

## ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΑΠΟ ΓΥΑΛΙ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ – ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΛΚΑΛΙΚΟΤΗΤΑΣ

**ΛΕΜΗΣ ΣΩΤΗΡΗΣ**

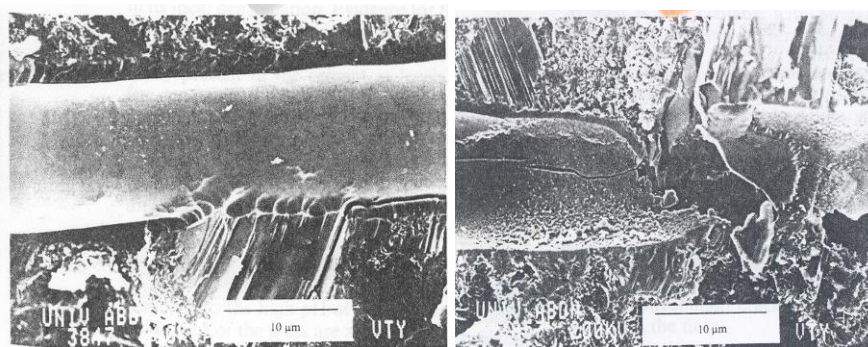
Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός Πανεπιστημίου του Sheffield, Ακαδημαϊκός Υπότροφος Π.Π., [sdemis@upatras.gr](mailto:sdemis@upatras.gr)

### Περίληψη

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη πειραματικών πρωτοκόλλων και προγνωστικών μοντέλων για τη διερεύνηση της επίδρασης της αλκαλικότητας σκυροδέματος στην ανθεκτικότητα και μηχανικές ιδιότητες των ινοπλισμένων πολυμερών από γυαλί (Γ-ΙΟΠ). Αν και η επιστημονική κοινότητα συνηγορεί στο ότι το έντονα αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος αποτελεί έναν ισχυρό διαβρωτικό παράγοντα για τα υλικά αυτά, δεν είναι ακόμα ξεκάθαρο με τι ρυθμό και σε ποιο βαθμό η αλκαλικότητα επηρεάζει τη συμπεριφορά τους. Τυχόν μείωση της αρχικής αλκαλικότητας του σκυροδέματος τι επιπτώσεις έχει στις μηχανικές τους ιδιότητες? Ερωτήματα που η παρούσα εργασία προσπαθεί να απαντήσει.

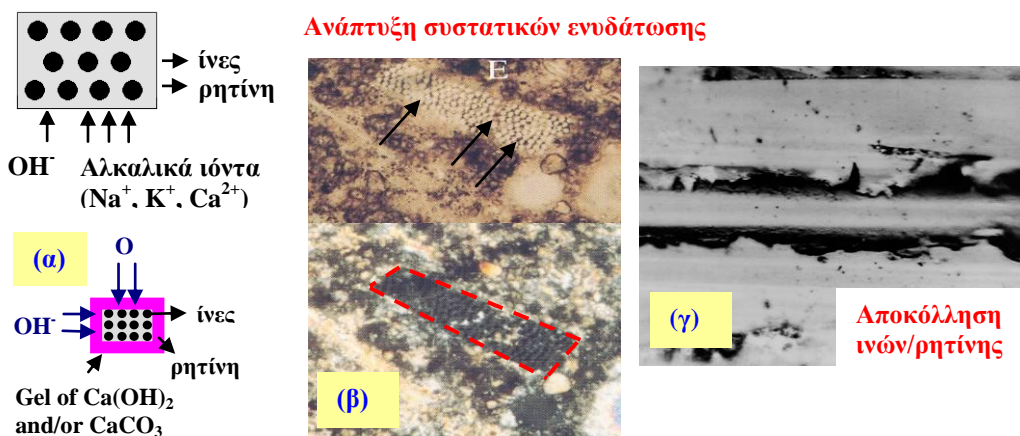
### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πληθώρα ερευνητικών αποτελεσμάτων από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα, αναδεικνύει ότι το έντονα αλκαλικό περιβάλλον αποτελεί ισχυρό διαβρωτικό παράγοντα για τα Γ-ΙΟΠ [1-3]. Πιο προσεκτική αξιολόγηση των διαθέσιμων ευρημάτων, δείχνει ότι μεγάλη μερίδα των σχετικών πειραματικών ερευνών έλαβε χώρα μέσω έκθεσης ράβδων Γ-ΙΟΠ σε χημικά διαλύματα εξομοίωσης του νερού των πόρων του σκυροδέματος (με ή χωρίς επιβαλλόμενη τάση ή/και αύξηση της θερμοκρασίας) ή μέσω έκθεσης γυμνών ινών υάλου τόσο σε δοκίμια σκυροδέματος, όσο και σε χημικά διαλύματα, για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Το πώς διαβρώνονται οι ίνες υάλου, μέσω της επίθεσης αλκαλικών ιόντων την υδρόλυση και διάσπαση των πυριτικών δεσμών (siloxane bonds) στη δομή του υάλου και της ανάπτυξης συστατικών ενυδάτωσης (όταν αυτά βρίσκονται σε δοκίμια σκυροδέματος) σε αυτά τα περιβάλλοντα έχει διερευνηθεί αρκετά (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Διάβρωση ινών υάλου στο σκυρόδεμα [1]

Το ζητούμενο είναι, πως το έντονα αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος επηρεάζει το σύνθετο υλικού Γ-ΙΟΠ. Αν και τα σχετικά πειραματικά αποτελέσματα, όπως θα αναδειχθεί στη συνέχεια, είναι δύσκολο να συγκριθούν, φαίνεται ότι οι μηχανισμοί διάβρωσης επιγραμματικά μπορούν να ανακεφαλαιωθούν ως ο συνδυασμός των εξής παραγόντων [1]: (α) διείδυση υγρασίας με αποτέλεσμα υδρόλυση και εξασθένηση των δεσμών των πολυμερικών αλυσίδων των ΙΟΠ, εξασθένηση συνάφειας ίνας/ρητίνης, αποκόλληση ινών (Σχήμα 2α), (β) επίθεση από αλκαλικά ιόντα ( $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) και από την ανάπτυξη των συστατικών της ενυδάτωσης στο σκυρόδεμα (Σχήμα 2β) και (γ) επίδραση στρώματος  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  και  $\text{CaCO}_3$  στην επιφάνεια των ινοπλισμένων πολυμερών και διείδυση ιόντων  $\text{Ca}^{++}$  στην διεπιφάνεια ανθρακονημάτων/ρητίνης (Σχήμα 2γ).

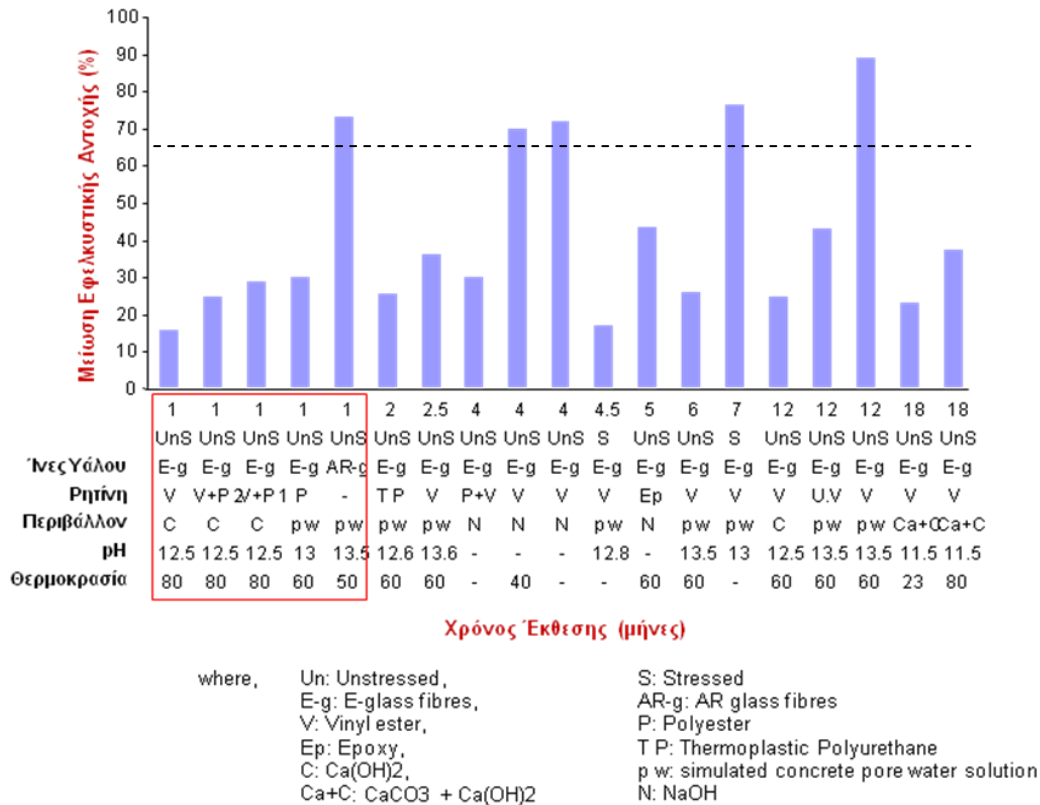


Σχήμα 2: Επίδραση αλκαλικού περιβάλλοντος σκυροδέματος στα Γ-ΙΟΠ [1]

