

# ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΙΝΟΠΛΟΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΑΠΟ ΓΥΑΛΙ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ – ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ

Σωτήρης Δέμης

*Ερευνητής, Department of Civil & Structural Engineering, University of Sheffield, UK*

Κύπρος Πηλακούτας

*Καθηγητής, Department of Civil & Structural Engineering, University of Sheffield, UK*

Στέφανος Δρίτσος

*Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών 26500, Πάτρα*

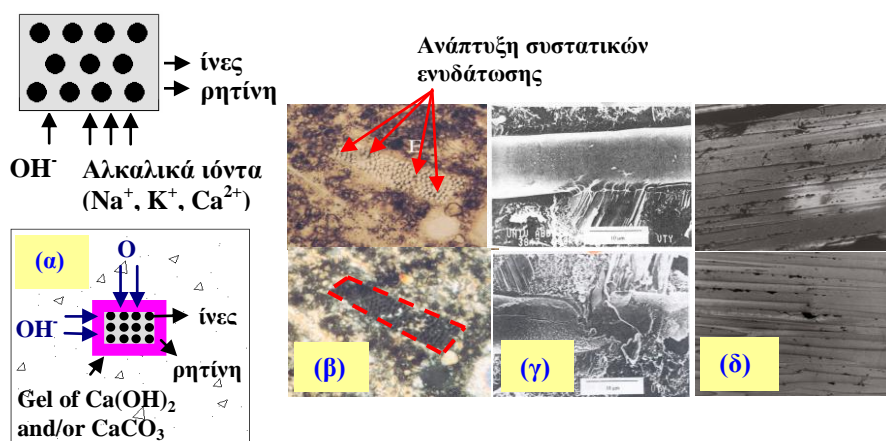
*Λέξεις κλειδιά: Ινοπλισμένα πολυμερή από γυαλί, ενανθράκωση, συνάφεια*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η επιστημονική κοινότητα συνηγορεί στο ότι το έντονα αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος αποτελεί έναν πολύ ισχυρό διαβρωτικό παράγοντα για τα ινοπλισμένα πολυμερή από γυαλί (Γ-ΙΟΠ). Η παρούσα εργασία μελετά την επίδραση της αλκαλικότητας στην συνάφεια των υλικών αυτών στο σκυρόδεμα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι αντίθετα με τις διαπιστευμένες ενστάσεις, η αλκαλικότητα του σκυροδέματος δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα Γ-ΙΟΠ και την συνάφεια τους με το σκυρόδεμα (μεγαλύτερη ρόλο παίζει η υγρασία). Γενικά η ενανθράκωση, λειτουργεί σαν διακόπτης βλάβης για τα υλικά αυτά.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το θέμα της ανθεκτικότητας σε διάρκεια των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα απασχολεί την διεθνή κοινότητα των Μηχανικών εδώ και χρόνια, με την διάβρωση του σιδηροπλισμού να αναδεικνύεται ως το σημαντικότερο πρόβλημα (Δέμης, 2007). Οι τρόποι αντιμετώπισης κυμαίνονται από προδιαγραφές υλικών σε επίπεδο κανονισμών, πρόταση κατασκευαστικών λύσεων και μεθόδων αποκατάστασης, μέχρι και η εισαγωγή νέων τύπων οπλισμού, όπως τα ΙΟΠ. Παρόλλα αυτά, η εισαγωγή των υλικών αυτών, σαν εναλλακτική μορφή εσωτερικού οπλισμού, επισκιάζεται από την συμπεριφορά τους στο σκυρόδεμα. Η επιστημονική κοινότητα συνηγορεί στο ότι το έντονα αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος αποτελεί έναν πολύ ισχυρό διαβρωτικό παράγοντα για τα υλικά αυτά (Δέμης, 2007; Karbhari and Chu, 2005; Yilmaz and Glasser, 1992). Οι μηχανισμοί διάβρωσης επιγραμματικά μπορούν να ανακεφαλαιωθούν ως ο συνδυασμός των παρακάτω παραγόντων:

