρασίας/ξηρασίας και τέσσερις διατηρήθηκαν σε σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος. Πριν την συγκόλληση των φύλλων από ΙΟΠ με την εφελκόμενη πλευρά, η επιφάνεια σκυροδέματος υπέστη εκτράχυνση καθαρίστηκε και στέγνωσε πριν την εφαρμογή της εποξικής κόλλας. Ένα αστάρι δύο συστατικών αναμίχθηκε με το χέρι για τουλάχιστον 5 λεπτά και απλώθηκε στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Στη συνέχεια η εποξική κόλλα αναμίχθηκε καλά για 5 λεπτά απλώθηκε ομοιόμορφα πάνω στην επιφάνεια και μετά το φύλλο ΙΟΠ εφαρμόστηκε πάνω σε αυτή. Ασκήθηκε ομοιόμορφη πίεση πάνω σε αυτό, προκειμένου να βγει ο παγιδευμένος αέρας. Η εποξική κόλλα έμεινε για 30 λεπτά και στη συνέχεια ένα λεπτό στρώμα επικάλυψης απλώθηκε πάνω στα φύλλα ΙΟΠ. Χρησιμοποιήθηκε 250 g/m² αστάρι, 400 g/m² πρώτο χέρι με εποξική κόλλα και 200 g/m² επικάλυψης με εποξική κόλλα. Όλα τα δείγματα έμειναν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος τουλάχιστον 3 ημέρες πριν εκτεθούν στο περιβάλλον προκειμένου να διασφαλιστεί ότι απέδωσε η κόλλα. Τα μισά από τα 56 δείγματα παρέμειναν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για τουλάχιστον 75 ημέρες. Τα δείγματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν ως δοκιμαστικά. Τα υπόλοιπα τοποθετήθηκαν σε ένα ειδικά κατασκευασμένο θάλαμο και εκτέθηκαν σε 300 κύκλους υγρασίας/ξηρασίας. Τα δείγματα υπέστησαν περιβάλλοντα άλατος, στα οποία υπήρχαν υγροί και ξηροί κύκλοι (θερμός αέρας περίπου 35°C και υγρασία 90%). Το θαλασσινό νερό προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας 35g αλατι σε 1 λίτρο νερού. Αυτή είναι κατά προσέγγιση η περιεκτικότητα αλατιού που βρίσκεται στους ωκεανούς. Η διάρκεια του κύκλου υγρασίας ήταν 4 ώρες και του κύκλου ξηρασίας 2 ώρες. Υπο αυτές τις συνθήκες ήταν εκτεθειμένα τα δείγματα για 75 ημέρες. Στο τέλος των 300 κύκλων, υπολογίσαμε τα διαγράμματα φορτίου μετατόπισης για να αξιολογήσουμε την αντοχή, την ακαμψία και την πλαστιμότητα τους τιμές οι οποίες αντιπαραβλήθηκαν με τις αντίστοιχες που είχαμε πάρει από τα δείγματα που διατηρήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου. Τα δείγματα δοκιμάστηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων. (Houssam A. Toutanji & William Gomez)

Για τις ανάγκες του **δεύτερου πειράματος** που περιλαμβάνει έκθεση ενισχυμένων δοκών με φύλλα ΙΟΠ σε συνδυασμένες περιβαλλοντικές επιδράσεις και την μελέτη της συνάφειας μεταξύ φύλλων ΙΟΠ και επιφάνειας σκυροδέματος και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των φύλλων ΙΟΠ, κατασκευάστηκαν δοκοί διαστάσεων 152x152x610mm οι οποίες φέρουν 2 ράβδους διαμέτρου 6mm διαμήκη οπλισμό. Ο οπλισμός τοποθετήθηκε έτσι ώστε να προρηγματωθούν οι δοκοί και κατόπιν να ενισχυθούν όπως συμβαίνει σε μια κατασκευή η οποία υφίσταται επιδιόρθωση. Μετά τη βλάβη οι δοκοί αμμοβολήθηκαν στο εφελκόμενο πέλμα για να προκληθεί εκτράχυνση και να κολλήσουν καλύτερα τα φύλλα ΙΟΠ. Δεκαέξι δοκοί ενισχύθηκαν εξωτερικά με φύλλα άνθρακος ΙΟΠ μήκους 38mm, δεκαέξι δοκοί με φύλλα αραμιδίου ΙΟΠ μήκους 38mm, δεκαέξι δοκοί με φύλλα υάλου ΙΟΠ μήκους 38mm. Τα περιβλήματα των φύλλων ΙΟΠ είναι σχήματος U για καλύτερη προσαρμογή με την επιφάνεια των δοκών. Οι ενισχυμένες δοκοί εκτέθηκαν στη συνέχεια κάτω από ποικίλα ποσοστά του οριακού φορτίου σε ένα θάλαμο περιβαλλοντικών συνθηκών. Σχεδιάστηκε ένα πρόγραμμα καταπόνησης έτσι ώστε να ασκείται καθόλη τη διάρκεια έκθεσης των δοκών στο θάλαμο περιβαλλοντικών συνθηκών φορτίο. Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τα δοκιμαστικά δείγματα φαίνονται στον πίνακα 3. Το πρόγραμμα των πειραμάτων αναπαρίσταται σχηματικά στον πίνακα 4. Παρουσιάζονται: Ποσοστό του οριακού φορτίου, τύπος του φύλλου (AFRP: αραμιδίου, CFRP: άνθρακος, GFRP: υάλου), αριθμός