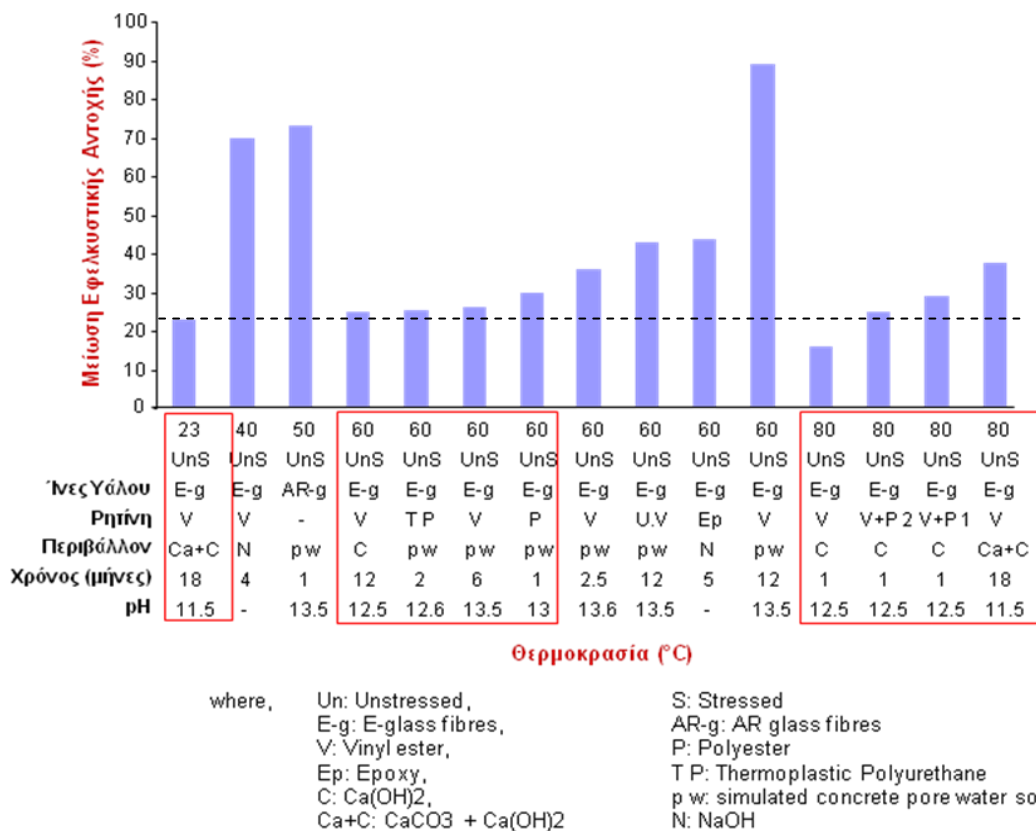
Διερευνώντας τις υπάρχουσες πειραματικές διατάξεις στη διεθνή βιβλιογραφία και στα σχετικά κανονιστικά πλαίσια, για την επίδραση της αλκαλικότητας στην ανθεκτικότητα των ΙΟΠ, φάνηκε η μη ύπαρξη ενός κοινά αποδεκτού πειραματικού πρωτοκόλλου. Η κάθε ερευνητική ομάδα αναπτύσσει το δικό της πρωτόκολλο ακόμα και για το ίδιο επιθετικό περιβάλλον (π.χ. αλκαλικό διάλυμα με pH 13). Επίσης η μη ύπαρξη ομοφωνίας ως προς το υπό εξέταση υλικό (είδος ινών υάλου, τύπος ρητίνης), καθώς και θέματα εταιρικής εμπιστευτικότητας (σχετικές με τα υπό εξέταση υλικά) δυσχεραίνουν ακόμα περισσότερο την ανάλυση των διαθέσιμων ερευνητικών αποτελεσμάτων. Για τους λόγους αυτούς, όπως αναδεικνύεται στα Σχήματα 3-6, πολλές φορές δεν κατέστη δυνατή η διεξαγωγή κοινών συμπερασμάτων ή μοτίβων όσον αφορά την επίδραση παραμέτρων στη μείωση της αντοχής των Γ-ΙΟΠ.

Για παράδειγμα, αναδεικνύεται (Σχήμα 3) ότι αν και συνεχόμενη έκθεση σε αλκαλικά διαλύματα θα έπρεπε να οδηγεί σε μείωση της εφελκυστικής αντοχής των Γ-ΙΟΠ, δεν διακρίθηκε κάποιο ομοιόμορφο μοτίβο στη μείωση της σε βάθος χρόνου. Μελετώντας την επίδραση της θερμοκρασίας (Σχήμα 4) διαπιστώθηκε ότι αν και η «φθορά» ήταν πιο έντονη όταν η θερμοκρασία αυξήθηκε από τους 23 στους 60 °C, σε ορισμένες περιπτώσεις παρόμοια μείωση αντοχής παρατηρήθηκε στους 23, 60 and 80 °C. Σε γενικές γραμμές η εφελκυστική αντοχή των Γ-ΙΟΠ μειώθηκε με αύξηση της αλκαλικότητας (Σχήμα 5), με το αλκαλικό διάλυμα με pH 13.5, εξομοιώνοντας την αλκαλικότητα του υγιούς σκυροδέματος να δείχνει να αποτελεί το πιο δραστικό επιθετικό περιβάλλον. Τέλος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία (Σχήμα 6) οι βυνιλεστερικές ρητίνες παρείχαν καλύτερη προστασία στις ίνες σε σχέση με εποξιδικές ή πολυεστερικές.

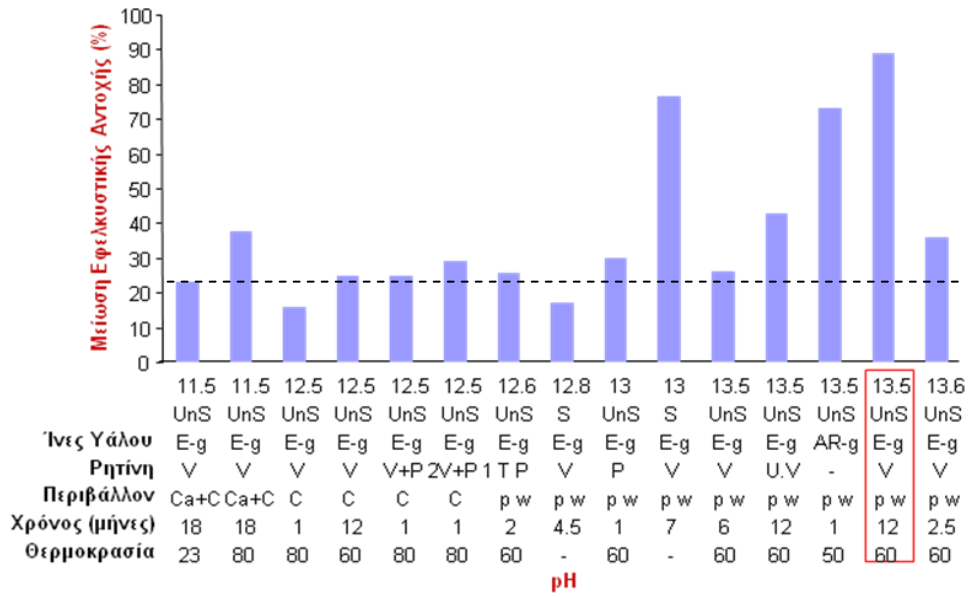
Φαίνεται λοιπόν, ότι η πλειονότητα των ερευνητικών εργασιών βασίζεται στην έκθεση ράβδων Γ-ΙΟΠ σε αλκαλικά διαλύματα εξομοίωσης του νερού των πόρων του σκυροδέματος ή σε κορεσμένα διαλύματα Ca(OH)<sub>2</sub>, NaOH και όχι στην εισαγωγή ράβδων στο σκυρόδεμα. Παρόλα αυτά, η επίδραση των παραπάνω αλκαλικών περιβαλλόντων στην πτώση της εφελκυστικής αντοχής των Γ-ΙΟΠ σε συνθήκες αυξημένης αλκαλικότητας και θερμοκρασίας, είναι αρκετά σημαντική και πρέπει να εξεταστεί περαιτέρω.