- Διείσδυση υγρασίας (ιόντων  $\text{OH}^-$ ) με αποτέλεσμα υδρόλυση και εξασθένιση των δεσμών των πολυμερικών αλυσίδων των ΙΟΠ, εξασθένιση συνάφειας ίνας/ρητίνης, αποκόλληση ινών (Εικόνα 1α) (Δέμης, 2007).
- Επίθεση από αλκαλικά ιόντα ( $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) και από την ανάπτυξη των συστατικών της ενυδάτωσης στο σκυρόδεμα (Εικόνα 1β) (Δέμης, 2007).
- Επίδραση στρώματος  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  και  $\text{CaCO}_3$  στην επιφάνεια των ινοπλισμένων πολυμερών και διείσδυση ιόντων  $\text{Ca}^{++}$  στην διεπιφάνεια ανθρακονημάτων/ρητίνης (Εικόνες 1γ, 1δ) (Δέμης, 2007).



Εικόνα 1. Επίδραση αλκαλικού περιβάλλον σκυροδέματος στα ινοπλισμένα πολυμερή (Δέμης, 2007)

Σε τι βαθμό όμως η αλκαλικότητα αυτή επηρεάζει τα ινοπλισμένα πολυμερή από γυαλί; Μείωση της αλκαλικότητας βελτιώνει την μηχανική τους συμπεριφορά στο σκυρόδεμα;

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

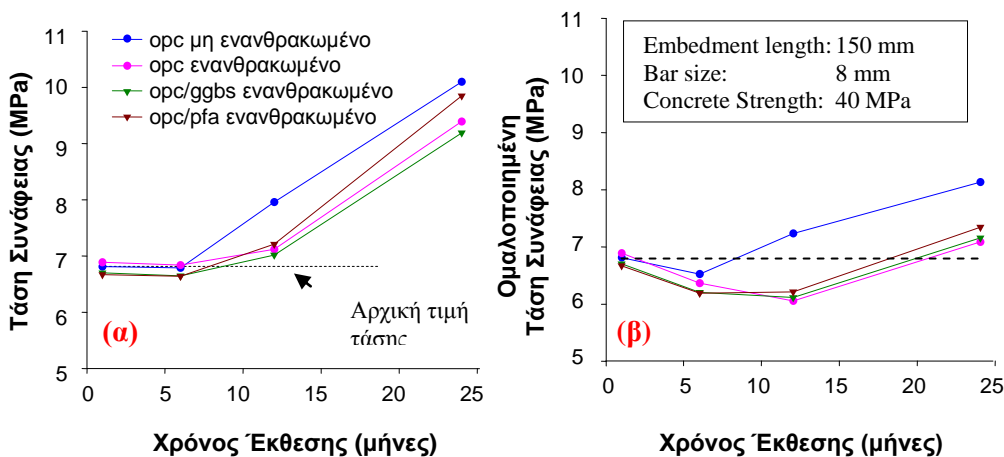
Για να απαντηθούν τα παραπάνω ερωτήματα σχεδιάστηκε μία ενδεδειγμένη πειραματική διαδικασία. Ράβδοι οπλισμού Γ-ΙΟΠ (προϊόν της εταιρίας EUROCRETE) εισήχθησαν σε, χημικά διαλύματα εξομοίωσης του νερού των πόρων (pore water solutions) διαφορετικών τύπων τσιμέντων, καθώς και σε τσιμέντα με διαφορετική αρχική αλκαλικότητα (τσιμέντου τύπου Portland και ποζαλονικά τσιμέντα). Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται

τα αποτελέσματα που αφορούν την επιρροή του αλκαλικού περοβάλλοντος του σκυροδέματος στην συνάφεια ράβδων οπλισμού από ΙΟΠ (Δέμης, 2007).