Υλικό	Οριακό φορτίο (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας E (MPa)	Οριακή παραμόρφωση (%)
Τσιμέντο	34.5	27145.6	0.2
Ατσάλι	661.9	199955	0.33
CFRP:άνθρακος (CF 130)	3792.3	227535	1.67
AFRP:αραμίδιου (AK 60)	1999.6	117215	1.7
GFRP:υάλου (EG 900)	1516.9	72397.5	2.1

Πίνακας 3: Μηχανικές ιδιότητες των υλικών

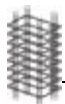
των κύκλων έκθεσης στις συνδυασμένες περιβαλλοντικές επιδράσεις. Για παράδειγμα η ένδειξη 40-C-5 σημαίνει μια δοκό ενισχυμένη με φύλλα άνθρακος ΙΟΠ η οποία έχει εκτέθει σε 5 συνδυασμένους περιβαλλοντικούς κύκλους με φορτίο 40% του οριακού

Περιβαλλοντική προσαρμογή σε σταθερό φορτίο (μέγιστο %)	Αριθμός δειγμάτων					
	CFRP		AFRP		GFRP	
	3*	5*	3	5	3	5
0%	-	1	-	1	-	1
25%	1	1	1	1	1	1
40%	1	1	1	1	1	1
Έλεγχος (χωρίς περιβαλλοντική προσαρμογή)	2		2		2	

- Αριθμός των συνδυασμένων περιβαλλοντικών κύκλων.

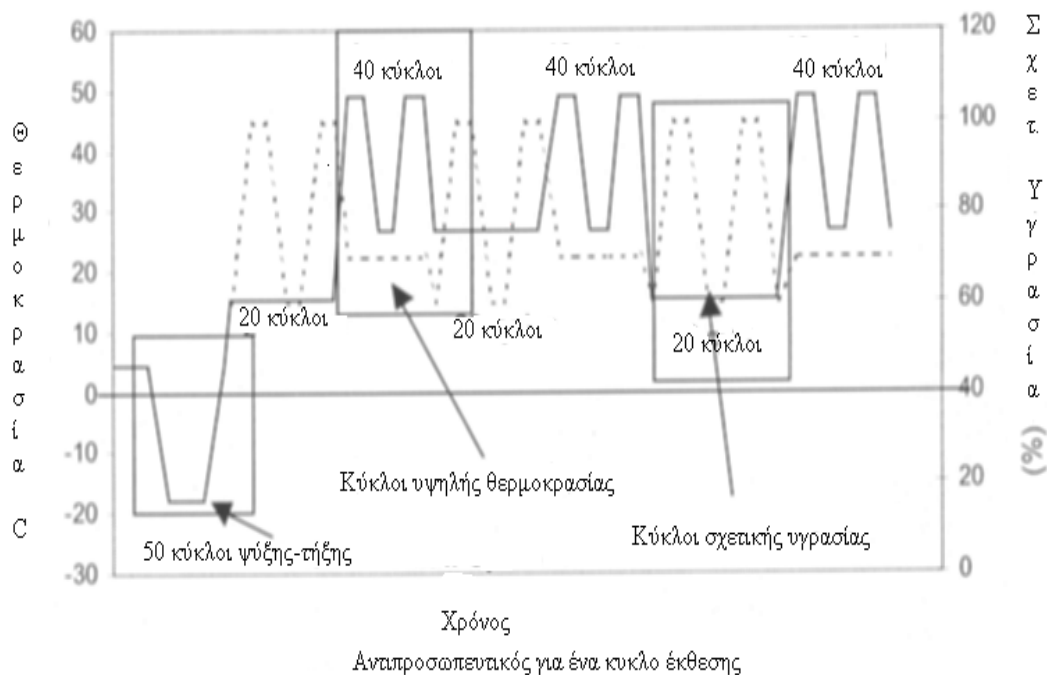
Πίνακας 4: Πρόγραμμα των πειραμάτων.

Ο κύκλος έκθεσης αποτελείται από ένα συνδυασμό κύκλων ψύξης-τήξης, κύκλων ακραίων θερμοκρασιών, κύκλων σχετικής υγρασίας και έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία. Οι κύκλοι αυτοί επιλέχθηκαν για να προσομοιώσουν τις καιρικές αλλαγές σε ένα περιβάλλον όπως είναι η ηπειρωτική Ευρώπη, ή οι μεσοδυτικές πολιτείες των Η.Π.Α., με ένα εσπευσμένο τρόπο. Κάθε ένας κύκλος ψύξης-τήξης αποτελούταν από ψύξη στους -17.8°C (0°F) για 50 λεπτά και τήξη στους 4.4°C (40°F) για 50 λεπτά. Η μεταβατική περίοδος μεταξύ της υψηλής και της χαμηλής θερμοκρασίας ήταν 20 λεπτά. Οι κύκλοι σχετικής υγρασίας (RH) έγιναν μεταξύ των ποσοστών υγρασίας 60% και 100%. Τα σχετικά ποσοστά υγρασίας 60% και 100% διατηρήθηκαν για 20 λεπτά το καθένα, ενώ η μεταβατική περίοδος μεταξύ της υγρασίας 100% και της υγρασίας 60% ήταν 30 λεπτά. Οι κύκλοι