Σχήμα 3: Επίδραση χρόνου έκθεσης σε αλκαλικά διαλύματα στην εφελκυστική αντοχή Γ-ΙΟΠ [1,4]

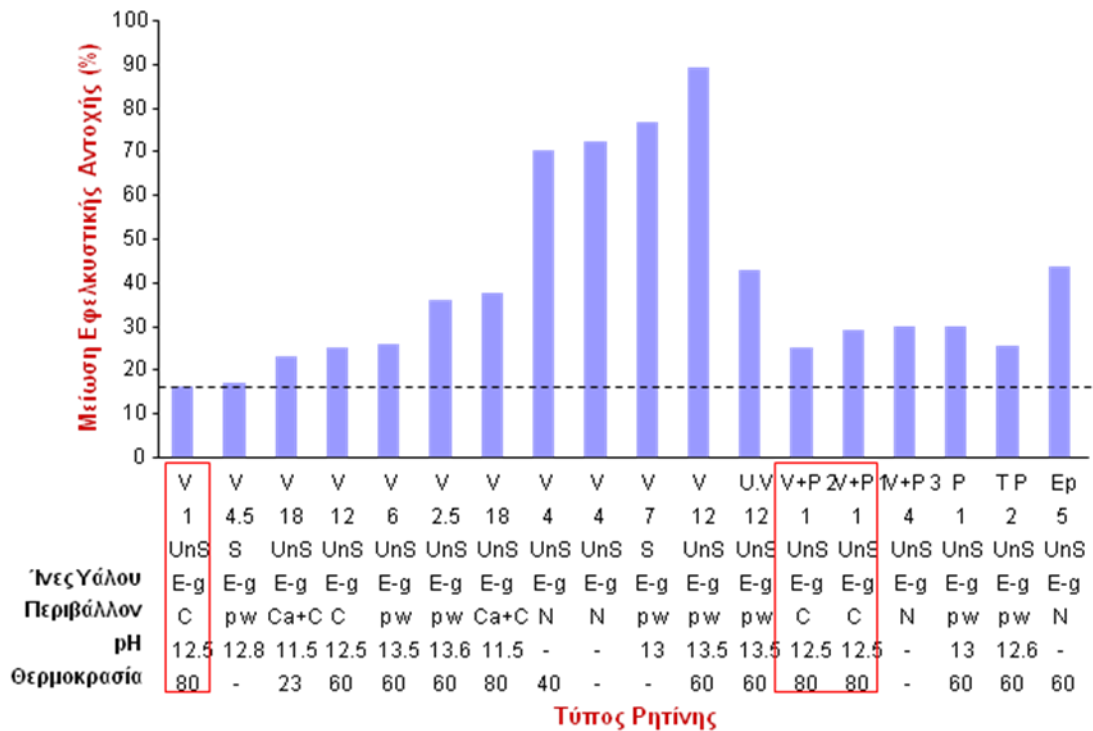


Σχήμα 4: Επίδραση θερμοκρασίας έκθεσης αλκαλικών διαλυμάτων στην εφελκυστική αντοχή Γ-ΙΟΠ [1,4]



where, Un: Unstressed, S: Stressed  
 E-g: E-glass fibres, AR-g: AR glass fibres  
 V: Vinyl ester, P: Polyester  
 Ep: Epoxy, T P: Thermoplastic Polyurethane  
 C: Ca(OH)<sub>2</sub>, ρ w: simulated concrete pore water solution  
 NaOH Ca+C: CaCO<sub>3</sub> + Ca(OH)<sub>2</sub>

Σχήμα 5: Επίδραση αλκαλικότητας στην εφελκυστική αντοχή Γ-ΙΟΠ [1,4]



where, Un: Unstressed, S: Stressed  
 E-g: E-glass fibres, AR-g: AR glass fibres  
 V: Vinyl ester, P: Polyester  
 Ep: Epoxy, T P: Thermoplastic Polyurethane  
 C: Ca(OH)<sub>2</sub>, ρ w: simulated concrete pore water solution  
 NaOH Ca+C: CaCO<sub>3</sub> + Ca(OH)<sub>2</sub>

Σχήμα 6: Επίδραση τύπου ρητίνης [1,4]

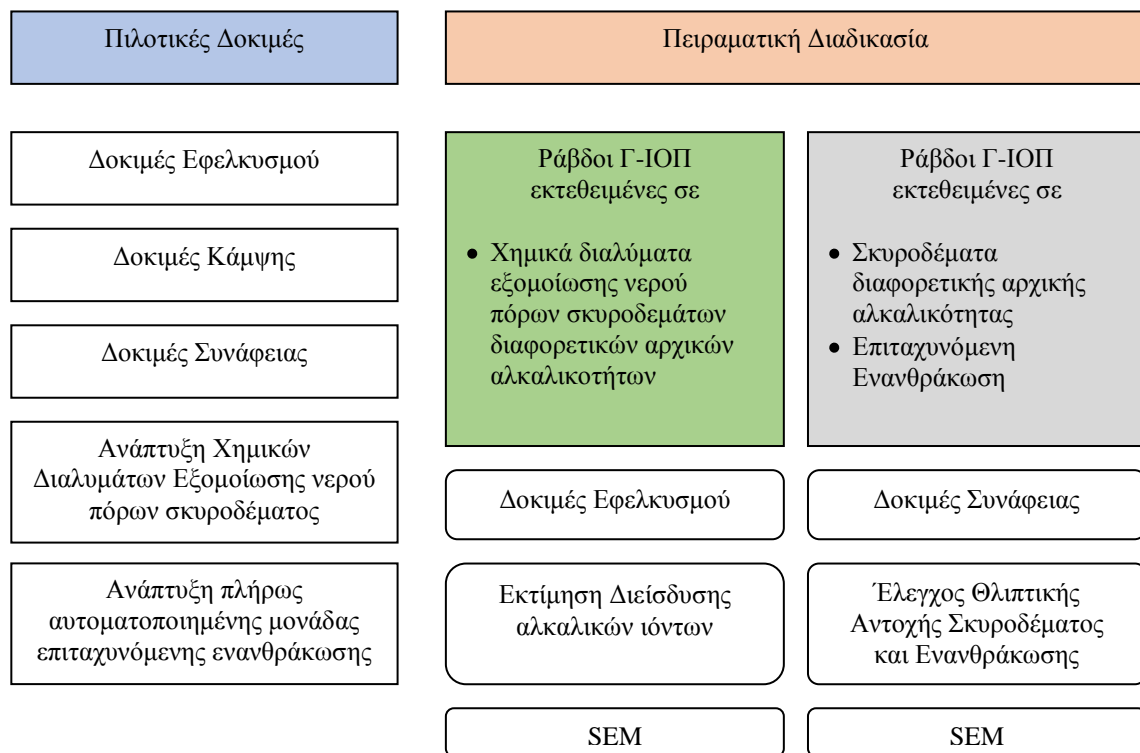
Από τη στιγμή λοιπόν που, σύμφωνα με τα έως τώρα ευρήματα, η αλκαλικότητα του σκυροδέματος είναι ισχυρός διαβρωτικός παράγοντας για τα Γ-ΙΟΠ, μείωση της αρχικής αλκαλικότητας σκυροδέματος τι επιπτώσεις έχει τόσο στην ανθεκτικότητα τους όσο και στις μηχανικές τους ιδιότητες? Ποιος ο ρυθμός της υποβάθμισης τους (degredation rates)?

Προκειμένου να απαντηθούν τα παραπάνω ερωτήματα, αποφασίστηκε να διερευνηθεί διεξοδικά η επίδραση μειωμένων συνθηκών αρχικής αλκαλικότητας σκυροδέματος στην ανθεκτικότητα των Γ-ΙΟΠ. Δεδομένης της μη ύπαρξης κοινά αποδεκτής πειραματικής διαδικασίας ή κάποιου κανονιστικού πλαισίου, έπρεπε πρώτα να δημιουργηθεί η σχετική πειραματική διαδικασία.

Εν κατακλείδι, ο στόχος της παρούσας έρευνας είναι η δημιουργία πειραματικών πρωτοκόλλων για τη διερεύνηση της ανθεκτικότητας των Γ-ΙΟΠ στο σκυρόδεμα και η αξιοποίηση τους για τη δημιουργία προγνωστικών μοντέλων της επίδρασης της αλκαλικότητας στις μηχανικές ιδιότητες των Γ-ΙΟΠ σε βάθος χρόνου.