Ποζολανικά τσιμέντα (GGBS, PFA) και επιταχυνόμενη ενανθράκωση χρησιμοποιήθηκαν σαν μηχανισμοί μείωσης της αλκαλικότητας. Το τεστ συνάφειας επιλέχθηκε για να προσδιοριστούν τυχών μεταβολές στην συμπεριφορά των ινοπλισμένων πολυμερών από γυαλί στο σκυρόδεμα, σε επίπεδο μηχανικών ιδιοτήτων. Δοκίμια κύβων σκυροδέματος (OPC, OPC/GGBS, OPC/PFA) 150 x 150 x 150 mm με κεντρικά τοποθετημένη ράβδο ΙΟΠ (επικάλυψη 70 mm) εισήχθησαν σε επιταχυνόμενη ενανθράκωση για 2 χρόνια (15 % CO<sub>2</sub>, 55 % RH). Ένας πλήρως αυτοματοποιημένος περιβαλλοντολογικός θάλαμος επιταχυνόμενης ενανθράκωσης σχεδιάστηκε για τις ανάγκες της ερευνητικής διαδικασίας. Η τάση συνάφειας (fib bulletin 10, 2000) καθώς και τα βάθος ενανθράκωσης (BS EN 13295, 2004) και η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος μετρήθηκαν πειραματικά σε τακτά χρονικά διαστήματα.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η μεταβολή της τάσης συνάφειας των διαφορετικών τύπων τσιμέντου, με την ράβδο ΙΟΠ, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη απεικονίζονται στην Εικόνα 2α.



Εικόνα 2. Τάση συνάφειας ινοπλισμένων πολυμερών

Μιας και η ποιότητα της ράβδου ινοπλισμένων πολυμερών, 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. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 η τάση συνάφειας μπορεί να συσχετιστεί με την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (στην δύναμη των 2/3), όπως παρατηρείται στις Εξισώσεις 1 και 2.

$$f_{bd} = 2.25 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot f_{ctd} \quad (1)$$

$$f_{ctd} = 0.30 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (2)$$

όπου,  $f_{bd}$  = τάση συνάφειας,  $f_{ctd}$  = εφελκιστική αντοχή του σκυροδέματος και  $f_{ck}$  = θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

Προκειμένου οι πειραματικές τιμές της τάση συνάφειας των ΙΟΠ στο σκυρόδεμα να έρθουν σε έναν κοινό παρανομαστή, με βάση τις παραπάνω εξισώσεις, η τάση συνάφειας «ομαλοποιήθηκε» σε σχέση με την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση.

$$\frac{\text{Ομαλοποιημένη Τάση Συνάφειας}}{(f_{bn})} = \frac{\text{Πειραματική Τάση Συνάφειας}}{(f_b)} \cdot \left[ \frac{(\text{μέση τιμή θλιπτικής αντοχής 28 ημερών})}{(\text{μέση τιμή πειραματικής θλιπτικής αντοχής})} \right]^{2/3} \quad (3)$$

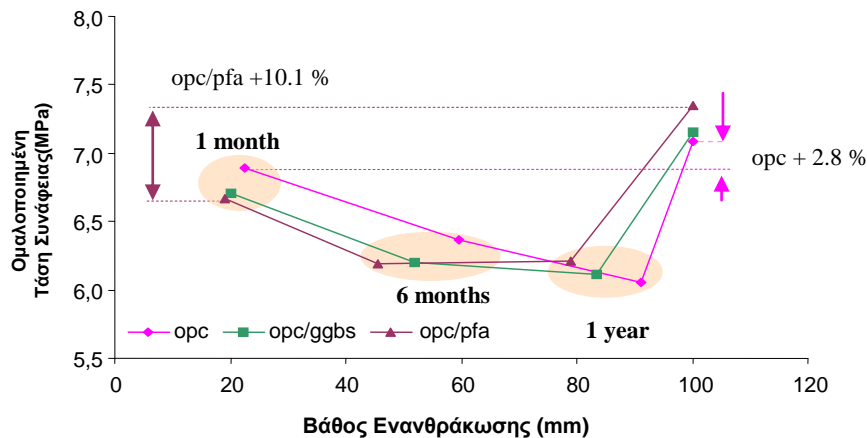
Οι ομαλοποιημένες τάσεις συνάφειας απεικονίζονται στην Εικόνα 2β. Παρατηρείται ότι τα ενανθρακωμένα δοκίμια συμπεριφέρθηκαν διαφορετικά από τα OPC (control) μη-ενανθρακωμένα. Μέχρι τους 6 μήνες ενανθράκωσης η τάση συνάφειας μειώνεται (μείωση, 2.45 % για OPC, 4.90 % για OPC/GGBS και 5.10 % για OPC/PFA), αν και η παρατηρούμενη μείωση είναι κοντά στην στατιστική μεταβολή του υλικού (5 %). Σημαντικές μεταβολές στην τάση συνάφειας λαμβάνουν χώρα μετά από κάποια χρονική στιγμή από 6 έως 12 μήνες.