σχετικής υγρασίας πραγματοποιήθηκαν σε σταθερές θερμοκρασίες 15.5° C (60° F) και 26.7° C (80° F). Οι κύκλοι πραγματοποιήθηκαν ως εξής: 50 κύκλοι ψύξης-τήξης, 20 κύκλοι RH σε σταθερή θερμοκρασία 15.5° C (60° F), πρώτη σειρά 40 κύκλων σε ακραίες θερμοκρασίες, 20 κύκλοι RH σε σταθερή θερμοκρασία 26.7° C (80° F), δεύτερη σειρά 40 κύκλων σε ακραίες θερμοκρασίες, 20 κύκλοι RH σε σταθερή θερμοκρασία 15.5° C (60° F), και τρίτη σειρά 40 κύκλων σε ακραίες θερμοκρασίες. Το σύστημα έκθεσης στις περιβαλλοντικές συνθήκες αναπαρίσταται σχηματικά στο Σχήμα 1

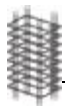
Σχήμα 1: Σύστημα έκθεσης στις περιβαλλοντικές συνθήκες



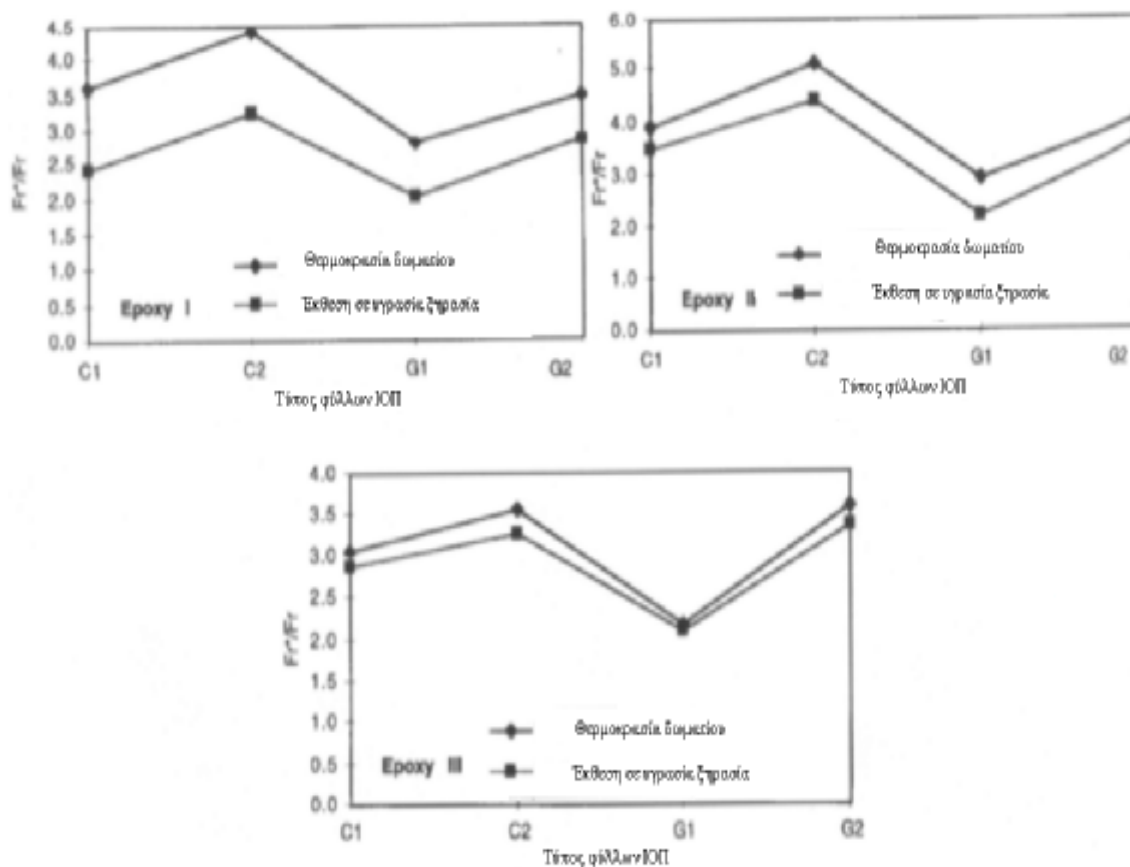
Αφού ολοκληρώθηκαν οι κύκλοι έκθεσης, βγάλαμε τις προσαρμοσμένες περιβαλλοντικά δοκούς και κόψαμε τον διαμήκη οπλισμό πριν γίνουν οι δοκιμές φόρτισης. Οι δοκοί δοκιμάστηκαν σε κάμψη δύο σημείων και καταγράφηκαν οι παραμορφώσεις και οι ανάπτυξη ρωγμών στα φύλλα ΙΟΠ. Τα στοιχεία της δοκιμής συλλέχθηκαν για να σχεδιασθούν διαγράμματα φορτίου παραμόρφωσης και να μελετηθεί η συμπεριφορά της αποκόλλησης των φύλλων. (Dr. J.J. Myers & S.S. Murthy, F. Micelli).