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Το σύνολο των πειραματικών δοκιμών αποικονεύονται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7: Πειραματική Διαδικασία

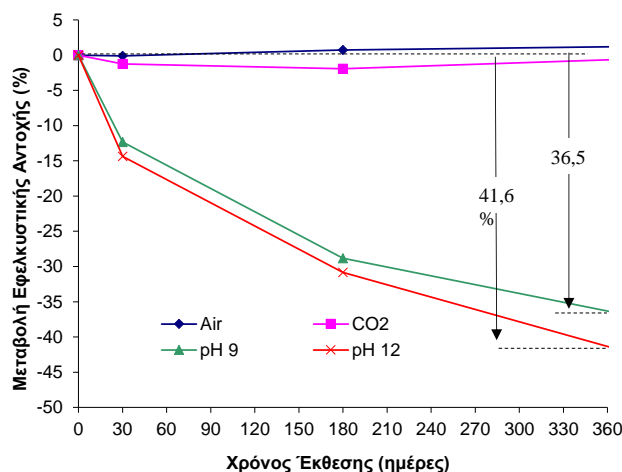
Σαν μέσα μείωσης της αρχικής αλκαλικότητας σκυροδέματος επιλέχθηκαν (α) η χρήση τσιμεντών με ποζολανικά υλικά (ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνων) και (β) η έκθεση δοκιμίων σε συνθήκες επιταχυνόμενης ενανθράκωσης. Ράβδοι τετραγωνικής διατομής οπλισμού Γ-ΙΟΠ (από ίνες γυαλιού Ε σε βινυλεστερική ρητίνη) σε δοκίμια σκυροδέματος με τσιμεντά διαφορετικής αρχικής αλκαλικότητας (Portland CEM I και ποζολανικά) εισήχθησαν σε θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης για χρονικό διάστημα έως 2 χρόνια. Ταυτόχρονα, ράβδοι Γ-ΙΟΠ εκτέθηκαν σε χημικά διαλύματα εξομοίωσης του νερού των πόρων του σκυροδέματος με διαφορετικά pH, χαρακτηριστικά της αλκαλικότητας του σκυροδέματος πριν και μετά τη δράση της ενανθράκωσης. Ο έλεγχος της εφελκυστικής αντοχής των Γ-ΙΟΠ (για τα δοκίμια εκτεθειμένα στα χημικά διαλύματα) και της τάσης συνάφειας τους με το σκυρόδεμα επιλέχθηκαν για να προσδιοριστούν τυχών μεταβολές στην συμπεριφορά τους σε

επίπεδο μηχανικών ιδιοτήτων. Παράλληλα, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και το βάθος ενανθράκωσης μετρήθηκαν πειραματικά σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Ένας πλήρως αυτοματοποιημένος περιβαλλοντολογικός θάλαμος επιταχυνόμενης ενανθράκωσης σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε για τις ανάγκες της ερευνητικής διαδικασίας, κατά τη διάρκεια των πιλοτικών δοκιμών. Επίσης στα πλαίσια των τελευταίων, ελέγχθηκαν τρόποι εκτίμησης της αντοχής των δοκιμίων Γ-ΙΟΠ και προετοιμάστηκαν τα χημικά διαλύματα διαφορετικών αλκαλικιτών. Αξίζει να σημειωθεί, ότι σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πιλοτικών δοκιμών, για λόγους οικονομίας αλλά και ταχύτητας χρόνου λόγω του μεγάλου αριθμού των δοκιμίων, όλες οι δοκιμές αποφασίστηκε να γίνουν με γυμνά δοκίμια στις δαγκάνες της εργαστηριακής μηχανής. Μέσω ανάλυσης και υπολογισμού των θλιπτικών τάσεων που εισάγουν οι δαγκάνες στη ράβδο, υπολογίστηκε οι επίδραση τους στις τάσεις στον διαμήκη άξονα των Γ-ΙΟΠ μέσω του κριτηρίου Tsai-Hill. Εκτιμήθηκε ότι η εφελκυστική αντοχή των γυμνών δοκιμίων είναι της τάξης του 90% της αντοχής των δοκιμίων με προστατευτικά μέσα στα άκρα τους.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΧΗΜΙΚΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα από την έκθεση των ράβδων Γ-ΙΟΠ στα αλκαλικά διαλύματα, δείχνουν ότι η εφελκυστική αντοχή τους μειώθηκε σημαντικά έως 41.6% (Σχήμα 8).

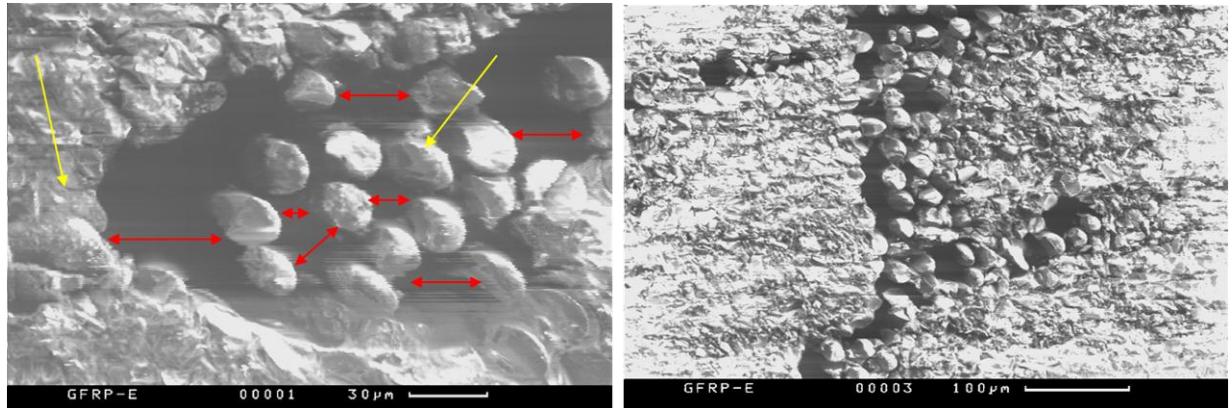


Σχήμα 8: Μεταβολή Εφελκυστικής Αντοχής Γ-ΙΟΠ μετά από έκθεση σε αλκαλικά διαλύματα

Η μείωση αυτή αποδόθηκε στην έντονη επίδραση των αλκαλικών ιόντων και υγρασίας του χημικού διαλύματος στη διεπιφάνεια ινών/ρητίνης και πιο συγκεκριμένα στην υδρόλυση της ρητίνης λόγω ιόντων  $\text{OH}^-$ . Το αποτέλεσμα αυτό δεν μας παραξενεύει και κατά κάποιο τρόπο αναδεικνύει την ευπάθεια συγκεκριμένων τύπων ρητινών παρουσία υγρασίας, φαινόμενο γνωστό και αρκετά μελετημένο.

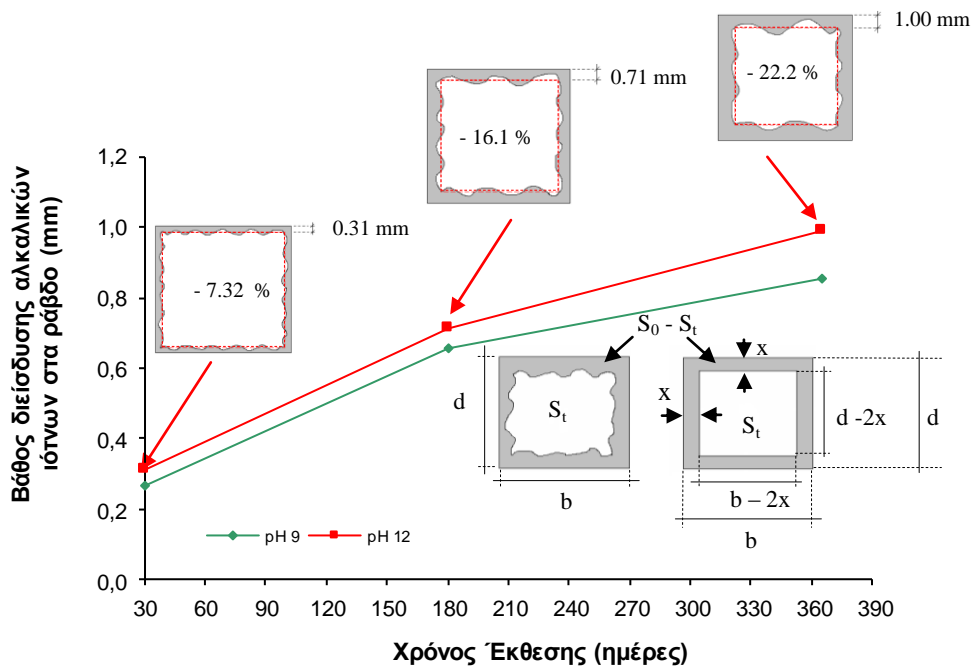
Η ανθεκτικότητα του μητρικού υλικού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη χημική φύση των πολυμερικών δεσμών. Όλες οι ρητίνες έχουν δεσμούς εστέρων (ester bonds) στη κυρία αλυσίδα τους που είναι ο πιο αδύναμος δεσμός του πολυμερούς, λόγω της πιθανής υδρόλυσης τους. Στις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες η χρήση στυρένιου (styrene) σαν μονομερές για την μετάβαση από την υγρή φύση της ρητίνης στη στερεή, μέσω της δημιουργίας ισχυρών σταυροδεσμών (cross-linking) στη μοριακή δομή του υλικού, κατά κάποιο τρόπο κάνει τη ρητίνη ευπαθή σε τέτοια περιβάλλοντα. Το στυρένιο μέσω της χημικής δομής του παρέχει «αρκετά» σημεία για πιθανή επαφή (bonding) με ιόντα

υδρογόνου. Με αυτό τον τρόπο το πολυμερές υλικό είναι ευπαθές σε υδρόλυση, με αποτέλεσμα την εξασθένηση των πολυμερικών δεσμών, τη πτώση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης, την αποκόλληση ινών/ρητίνης και τη διάλυση των πυριτικών δεσμών των ινών υάλου από την μετέπειτα επίδραση αλκαλικών ιόντων. Εξέταση μέσω ηλεκτρονικών μικροσκοπικών μεθόδων (SEM) δοκιμίων εκτεθειμένων σε αλκαλικά διαλύματα έδειξε μερική αποκόλληση ράβδων/ινών (Σχήμα 9), όπου λόγω των παραπάνω οδήγησε σε σημαντική πτώση της εφελκυστικής αντοχής.