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

### 3.1 Επίδραση του βάθους ενανθράκωσης στην τάση συνάφειας ΙΟΠ

Το βάθος ενανθράκωσης, εκτός από την κλασική μέτρηση πρίσματος, προσδιορίστηκε και σε σχέση με την ράβδο ΙΟΠ στο δοκίμιο για τον πειραματικό προσδιορισμό της τάσης συνάφειας (Δέμης, 2007). 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 (Εικόνα 3) παρατηρείται ότι ανεξάρτητα από την αρχική αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, και τα τρία τσιμέντα παρουσιάζουν μειωμένη τάση συνάφειας κατά την αρχική εξέλιξη της ενανθράκωσης. Παρατηρείται επίσης ότι στα ποζολανικά τσιμέντα όσο προχωρά η ενανθράκωση, μετά τους 6 μήνες, η μείωση στην τάση συνάφειας σταθεροποιείται (αντίθετα με το OPC που συνεχίζει να μειώνετε).



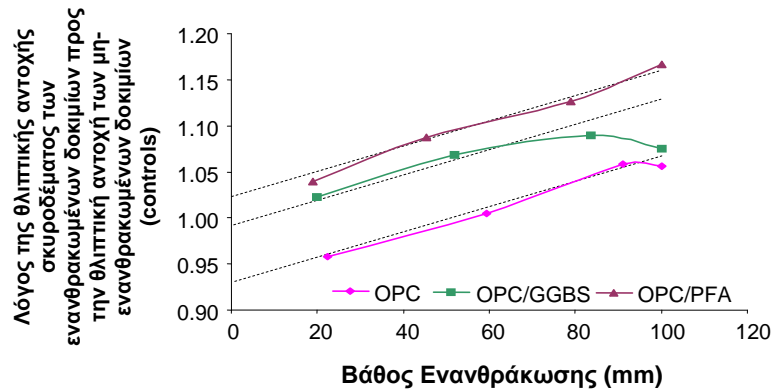
Εικόνα 3. Σχέση μεταξύ ομαλοποιημένης τάσης συνάφειας και βάθους ενανθράκωσης

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. Η αρχική μείωση, κοινή και στους 3 τύπους τσιμέντου 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 (Δέμης, 2007). Φανερόνεται όμως ότι κάποια χημική διεργασία λαμβάνει χώρα.

### 3.2 Επίδραση του θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος στην τάση συνάφειας IOΠ

Μελετώντας την επίδραση του βάθους ενανθράκωσης στην σχέση της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων (Εικόνα 4) (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 %.