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Ακόμα και με τις ακραίες συνθήκες κύκλων υγρασίας/ ξηρασίας του **πρώτου πειράματος** οι δοκοί επέδειξαν σημαντική αύξηση στην ανάληψη φορτίων όταν τα φύλλα

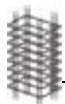


FRP συγκολλήθηκαν εξωτερικά με την εφελκόμενη πλευρά. Στις συνθήκες υγρασίας/ξηρασίας, η αναλογία του μέγιστου φορτίου κάμψης των ενισχυμένων δοκών συγκριτικά με τις δοκούς που δεν είχαν ενισχυθεί με φύλλα FRP ήταν μεταξύ 2.1 και 4.4, ανάλογα με τον τύπο των φύλλων FRP και τον τύπο της εποξικής κόλλας. Εντούτοις, η αύξηση του μέγιστου φορτίου μειώθηκε εξαιτίας της έκθεσης των δοκών σε συνθήκες υγρασίας/ξηρασίας. Η σύγκριση μεταξύ της αναλογίας του μέγιστου φορτίου κάμψης των ενισχυμένων δοκών συγκριτικά με τις δοκούς που δεν είχαν ενισχυθεί με φύλλα FRP σε συνθήκες υγρασίας/ξηρασίας και της αναλογίας των δοκών που εκτέθηκαν σε συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου φαίνεται στο Σχήμα 2.

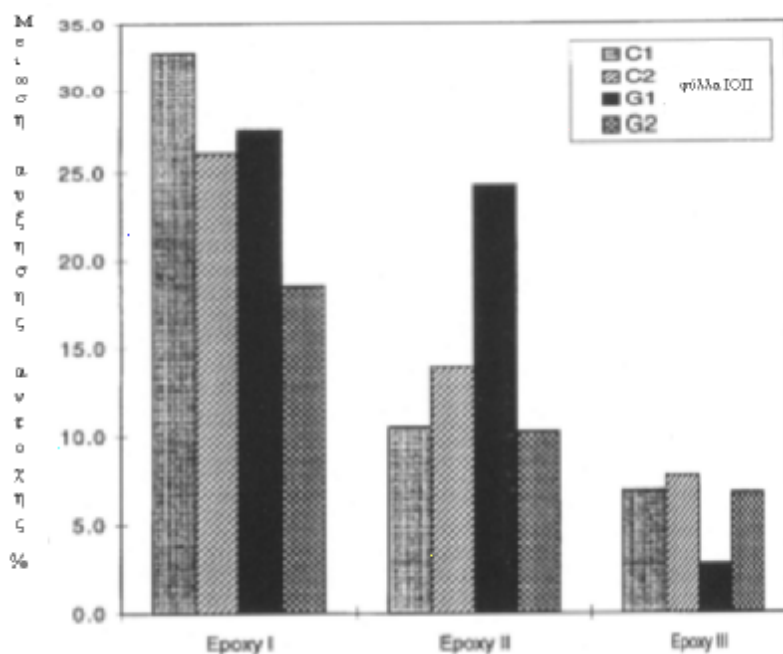


Σχήμα 2: Η αναλογία του μέγιστου φορτίου κάμψης των δοκών που είχαν ενισχυθεί με φύλλα FRP συγκριτικά με τις μη ενισχυμένες δοκούς, για διαφορετικούς τύπους φύλλων FRP.

Ήταν δύσκολο να καταλήξουμε σε κάποιο συμπέρασμα για το αν η μείωση στην αντοχή οφειλόταν στη φθορά του φύλλου FRP, αφού οι ίνες δεν έσπαζαν κατά την διαρροή των δοκών, αλλά ξεκολλούσαν στην ένωση των ινών με το σκυρόδεμα. Η ελάττωση στην αντοχή

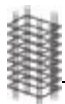


μπορεί να αποδοθεί στη φθορά μέσα στην διεπιφάνεια και στην συγκόλληση μεταξύ των ινών και του σκυροδέματος. Στο Σχήμα 3 φαίνεται η μείωση στην βελτίωση του φορτίου κάμψης εξαιτίας της έκθεσης των δειγμάτων σε συνθήκες υγρασίας/ξηρασίας, η οποία αντιπαραβλήθηκε με τις συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου. Στις δοκούς που συγκολλήθηκαν χρησιμοποιώντας εποξική κόλλα τύπου I παρατηρήθηκε η υψηλότερη μείωση στην αντοχή, μεταξύ 19 και 33%· στις δοκούς που συγκολλήθηκαν χρησιμοποιώντας εποξική κόλλα τύπου II παρατηρήθηκε μια μείωση στην αντοχή μεταξύ 10 και 24%· τέλος, στις δοκούς που συγκολλήθηκαν χρησιμοποιώντας εποξική κόλλα τύπου III παρατηρήθηκε μια μείωση μεταξύ 3 και 8%. Υπήρξε μια αύξηση στο φορτίο κάμψης των μη ενισχυμένων δοκών από σκυρόδεμα εξαιτίας της έκθεσής τους σε συνθήκες υγρασίας/ξηρασίας. Το φορτίο κάμψης αυξήθηκε κατά ένα ποσοστό μέχρι και 23%, από 2.2 έως 2.7 kN. Η βελτίωση στην αντοχή αποδίδεται στην επιτάχυνση της διαδικασίας παλαιώσης εξαιτίας της υγρασίας κατά 90% και της υψηλής θερμότητας, η οποία έφθανε τους 35° C.