Σχήμα 9: Μερική αποκόλληση ινών/ρητίνης - SEM [1]

Ανάλυση (Electron Probe Microanalysis) της χημικής σύστασης των μετά από έκθεση ράβδων Γ-ΙΟΠ, έδειξε ότι το 18% του βάρους τους αποτελείται από αλκαλικά ιόντα Ca. Χρησιμοποιώντας, τροποποιημένο κατάλληλα για τις συγκεκριμένες ράβδους Γ-ΙΟΠ, το μοντέλο των Katsuki και Uomoto υπολογίστηκε το βάθος της ζώνης δράσης των αλκαλικών ιόντων στη διατομή της ράβδου. Βρέθηκε ότι όταν η εφελκυστική αντοχή μειώθηκε κατά 41,6% η «χρήσιμη» (effective) διατομή της ράβδου είχε μειωθεί κατά 22,2% (Σχήμα 10).

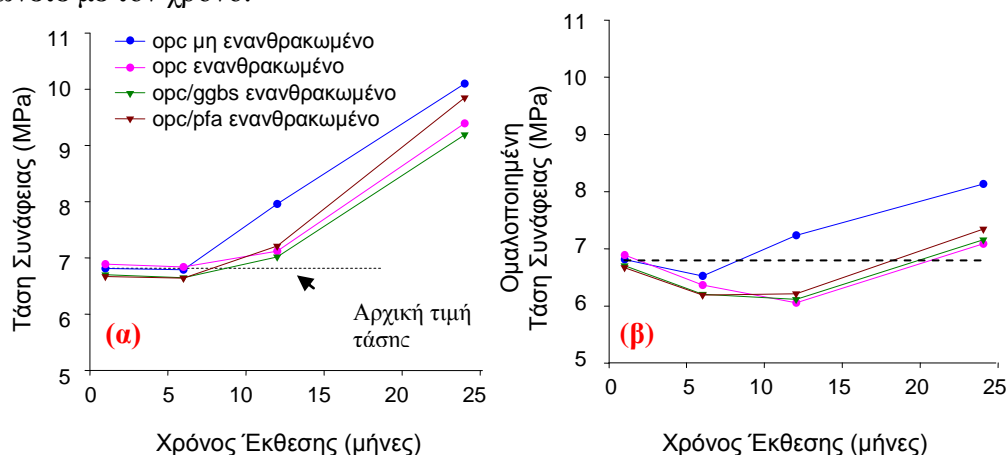


Σχήμα 10: Διείσδυση Αλκαλικών Ιόντων στα Γ-ΙΟΠ [1]

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι το αλκαλικό περιβάλλον έχει σημαντική επίδραση στη μείωση της εφελκυστικής αντοχής των Γ-ΙΟΠ. Αποφασίστηκε αυτό το φαινόμενο να διερευνηθεί περαιτέρω σε πραγματικές συνθήκες σκυροδέματος.

#### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Η μεταβολή της τάσης συνάφειας των διαφορετικών τύπων τσιμέντου/ράβδου Γ-ΙΟΠ (ενανθρακωμένων και μη), σε τακτά χρονικά διαστήματα με την ράβδο ΙΟΠ, απεικονίζεται στο Σχήμα 11α. Παρατηρείται ότι η τάση συνάφειας αυξήθηκε με το χρόνο έκθεσης σε κάθε τύπο δοκιμίου. Μιας και η ποιότητα της ράβδου, στα εξεταζόμενα δοκίμια, δεν καλυτερεύει, η παρατηρούμενη αύξηση της τάσης συνάφειας οφείλεται στην δράση του περιβάλλοντος γύρω από την ράβδο, δηλαδή στην θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, τον μόνο παράγοντα που βελτιώνετε με τον χρόνο.



Σχήμα 11: Τάση συνάφειας Γ-ΙΟΠ [1]

Προκειμένου οι πειραματικές τιμές της τάσης συνάφειας των Γ-ΙΟΠ στο σκυροδέμα να έρθουν σε έναν κοινό παρονομαστή, η τάση συνάφειας «ομαλοποιήθηκε» σε σχέση με την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, με βάση την εξίσωση του Ευρωκώδικα 2 [5] συσχέτισης τους, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση (1).

$$f_{bd}' = f_{bd} \left( \frac{f_{cu,m(28d)}}{f_{cu,m}} \right)^{2/3} \quad (1)$$

, όπου  $f_{bd}'$  η ομαλοποιημένη τάση συνάφειας,  $f_{bd}$  η πειραματική τάση συνάφειας,  $f_{cu,m(28d)}$  η μέση τιμή θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος 28 ημερών και  $f_{cu,m}$  η μέση τιμή της πειραματικής θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος.

Οι ομαλοποιημένες τάσεις συνάφειας απεικονίζονται στο Σχήμα 11β. Παρατηρείται ότι τα ενανθρακωμένα δοκίμια συμπεριφέρθηκαν διαφορετικά από τα μη-ενανθρακωμένα OPC (δοκίμια ελέγχου). Μέχρι τους 6 μήνες ενανθράκωσης η τάση συνάφειας μειώνεται (μείωση, 2.45 % για OPC, 4.90 % για OPC/GGBS και 5.10 % για OPC/PFA), κοντά στην στατιστική μεταβολή του υλικού (5 %). Σημαντικές μεταβολές στην τάση συνάφειας λαμβάνουν χώρα μετά από κάποια χρονική στιγμή από 6 έως 12 μήνες.

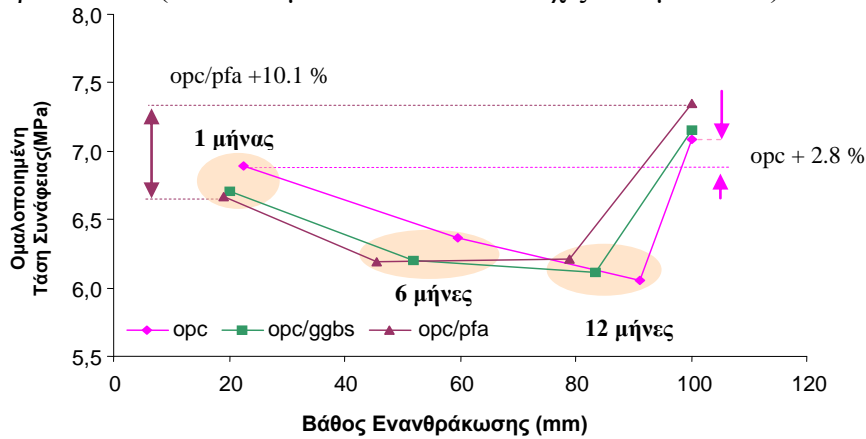
#### 5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Προκειμένου να μελετηθεί η παραπάνω συμπεριφορά θα πρέπει να εξεταστεί η επίδραση του βάθους της ενανθράκωσης και της θλιπτικής αντοχής του ενανθρακωμένου σκυροδέματος στην συνάφεια.

Το βάθος ενανθράκωσης, εκτός από την κλασική μέθοδο προσδιορισμού του, μετρήθηκε και σε σχέση με τη θέση της ράβδου στο δοκίμιο. Με βάση την τελευταία μέθοδο,



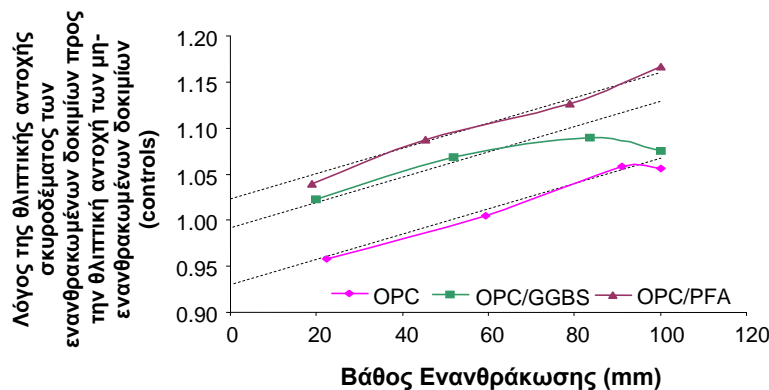
υπολογίστηκε ότι η ενανθράκωση έφτασε την ράβδο οπλισμού νωρίτερα από 12 μήνες. Μελετώντας την μέση τιμή της ομαλοποιημένης τάσης συνάφειας σε σχέση με το αντίστοιχο βάθος ενανθράκωσης (Σχήμα 12) παρατηρείται ότι ανεξάρτητα από την αρχική αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, και τα τρία τσιμεντά παρουσιάζουν μειωμένη τάση συνάφειας κατά την αρχική εξέλιξη της ενανθράκωσης. Παρατηρείται επίσης ότι στα ποζολανικά τσιμεντά όσο προχωρά η ενανθράκωση, μετά τους 6 μήνες, η μείωση στην τάση συνάφειας σταθεροποιείται (αντίθετα με το OPC που συνεχίζει να μειώνεται).