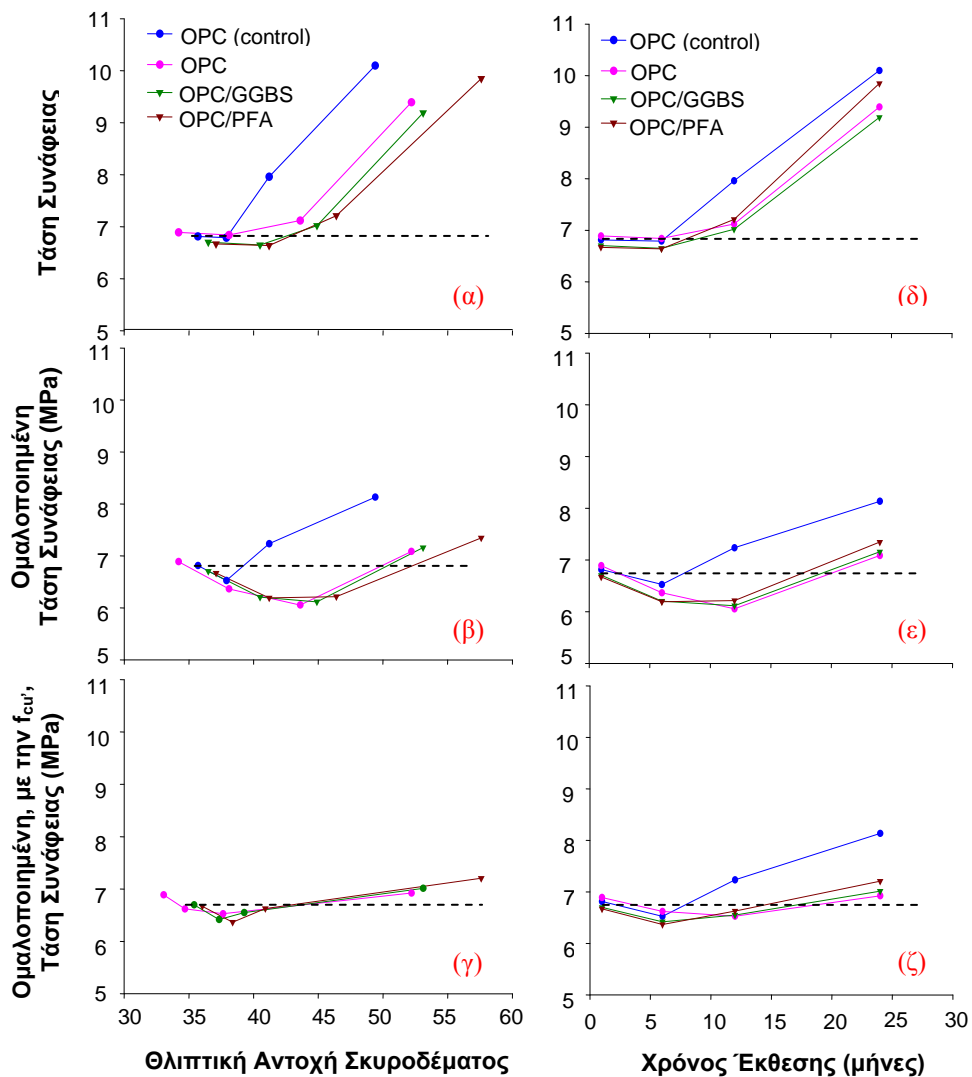
Εικόνα 4. Σχέση μεταξύ θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος και βάθους ενανθράκωσης

Η αύξηση αυτή 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 (Δέμης, 2007; Eurocode, 2004), 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 4), και όπως θα διαπιστωθεί παρακάτω επηρεάζει άμεσα την τάση συνάφειας των ινοπλισμένων πολυμερών.

$$f_{cu}' = f_{cu(t)} - \left( 0.15 \cdot f_{cu(t)} \cdot \frac{d_{pr}}{100} \right) \quad (4)$$

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

Η επίρεια της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος στην τάση συνάφειας των ινοπλισμένων πολυμερών απεικονίζεται αναλυτικά στην Εικόνα 5. Ενώ αρχική αύξηση της θλιπτικής αντοχής δεν επηρεάζει την τάση συνάφειας, μετά από 12 μήνες επιταχυμένης ενανθράκωσης παίζει σημαντικό ρόλο (Εικόνα 5α).



Εικόνα 5. Σχέση μεταξύ θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος και τάσης συνάφειας οπλισμού

Όταν ομαλοποιηθεί η τάση συνάφειας σε σχέση με την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, μετά την αρχική αύξηση της τελευταίας η τάση συνάφειας ελαττώνεται (Εικόνα 5β). Το φαινόμενο αυτό, το οποίο συμφωνεί και με την μείωση της συνάφειας που παρατηρείται στην Εικόνα 3, λόγω της ενανθράκωσης) όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, φανερώνεται κάποια χημική διεργασία. Όταν η τάση συνάφειας ομαλοποιηθεί σε σχέση με την

νέα θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ( $f_{cu}$ ) η παραπάνω αναφερόμενη μείωση εξομαλύνεται (Εικόνα 5γ).