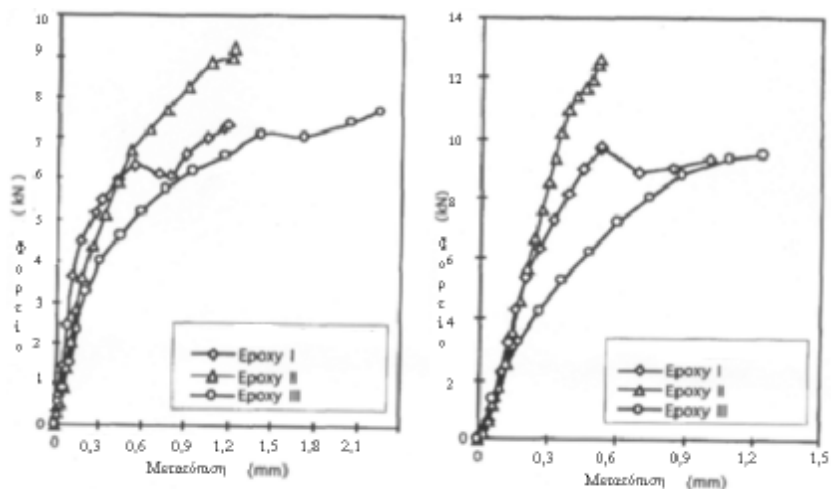


Σχήμα 3: Η ποσοστιαία μείωση στην αντοχή εξαιτίας της έκθεσης των δοκών σε συνθήκες υγρασίας/ξηρασίας.

Στο σχήμα 4(α-δ) παρουσιάζονται οι τυπικές καμπύλες μετατόπισης-φορτίου σε ενδιάμεσο χρονικό διάστημα για όλα τα ενισχυμένα δείγματα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι δοκοί που είχαν συγκολληθεί με φύλλα FRP χρησιμοποιώντας εποξική κόλλα τύπου III

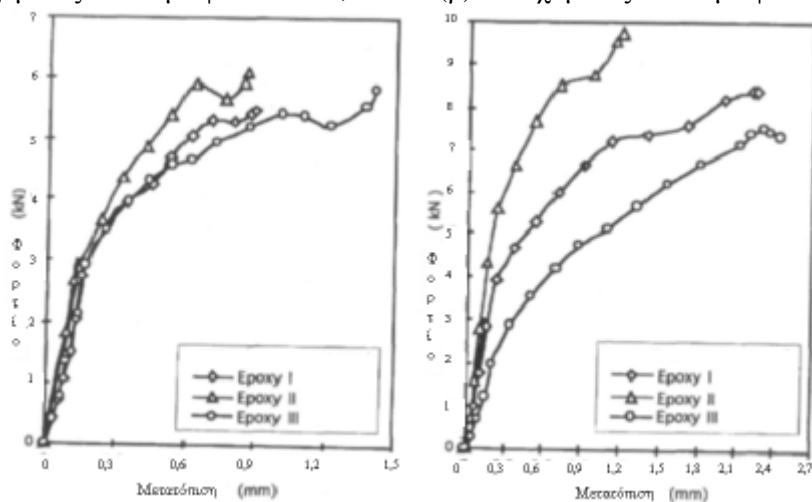


εμφάνισαν μέγιστη μετατόπιση στις συνθήκες υγρασίας/ξηρασίας, συγκριτικά με τις δοκούς που είχαν συγκολληθεί με φύλλα FRP χρησιμοποιώντας εποξική κόλλα τύπου I ή II. Οι δοκοί που είχαν συγκολληθεί με φύλλα FRP χρησιμοποιώντας εποξική κόλλα τύπου II παρουσίασαν τη μεγαλύτερη μείωση ως προς την μετατόπιση αλλά εμφάνισαν την υψηλότερη ανάληψη φορτίου σε σχέση με τους άλλους τύπους εποξικής κόλλας. Τα στοιχεία από την εκτέλεση του 2^{ου} πειράματος συλλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για να κατασκευαστούν, τα διαγράμματα φορτίου-παραμόρφωσης έτσι ώστε να περιγράψουμε τη συμπεριφορά των φύλλων και των δοκών.



(α) Ενισχυμένες δοκοί με φύλλα FRP, C1.

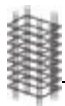
(β) Ενισχυμένες δοκοί με φύλλα FRP, C2.



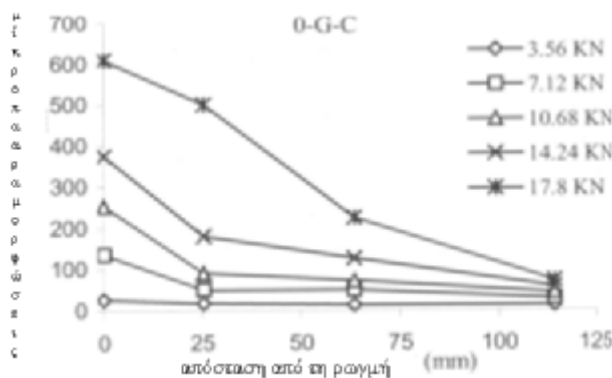
(γ) Ενισχυμένες δοκοί με φύλλα FRP, G1.

(δ) Ενισχυμένες δοκοί με φύλλα FRP, G2.