Σχήμα 12: Σχέση ομαλοποιημένης τάσης συνάφειας και βάθους ενανθράκωσης

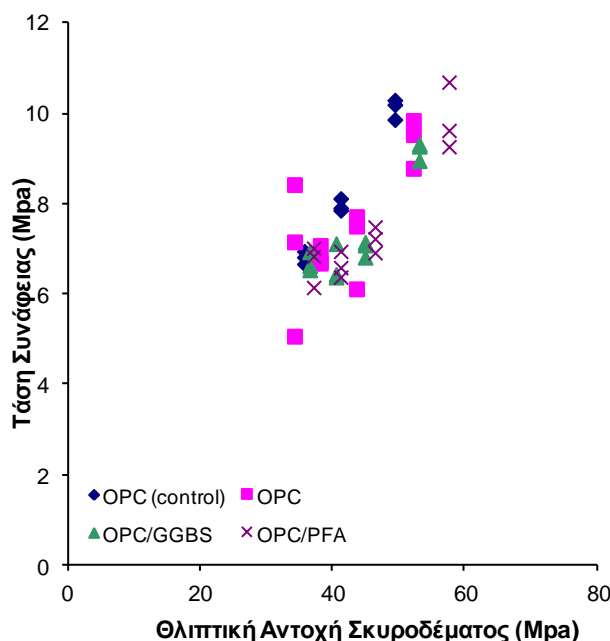
Μετά από έναν χρόνο επιταχυμένης ενανθράκωσης η τάση συνάφειας αυξάνεται, αλλά στο τέλος παραμένει αρκετά μικρότερη σε σχέση με την τάση συνάφειας των μη-ενανθρακωμένων δοκιμίων (κατά 12.9%, 12% και 9,68% στα δοκίμια OPC, OPC/GGBS, OPC/PFA αντίστοιχα). Η αρχική μείωση, κοινή και στους 3 τύπους τσιμεντού δείχνει ότι είναι ανεξάρτητη από την αρχική αλκαλικότητα του σκυροδέματος. Το συμπέρασμα αυτό μας εκπλήσσει μιας και έρχεται σε αντίθεση με τις μέχρι τώρα θεωρίες περί αλκαλικής επίθεσης στα ινοπλισμένα πολυμερή [1]. Φανερώνεται όμως ότι κάποια χημική διεργασία λαμβάνει χώρα.

Μελετώντας την επίδραση του βάθους ενανθράκωσης στη θλιπτική αντοχή των δοκιμίων (Σχήμα 13), προσδιορισμένη την ίδια χρονική στιγμή με το πείραμα συνάφειας σε κύβους σκυροδέματος 100 x 100 x 100 mm, εκτεθειμένους σε επιταχυνόμενη ενανθράκωση, παρατηρείται ότι σε σχέση με τα μη-ενανθρακωμένα δοκίμια, η ενανθράκωση αύξησε την θλιπτική αντοχή των ενανθρακωμένων δοκιμίων κατά 15 %.



Σχήμα 13: Σχέση θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος και βάθους ενανθράκωσης

Ταυτόχρονα, φαίνεται (Σχήμα 14) ότι όπως αυξήθηκε η θλιπτική αντοχή λόγω χρόνου και ενανθράκωσης, αυξήθηκε επίσης και η τάση συνάφειας των Γ-ΙΟΠ/σκυροδέματος.



Σχήμα 14: Σχέση θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος και τάσης συνάφειας

Η αύξηση της θλιπτικής αντοχής λόγω της ενανθράκωσης περιορίζεται μόνο στο μέρος του σκυροδέματος που έχει ενανθρακωθεί (όπως προχωρά η ενανθράκωση). Μιας και η τάση συνάφειας της ράβδου οπλισμού συνδέεται με την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος [1, 5], η δράση της ενανθράκωσης μακριά από την ράβδο πρέπει να αφαιρεθεί. Υπολογίζεται λοιπόν μία καινούργια θλιπτική αντοχή ( $f_{cu}'$ ) των ενανθρακωμένων δοκιμίων (σύμφωνα με την Εξίσωση 2), και όπως θα διαπιστωθεί παρακάτω επηρεάζει άμεσα την τάση συνάφειας των ινοπλισμένων πολυμερών:

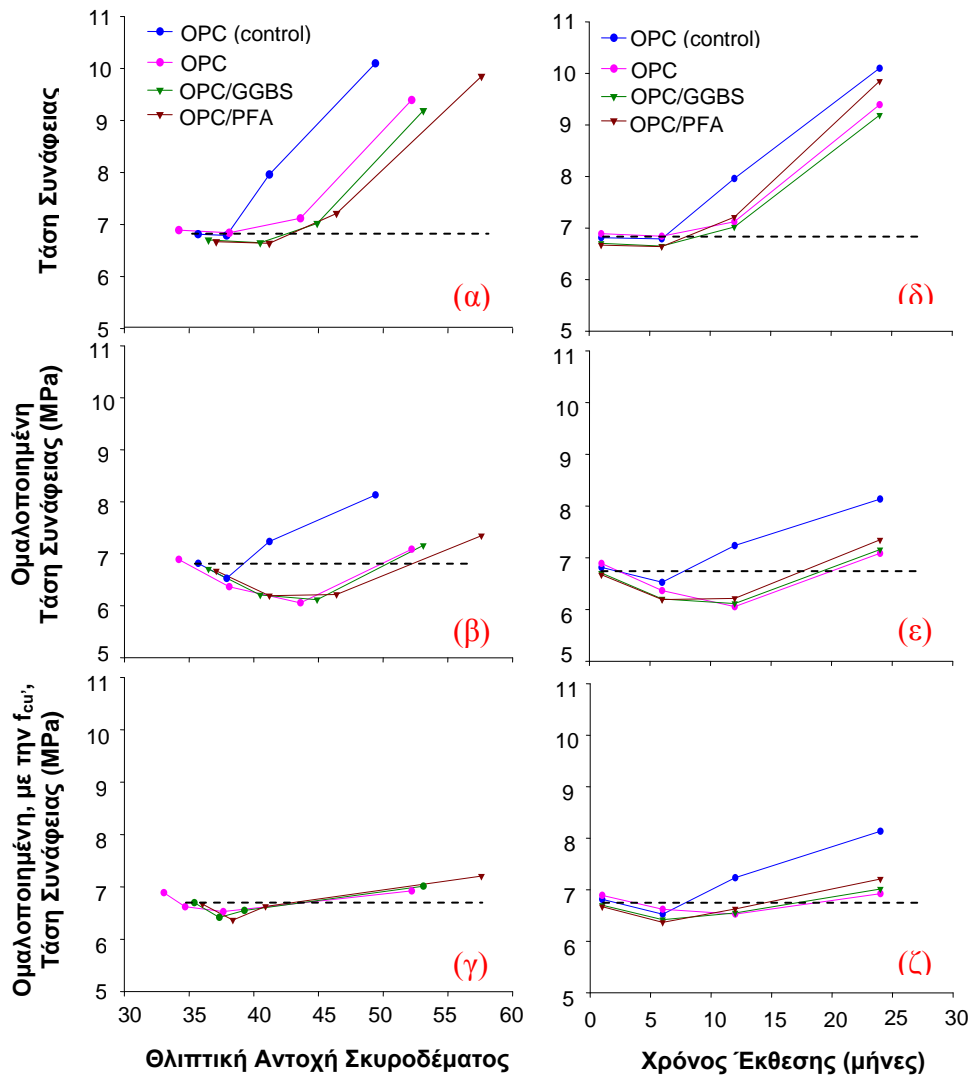
$$f_{cu}' = f_{cu(t)} - \left( 0.15 \cdot f_{cu(t)} \cdot \frac{d_{pr}}{100} \right) \quad (2)$$

όπου,  $f_{cu(t)}$  η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος σε χρόνο  $t$ ,  $d_{pr}$  το βάθος ενανθράκωσης μετρημένο σε πρίσμα (100 mm x 100 mm x 500 mm).

Η επιρροή της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος στην τάση συνάφειας των ινοπλισμένων πολυμερών απεικονίζεται στο Σχήμα 15. Ενώ αρχική αύξηση της θλιπτικής αντοχής δεν επηρεάζει την τάση συνάφειας, μετά από 12 μήνες επιταχυμένης ενανθράκωσης παίζει σημαντικό ρόλο (Σχήμα 15α). Όταν ομαλοποιηθεί η τάση συνάφειας σε σχέση με την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, μετά την αρχική αύξηση της τελευταίας η τάση συνάφειας ελαττώνεται (Σχήμα 15β). Το φαινόμενο αυτό, το οποίο συμφωνεί και με την μείωση της συνάφειας που παρατηρείται στο Σχήμα 12 λόγω της ενανθράκωσης όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, φανερώνεται κάποια χημική διεργασία. Η μείωση στα τάση συνάφειας αποδίδεται στην εναπόθεση κρυστάλλων  $CaCO_3$  στην επιφάνεια των ΙΟΠ. Οι κρύσταλλοι αυτοί επιτίθενται σε ορισμένα σημεία κατά μήκος της ράβδου, με αποτέλεσμα να διεισδύουν και να φτάνουν στο επίπεδο των ινών. Όταν η τάση συνάφειας ομαλοποιηθεί σε σχέση με την νέα θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ( $f_{cu}'$ ) η παραπάνω αναφερόμενη μείωση εξομαλύνεται (Σχήμα 15γ).