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 (Δέμης, 2007). Σε σύγκριση όμως με την συμπεριφορά των δοκιμίων ελέγχου (μη ενανθρακωμένα OPC) παρατηρείται μείωση της τάσης συνάφειας (Εικόνα 5ζ). 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 %.

Για να διαπιστωθεί η στατιστική σπουδαιότητα των παραπάνω παρατηρήσεων, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος “two-factor ANOVA” στα πειραματικά αποτελέσματα της τάσης συνάφειας (Πίνακας 1). Στον πίνακα που ακολουθεί, εάν η τιμή  $F_A$  είναι μεγαλύτερη από την τιμή  $F_{critical}$  ή εάν η τιμή  $P_{value}$  είναι μικρότερη του 0.05, τότε η εξεταζόμενη παράμετρος είναι μεγάλης στατιστικής σπουδαιότητας και πρέπει να ληφθεί υπόψη στην δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου.

Στην ανάλυση των μέσων τιμών (βήμα 1) και όλων των πειραματικά υπολογισμένων τιμών (βήμα 2) της τάσης συνάφειας, βρέθηκε (όπως αναμενόταν) ότι ο χρόνος έκθεσης στην επιταχυνόμενη ενανθράκωση έχει σημαντικό βάρος ( $F_A > F_{critical}$ ,  $6.69 > 3.86$  για το βήμα 1 και  $5.19 > 2.90$  για το βήμα 2). Αντιθέτως το είδος του τσιμέντου (επίπεδο αλκαλικότητας) που χρησιμοποιήθηκε βρέθηκε να έχει οριακά μη-σημαντικό βάρος ( $F_A < F_{critical}$ ,  $2.98 < 3.86$  για το βήμα 1 και  $2.30 < 2.90$  για το βήμα 2). Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει τις παρατηρήσεις που έγιναν για τις Εικόνες 2 και 6. Εάν και τα ενανθρακωμένα ποζολλανικά τσιμέντα συμπεριφέρθηκαν καλύτερα από το ενανθρακωμένο OPC, η συμπεριφορά τους δεν ήταν η αναμενόμενη (Δέμης, 2007).

Προσπαθώντας να μελετηθεί το αποτέλεσμα της ενανθράκωσης στην τάση συνάφειας των ινοπλισμένων πολυμερών, η μέθοδος ANOVA εφαρμόστηκε στις ομάδες τιμών της τάσης συνάφειας πριν και μετά η ενανθράκωση φθάσει την ράβδο ΙΟΠ. Στις τιμές τάσης συνάφειας που προκύπτουν πριν η ενανθράκωση φθάσει την ράβδο (βήμα 3) δεν βρέθηκε καμία σημαντική



στατιστική διαφορά μεταξύ τους ( $F_A: 0.57 < F_{\text{critical}} 6.59$ ). Το ίδιο παρατηρήθηκε και για τις τιμές της τάσης συνάφειας εφόσον η ενανθράκωση ξεπεράσει την ράβδο (βήμα 4). 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 (βήμα 5). Η στατιστική διαφορά αυτή, σύμφωνα και με τις παρατηρήσεις της Εικόνας 5ζ, υποδουλώνει την ύπαρξη χημικού μηχανισμού διάβρωσης των ράβδων ινοπλισμένων πολυμερών λόγω της ενανθράκωσης (Δέμης, 2007).