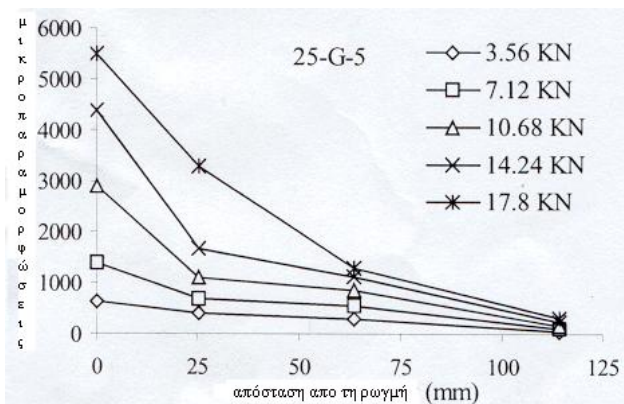
Σχήμα 4: Η τυπική συμπεριφορά των δειγμάτων που εκτέθηκαν σε συνθήκες υγρασίας/ξηρασίας.



Η εξασθένηση στην ένωση μπορεί να γίνει αντιληπτή στα δείγματα ελέγχου αλλά και στα δείγματα που είχαν προσαρμοστεί περιβαλλοντικά, όπως φαίνεται στα σχήματα 5 και 6, όπως ισχύει στο παρακάτω αντιπροσωπευτικό παράδειγμα. Τα σχήματα 5 και 6 συγκρίνουν τις παραμορφώσεις στα φύλλα FRP όταν αυξάνεται το φορτίο. Από τα σχήματα αυτά μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι οι παραμορφώσεις αυξάνονται με πολύ πιο γρήγορο ρυθμό στο δείγμα 25-G-5 συγκριτικά με το δείγμα ελέγχου 0-G-C, εξαιτίας της πρώιμης αποκόλλησης του φύλλου στο δείγμα που είχε προσαρμοστεί περιβαλλοντικά. Αυτό δείχνει εξασθένηση στην ένωση του φύλλου FRP με το σκυρόδεμα.

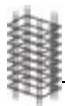


Σχήμα 5: Παραμορφώσεις στα φύλλα FRP (αντιπροσωπευτική) όσο αυξάνεται το φορτίο.

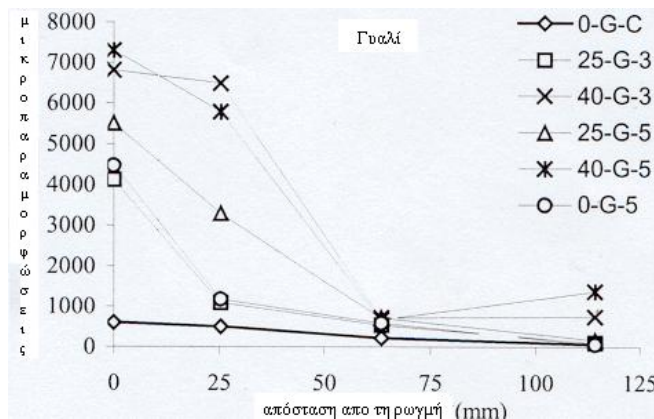


Σχήμα 6: Παραμορφώσεις στα φύλλα FRP (αντιπροσωπευτική) όσο αυξάνεται το φορτίο.

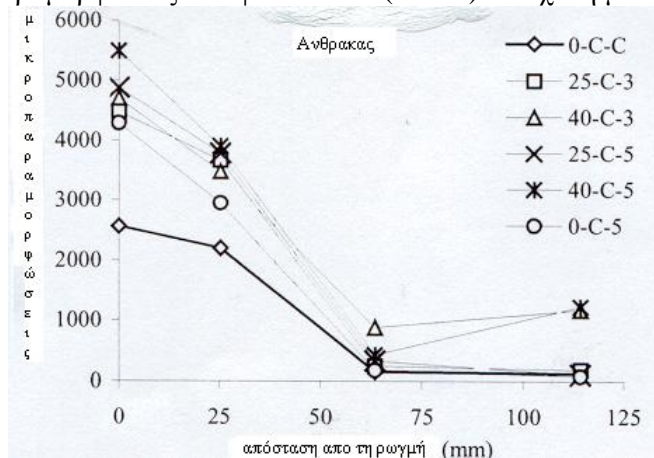
Για να έχουμε μια ευρύτερη εικόνα για την εξασθένηση της ένωσης μεταξύ των φύλλων FRP με το σκυρόδεμα, οι παραμορφώσεις στα φύλλα FRP έχουν σχεδιαστεί με την απόσταση από τη ρωγμή. Εδώ επιλέχθηκε σαν σημείο αναφοράς για το συγκεκριμένο ζήτημα ένα αντιπροσωπευτικό επίπεδο που υπερβαίνει τη λειτουργική συνθήκη περίπου κατά 60% του μέγιστου φορτίου. Τα σχήματα 7, 8 και 9 απεικονίζουν τις καταπονήσεις στα