Συμπεραίνεται ότι η αύξηση στην τάση συνάφειας των ινοπλισμένων πολυμερών οφείλεται στην αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος γύρω από την περιοχή της ράβδου ινοπλισμένων πολυμερών. Σε σύγκριση όμως με την συμπεριφορά των δοκιμίων ελέγχου (μη ενανθρακωμένα OPC) παρατηρείται μείωση της τάσης συνάφειας (Σχήμα 15ζ). Στα δοκίμια αυτά παρατηρείται μία μικρή πτώση στην τάση συνάφειας στους 6 μήνες

(4.24%) και κατόπιν μία συνεχόμενη άνοδο (19.4% σε 2 χρόνια επιταχυνόμενης ενανθράκωσης). Την ίδια χρονική στιγμή η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αυξήθηκε κατά 38.7%.



Σχήμα 15: Επίδραση θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος στη τάση συνάφειας Γ-ΙΟΠ

Ανάλυση στατιστικής σπουδαιότητας στα πειραματικά αποτελέσματα της τάσης συνάφειας ανέδειξε τα εξής:

- Ο χρόνος έκθεσης των δοκιμών στην επιταχυνόμενη ενανθράκωση βρέθηκε να έχει στατιστικά σημαντικό βάρος στη μεταβολή της τάσης συνάφειας, ενώ ο τύπος τσιμέντου (άρα και το επίπεδο αρχικής αλκαλικότητας) οριακά μεν, αλλά όχι. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει τις παρατηρήσεις που έγιναν στα Σχήματα 12 και 15. Εάν και τα ενανθρακωμένα ποζολλανικά τσιμέντα συμπεριφέρθηκαν καλύτερα από το ενανθρακωμένο OPC, η συμπεριφορά τους δεν ήταν η αναμενόμενη [1].
- Δεν παρουσιάστηκε σημαντική στατιστική διαφορά στις τιμές της τάσης συνάφειας πριν η ενανθράκωση φθάσει τη ράβδο (ομάδα τιμών 1). Το ίδιο παρατηρήθηκε και για τις τιμές της τάσης συνάφειας εφόσον η ενανθράκωση ξεπεράσει την ράβδο (ομάδα τιμών 2).

- Όταν όμως συγκρίθηκαν οι τιμές της τάσης συνάφειας πριν η ενανθράκωση φθάσει την ράβδο, με τις αντίστοιχες τιμές όταν την ξεπεράσει, παρατηρήθηκε μία σημαντική στατιστική διαφορά μεταξύ τους.

Η στατιστική διαφορά αυτή, σύμφωνα και με τις παρατηρήσεις στο Σχήμα 15ζ, υποδουλώνει την ύπαρξη χημικού μηχανισμού διάβρωσης των ράβδων ινοπλισμένων πολυμερών λόγω της ενανθράκωσης [1]. Για να μοντελοποιηθεί αυτό το σημαντικό εύρημα απαιτείται πρόβλεψη του βάθους ενανθράκωσης και της χρονικής στιγμής που τα βάθος ενανθράκωσης θα φθάσει την ράβδο καθώς επίσης και πρόβλεψη της επίρειας της ενανθράκωσης στην τάση συνάφειας της ράβδου.

## 6. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ Γ-ΙΟΠ

Αναλύοντας στατιστικά (regression analysis) την σχέση βάθος και χρόνου ενανθράκωσης, δημιουργήθηκαν μαθηματικές εκφράσεις Που συνδέουν το βάθος ενανθράκωσης με τη τετραγωνική ρίζα του χρόνου έκθεσης [1] από όπου υπολογίστηκε η ακριβής χρονική στιγμή που η ενανθράκωση (επιταχυνόμενη) έφτασε των ράβδο ινοπλισμένων πολυμερών. Χρησιμοποιώντας εμπειρικές σχέσεις που συσχετίζουν το βάθος ενανθράκωσης μετά από μία χρονική περίοδο “ $t_i$ ” σε “ $c_i$ ” συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα, με τον χρόνο “ $t_s$ ” που χρειάζεται το ίδιο βάθος ενανθράκωσης να προχωρήσει σε κανονικές περιβαλλοντολογικές συνθήκες διοξειδίου του άνθρακα “ $c_s$ ” δημιουργήθηκε μία ισοδύναμη κλίμακα επιταχυνόμενου και πραγματικού χρόνου έκθεσης [1]. Συνδυάζοντας την κλίμακα αυτή με τους συντελεστές ενανθράκωσης, που αναφέρθηκαν προηγουμένως, υπολογίστηκε ο χρόνος σε πραγματικές συνθήκες που απαιτείται για την ενανθράκωση να φθάσει ένα συγκεκριμένο βάθος ή για να φθάσει την ράβδο οπλισμού.

Συσχετίζοντας την μεταβολή του ποσοστού των σχετικών απομενουσών τάσεων συνάφειας (όπως προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα) σε σχέση με τον χρόνο έκθεσης σε λογαριθμική κλίμακα η παραπάνω σχέση μπορεί να μοντελοποιηθεί και έτσι να προσδιοριστούν μεταβολές στην συνάφεια του υλικού (απομένουσα τάση συνάφειας,  $f_{bd,R}$ , Εξίσωση 3) για χρονικές περιόδους αφότου η ενανθράκωση φθάσει την ράβδο. Λαμβάνοντας υπόψη την μεταβολή της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος (Εξίσωση 4), λόγω χρόνου (προσδιορισμένη με βάση των Ευρωκώδικα 2 - και λόγω ενανθράκωσης, προσαυξημένη κατά 15 %), μπορεί να υπολογιστεί η αναμενόμενη τάση συνάφειας ( $f_{bd,exp}$ , Εξίσωση 5). Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να υπολογιστεί η τάση συνάφειας λαμβάνοντας υπόψη την δράση της ενανθράκωσης ( $f_{bd,exp} \cdot f_{bd,R}$ ) και τελικά η ολική απομένουσα τάση συνάφειας ( $f_{bd,Real,t}$ ) σε κάποιο χρονικό διάστημα αφότου η ενανθράκωση φτάσει την ράβδο, σαν τον λόγο της ( $f_{bd,exp} \cdot f_{bd,R}$ ) ενανθράκωση έφτασε την ράβδο / ( $f_{bd,exp} \cdot f_{bd,R}$ ) πριν ενανθράκωση φθάσει την ράβδο [1,4].

$$f_{bd,R} (\%) = 92 - 4.33 \cdot \ln(t) \quad (3)$$

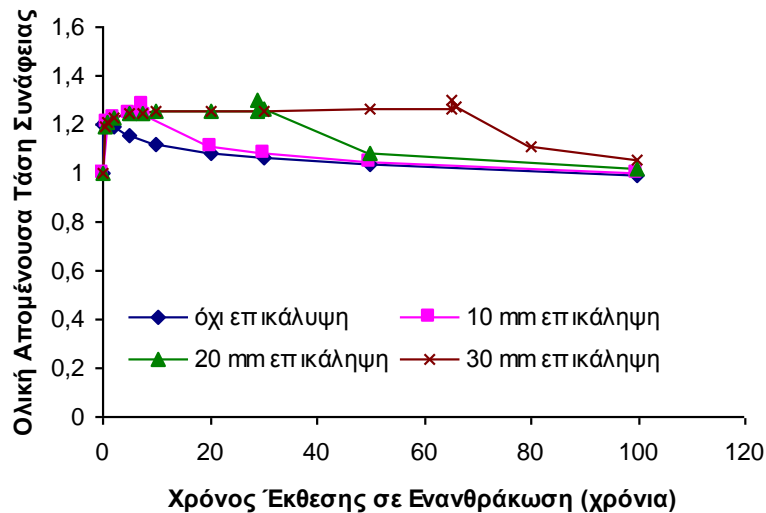
$$f_{cm}(t) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{0.5} \right] \right\} \cdot f_{cm} \quad (4)$$

$$f_{bd,exp} = 2.25 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot 0.30 \cdot (1.15 \cdot f_{cm}(t))^{2/3} \quad (5)$$

Εν κατακλείδι, η απομένουσα τάση συνάφειας των Γ-ΙΟΠ στο σκυρόδεμα σε βάθος χρόνου μπορεί να προσδιοριστεί με βάση την Εξίσωση 6.

$$f_{bd,Real,t} (\%) = \frac{0.625 \left\{ 1.15 \left[ \exp \left( 0.25 \left[ 1 - \frac{28}{t} \right]^{0.5} \right) \right] f_{cu,28d} \right\}^{2/3} \cdot \left[ 1.6 - 4.33 \ln(t) \right]}{f_{bd,28days}} \quad (6)$$

Γραφική απεικόνιση της παραπάνω εξίσωσης σε βάθους χρόνου έως 100 χρόνια για διαφορετικές τιμές επικάλυψης σκυροδέματος (Σχήμα 16) δείχνει ότι, εν τέλει, τα αρνητικά αποτελέσματα της ενανθράκωσης στην συνάφεια των ινοπλισμένων πολυμερών στο σκυρόδεμα, σε βάθος χρόνου κατά την διάρκεια ζωής του έργου εξισορροπούνται λόγω της αύξησης της θλιπτικής αντοχής (λόγω χρόνου και ενανθράκωσης).