ενισχυμένα δείγματα με φύλλα ΙΟΠ. Κάθε ένα σχήμα συγκρίνει τις παραμορφώσεις για τα δείγματα ελέγχου αλλά και στα δείγματα που είχαν προσαρμοστεί περιβαλλοντικά στο αντιπροσωπευτικό φορτίο. Τα δείγματα που είχαν προσαρμοστεί για 5 συνδυασμένους περιβαλλοντικούς κύκλους σε 40% παρατεταμένο μέγιστο φορτίο παρουσίασαν τη μεγαλύτερη εξασθένηση σε ότι αφορά την συνάφεια. Σε όλες τις περιπτώσεις των δειγμάτων ελέγχου άνθρακα, ύαλου και αραμιδίου (CFRP, GFRP, AFRP) εμφανίστηκαν τα χαμηλότερα



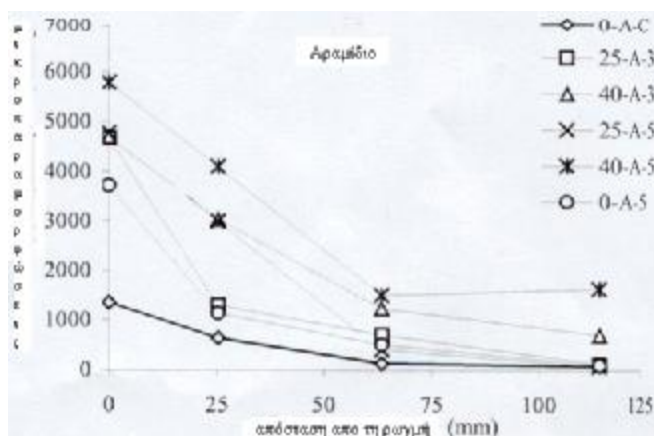
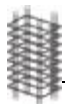
Σχήμα 7: Παραμορφώσεις στα φύλλα FRP (υάλου) σε σχέση με τη Θέση τους.



Σχήμα 8: Παραμορφώσεις στα φύλλα FRP (άνθρακος) σε σχέση με τη Θέση τους.

επίπεδα μικροπαραμορφώσεων. Προφανώς, κάποιο επίπεδο εξασθένησης μεταξύ των φύλλων FRP και του σκυροδέματος συνέβη εξαιτίας της περιβαλλοντικής προσαρμογής ή της παλαίωσης της κατασκευής.

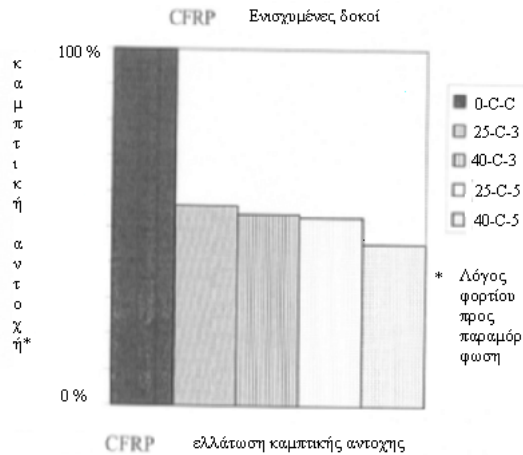
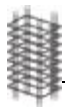
Η εξασθένηση μεταξύ της ένωσης των φύλλων FRP και του σκυροδέματος είχε σαν αποτέλεσμα την εξασθένηση ως προς την αντοχή στην κάμψη του συστήματος. Η μείωση



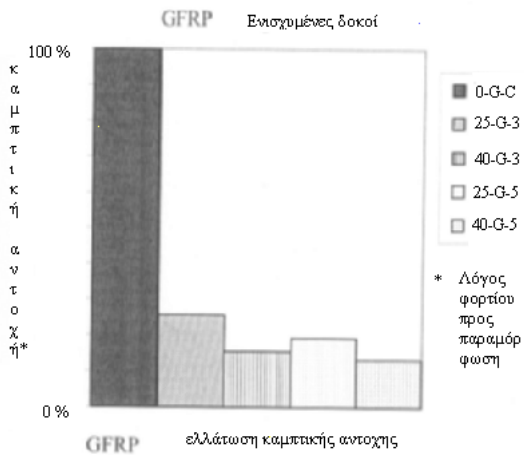
Σχήμα 9: Παραμορφώσεις στα φύλλα FRP (αραμιδίου) σε σχέση με τη Θέση τους.

αυτή ως προς την αντοχή στην κάμψη μπορεί να αποδοθεί στην απόδοση της ένωσης παρά στην ένταση των φύλλων FRP υπό μια πιο συμβατική έννοια. Τα σχήματα 10, 11 και 12 απεικονίζουν τη σχετική αντοχή στην κάμψη των δειγμάτων ελέγχου αλλά και των δειγμάτων που είχαν προσαρμοστεί περιβαλλοντικά, τα οποία είχαν ενισχυθεί με φύλλα CFRP, AFRP και GFRP αντίστοιχα πάνω στη ρωγμή. Στα προαναφερόμενα σχήματα φαίνεται η αναλογία του φορτίου προς την παραμόρφωση των διαφόρων δειγμάτων που είχαν προσαρμοστεί περιβαλλοντικά και του δείγματος ελέγχου. Και πάλι για λόγους συνεπείας, η αντοχή υπολογίζεται με ένα αντιπροσωπευτικό φορτίο της τάξης περίπου 60% του μέγιστου φορτίου για όλα τα δείγματα. Η εξασθένιση στην αντοχή της κάμψης απεικονίζεται με την πλήρη αναλογία της αντοχής στην κάμψη του δείγματος ελέγχου. Μπορεί να διαπιστωθεί από τα σχήματα ότι τα ενισχυμένα με GFRP δείγματα που είχαν προσαρμοστεί περιβαλλοντικά είχαν εξασθενήσει περισσότερο από τα ενισχυμένα με AFRP και CFRP δείγματα που είχαν προσαρμοστεί περιβαλλοντικά όταν τα συγκρίναμε με τα αντίστοιχα δείγματα ελέγχου.