Σχήμα 16: Απομένουσα τάση συνάφειας Γ-ΙΟΠ κατά τη διάρκεια ζωής του έργου

Εν, κατακλείδι, οι διαφορετικοί τύποι τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκαν παρουσίασαν παρόμοια συμπεριφορά στην συνάφεια τους με την ράβδο υαλοπλισμένων πολυμερών, πριν η ενανθράκωση φθάσει την ράβδο, καθώς και μετά. Συμπεραίνεται λοιπόν, αντίθετα με τις διαπιστευμένες ενστάσεις, ότι η αλκαλικότητα του σκυροδέματος δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα ΙΟΠ και την συνάφεια τους με το σκυρόδεμα. Γενικά η ενανθράκωση λειτουργεί αρχικά σαν «διακόπτης βλάβης» για τα υλικά αυτά. Μέχρι η ενανθράκωση να φθάσει την ράβδο ΙΟΠ παρατηρήθηκαν μικρές αλλαγές στην συνάφεια του υλικού με το σκυρόδεμα. Όταν όμως η ενανθράκωση φθάσει και ξεπεράσει την ράβδο, δημιουργείται μια σχετικά σημαντική μείωση συνάφειας, που αποδίδεται στην δράση υγρασίας και στην εναπόθεση κρυστάλλων  $\text{CaCO}_3$  στην επιφάνεια των ΙΟΠ. Όμως η επίδραση της ενανθράκωσης στην συνάφεια ΙΟΠ και σκυροδέματος εξισορροπείται από την αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος.

## 7. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΙΟΠ

Με βάση τα ανωτέρω, συμπεραίνουμε ότι δεν χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η δράση της ενανθράκωσης, όσον αφορά την συνάφεια ΙΟΠ και σκυροδέματος, στον υπολογισμό συντελεστών ασφαλείας στα πλαίσια των κανονισμών.

Αν και στους σχετικούς κανονισμούς αναφέρονται συντελεστές ασφαλείας για τα ινοπλισμένα πολυμερή, στις πιο πολλές περιπτώσεις οι συντελεστές αυτοί είναι γενικοί χωρίς να διαφοροποιούνται ανάλογα με τις επιπτώσεις κάποιου επιθετικού περιβάλλοντος. Δεδομένου ότι τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται κατά κόρων στις ενισχύσεις και επισκευές κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και τοιχοποιίας σε διαφορετικές μορφές (επικολλητά ελάσματα, φύλα, υφάσματα, κλπ.), έμφαση θα πρέπει να δοθεί στην ανάπτυξη και θέσπιση συντελεστών ασφαλείας που να λαμβάνουν υπόψη τόσο την επίδραση επιθετικών παραγόντων όσο και τη μορφή των υλικών αυτών.

Σε αυτό το πλαίσιο ευχάριστη έκπληξη αποτελούν οι προσπάθειες υιοθέτησης συντελεστών ασφαλείας, σύμφωνα με τα παραπάνω, έστω και συντηρητικών, στα πλαίσια συγκεκριμένων κανονισμών όπως:

- στη Τεχνική Έκθεση 55 του Concrete Society [6], όπου ο συντελεστής ασφαλείας των ΙΟΠ, εκφράζεται σαν το γινόμενο του γενικού συντελεστή ασφαλείας του υλικού επί τον συντελεστή εφαρμογής (application process),
- στη Τεχνική έκθεση 14 της fib [7], όπου οι γενικοί συντελεστές ασφαλείας υλικού των ΙΟΠ διαχωρίζονται ανάλογα με χρήση ελασμάτων σε συνήθεις συνθήκες ή με χρήση υφασμάτων σε «δύσκολες» συνθήκες εφαρμογής, και
- στο κανονισμό 440.2R-08 της ACI [8], όπου παρέχονται μειωτικοί συντελεστές ανάλογα με τον τύπο του ΙΟΠ και το περιβάλλον εφαρμογής (εσωτερικός χώρος, εξωτερική έκθεση, γέφυρες κλπ.).

Μια πιο λεπτομερή επίδραση του κάθε επιθετικού περιβάλλοντος στις μηχανικές ιδιότητες και στη γενικότερη συμπεριφορά των ΙΟΠ ενσωματώνεται στη Τεχνική έκθεση 40 της fib [9]. Προτείνεται λοιπόν η χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή των ΙΟΠ να πολλαπλασιάζεται με έναν περιβαλλοντικό συντελεστή,  $n_{env,t}$ , και παρέχεται λεπτομερής αλλά και πιο απλοποιητικός τρόπος υπολογισμού του. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο συντελεστής αυτός λαμβάνει μεταξύ άλλων υπόψη (μέσω σχετικών συντελεστών) την επίδραση της υγρασίας, που όπως αποδείχθηκε σε αυτή τη μελέτη επηρεάζει ιδιαίτερα τη συμπεριφορά των Γ-ΙΟΠ στο σκυρόδεμα, τη θερμοκρασία και τη διάρκεια ζωής του έργου.

## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας διερευνήθηκε η επίδραση της αλκαλικότητας στην ανθεκτικότητα και στις μηχανικές ιδιότητες ράβδων Γ-ΙΟΠ. Ράβδοι Γ-ΙΟΠ εισήχθησαν σε δοκίμια σκυροδέματος διαφορετικών αρχικών αλκαλικοτήτων σε επιταχυνόμενη ενανθράκωση, αλλά και σε χημικά διαλύματα εξομοίωσης του νερού των πόρων του σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι αν και η αλκαλικότητα έχει καταλυτικό ρόλο στα ΙΟΠ σε χημικά διαλύματα, στο σκυρόδεμα ο ρόλος της έρχεται σε δεύτερη μοίρα σε σχέση με την επίδραση της υγρασίας. Η συμπεριφορά των διαδορικών τύπων τσιμέντου πριν και μετά την ενανθράκωση ήταν παρόμοια, ανεξάρτητα από τις αρχικές συνθήκες αλκαλικότητας. Μέχρι η ενανθράκωση να φτάσει την ράβδο ΙΟΠ παρατηρήθηκαν μικρές αλλαγές στην συνάφεια του υλικού με το σκυρόδεμα. Όταν όμως η ενανθράκωση φτάσει και ξεπεράσει την ράβδο, δημιουργείται μια σχετικά σημαντική μείωση συνάφειας, που αποδίδεται στην δράση υγρασίας και στην εναπόθεση κρυστάλλων  $CaCO_3$  στην επιφάνεια των ΙΟΠ. Μέσω της δημιουργίας προγνωστικών μοντέλων της τάσης συνάφειας, φαίνεται ότι η επίδραση της ενανθράκωσης στην συνάφεια ΙΟΠ και σκυροδέματος εξισορροπείται από την αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος.

## 9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δέμης Σ., “Ανθεκτικότητα Ινοπλισμένων Πολυμερών από Γυαλί στο Σκυρόδεμα”, Διδακτορική Διατριβή, Department of Civil & Structural Engineering, The University of Sheffield, Sheffield, UK, 2007.
- [2] Karbhari V.M., Chu W., "Degredation Kinetics of Pultruded E-glass/vinylester in Alkaline Media", ACI Materials Journal, Vol. 102, pp. 34-4.1, 2005.
- [3] Yilmaz V.T., Glasser F.P., "Chemical Attack on Alkali-resistant Fibres in a Hydrates Cement Matrix: Characterization of Corrosion Products", Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 151, pp. 236-244, 1992.
- [4] Δέμης Σ., Πηλακούτας Κ., “Πειραματική Διερεύνηση Επίδρασης Αλκαλικότητας Σκυροδέματος στις Μηχανικές Ιδιότητες Ράβδων Ινοπλισμένων Πολυμερών από Γυαλί”, 17<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος, Θεσσαλονίκη, 2016.
- [5] EN-1992-1-1, “Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1 : General Rules and Rules for Buildings”, The European Union, 2004.

- [6] The Concrete Society TR 55, “Design Guidance for Strengthening Concrete Structures using Fibre Composite Materials”, 3<sup>rd</sup> edition, 2012.
- [7] fib Bulletin 14, “Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures, 2001”, International Federation for Structural Concrete, Switzerland, 2001.
- [8] ACI 440.2R-08 (2008) Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures
- [9] fib Bulletin 40, “FRP Reinforcement in RC Structures”, International Federation for Structural Concrete, Switzerland, 2007.