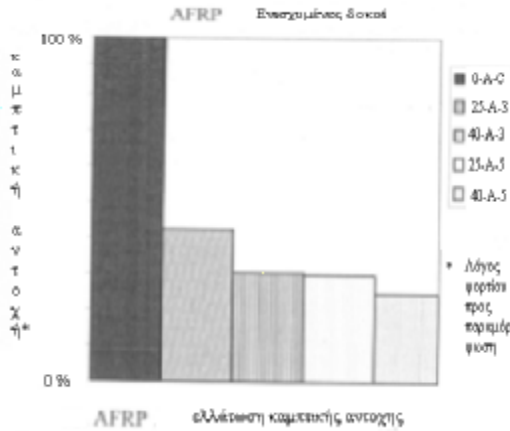
Για λόγους σύγκρισης, το δείγμα 40-C-5 έχασε περίπου 55% της ανθεκτικότητας στην κάμψη συγκριτικά με το δείγμα 0-C-G, το οποίο όπως και το δείγμα 40-G-5 έχασε περίπου 85% της ανθεκτικότητας στην κάμψη συγκρινόμενο με το δείγμα 0-G-C. Φυσικά, αυτή η συγκριτική σχέση της «αντοχής στην κάμψη» ποικίλλει ανάλογα με το μήκος που έχει η κόλληση του φύλλου. Σε γενικές γραμμές, όσο η απόσταση αυξάνεται από το ράγισμα, αυτή η ανομοιότητα μειώνεται ανάμεσα στα δείγματα που έχουν προσαρμοστεί περιβαλλοντικά.



Σχήμα 10



Σχήμα 11

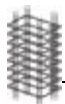


Σχήμα 12

Σχήματα 10,11,12: Εξασθένηση της ανθεκτικότητας στην κάμψη στα φύλλα CFRP,GFRP,AFRP

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Βάσει των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η έκθεση σε περιβαλλοντικές επιδράσεις επιδρά αρνητικά στη απόδοση των φύλλων ΙΟΠ με το σκυρόδεμα και στα μηχανικά χαρακτηριστικά των ενισχυμένων δοκών. Οι δοκοί που ενισχύθηκαν με διάφορους τύπους ΙΟΠ εμφάνισαν μια εξασθένηση στην καμπτική αντοχή και γενικότερα στην ικανότητα ανάληψης φορτίων μέσω της εξασθένησης της ένωσης των φύλλων ΙΟΠ με την επιφάνεια ύστερα από την έκθεσή τους στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Η μείωση που παρατηρείται στην αντοχή των ενισχυμένων δοκών αλλά και των φύλλων ΙΟΠ εν μέρει ποσοτικοποιήθηκε κατά την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και μπορεί να συμβάλει στην μελέτη και δημιουργία συντελεστών ασφαλείας για τη χρήση φύλλων ΙΟΠ στις επισκευές και ενισχύσεις, ανάλογα με το είδος των χρησιμοποιούμενων ΙΟΠ και τις επικρατούσες συνθήκες. Παρατηρήθηκε πως το φαινόμενο



της εξασθένησης της ενίσχυσης-επισκευής οφείλεται κυρίως στην μείωση της συνάφειας μεταξύ των φύλλων ΙΟΠ και της επιφάνειας σκυροδέματος. Συνεπώς η επιλογή της εποξικής κόλλας είναι καθοριστική για την απόδοση της επισκευής μέσω της εξασφάλισης της απαιτούμενης συνάφειας. Ο προαναφερόμενος ισχυρισμός αποδεικνύεται και από τα αποτελέσματα του πρώτου πειράματος όπου στα δείγματα που χρησιμοποιήθηκε η εποξική κόλλα τύπου Π εμφάνισαν καλύτερη μηχανική συμπεριφορά. Μάλιστα επειδή οι περιβαλλοντικές συνθήκες του πρώτου πειράματος προσομοίωναν τις συνθήκες θαλάσσιου περιβάλλοντος τα αποτελέσματα αποκτούν χαρακτήρα τοπικό σε μια χώρα όπως η Ελλάδα με την απέραντη ακτογραμμή της.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Durability Characteristics of Concrete Beams Externally Bonded with FRP Composite Sheets. Cement and Concrete Composites 19(1997) 351-358,1997 Elsevier Science Ltd, Houssam A. Toutanji Department Of Civil and Environmental Engineering, University of Alabama in Huntsville, William Gomez University of Puerto Rico, Department of Civil Engineering, Mayaguez

2. Effect of combined environmental cycles on the bond of FRP sheets to concrete. Proceedings-Composites In Construction, 2001 International Conference, Porto, Portugal, October 10-12, 2001, Dr. J.J. Myers & S.S. Murthy University of Missouri, Rolla, Missouri, USA, F. Micelli, University of Lecce, Lecce, Italy.