**Πίνακας 1.** Αποτελέσματα ανάλυσης ANOVA

Παράγοντας	P-value*	$F_A^{**}$	$F_{\text{critical}}$	$F_A / F_{\text{critical}}$	
<i>Ανάλυση μέσω των τιμών ομαλοποιημένης τάσης συνάφειας</i>					
<b>Χρόνος Έκθεσης</b>	0.011	6.69	3.86	1.73	
<b>Είδος Τσιμέντου</b>	0.089	2.98	3.86	0.77	(1)
<i>Ανάλυση όλων των πειραματικών τιμών ομαλοποιημένης τάσης συνάφειας</i>					
<b>Χρόνος Έκθεσης</b>	0.004	5.19	2.90	1.79	
<b>Είδος Τσιμέντου</b>	0.096	2.30	2.90	0.79	(2)
<i>Ανάλυση τιμών τάσης συνάφειας των δοκιμίων control και ομαλοποιημένης τάσης συνάφειας ενανθρακωμένων δοκιμίων μέχρι 6 μήνες έκθεσης (Η ενανθράκωση δεν έχει φθάσει ακόμα την ράβδο IOΠ)</i>					
	0.665	0.57	6.59	0.09	(3)
<i>Ανάλυση τιμών τάσης συνάφειας των δοκιμίων control και ομαλοποιημένης τάσης συνάφειας ενανθρακωμένων δοκιμίων μετά από 6 μήνες έκθεσης (Η ενανθράκωση έχει φθάσει την ράβδο IOΠ)</i>					
	0.243	2.09	6.59	0.32	(4)
<i>Ανάλυση των τιμών τάσης συνάφειας πριν η ενανθράκωση φθάσει την ράβδο IOΠ και μετά</i>					
	0.021	5.67	4.05	1.4	(5)

\* Η πιθανότητα λάθους στο συμπέρασμα ότι υπάρχει σχέση ανάμεσα στην εξαρτημένη και την ανεξάρτητη μεταβλητή

\*\* Μέτρηση της συνεισφοράς των ανεξάρτητων μεταβλητών (χρόνος έκθεσης, είδος τσιμέντου) στην πρόβλεψη της εξαρτημένης μεταβλητής (τάσης συνάφειας)

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 επήρειας της ενανθράκωσης στην τάση συνάφειας της ράβδου.

### 3.3 Διείδυση της ενανθράκωσης

Αναλύοντας στατιστικά (regression analysis) την σχέση βάθος και χρόνου ενανθράκωσης, δημιουργηθήκαν μαθηματικές εκφράσεις της μορφής  $D=K \cdot \sqrt{t}$  ("D" είναι το βάθος ενανθράκωσης, "t" ο χρόνος έκθεσης και "K" ο συντελεστής ενανθράκωσης), από όπου υπολογίστηκε η ακριβής χρονική στιγμή που η ενανθράκωση (επιταχυνόμενη) έφτασε των ράβδο ινοπλισμένων πολυμερών (Δέμης, 2007). Χρησιμοποιώντας εμπειρικές σχέσεις που συσχετίζουν το βάθος ενανθράκωσης μετά από μία χρονική περίοδο "t<sub>i</sub>" σε "c<sub>i</sub>" συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα, με τον χρόνο "t<sub>s</sub>" που χρειάζεται το ίδιο βάθος ενανθράκωσης να προχωρήσει σε κανονικές περιβαλλοντολογικές συνθήκες διοξειδίου του άνθρακα "c<sub>s</sub>" δημιουργήθηκε μία ισοδύναμη κλίμακα επιταχυνόμενου και πραγματικού χρόνου έκθεσης (Δέμης, 2007). 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. Στα τσιμέντα τύπου OPC, για παράδειγμα, ο χρόνος έκθεσης δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$t_s = 375 \cdot \left( \frac{D}{78.41} \right)^2 \quad (5)$$

Όπου t<sub>s</sub> = χρόνος έκθεσης σε πραγματικές συνθήκες, D = βάθος ενανθράκωσης.

### 3.4 Επίδραση της ενανθράκωσης στην συνάφεια ΙΟΠ

Αναλύοντας στατιστικά (regression analysis) 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  $\left( \sigma_r \right)$  για χρονικές περιόδους αφότου η ενανθράκωση φθάσει την ράβδο (Εξίσωση 6). Λαμβάνοντας υπόψη την μεταβολή της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, λόγω χρόνου (προσδιορισμένη με βάση των Ευρωκώδικα 2 – Εξίσωση 7) και λόγω ενανθράκωσης (προσαυξημένη κατά 15 %), μπορεί να υπολογιστεί η αναμενόμενη τάση συνάφειας  $\left( \sigma_r \right)$  με βάση τον Ευρωκώδικα 2 (Εξίσωση 8). Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να υπολογιστεί η

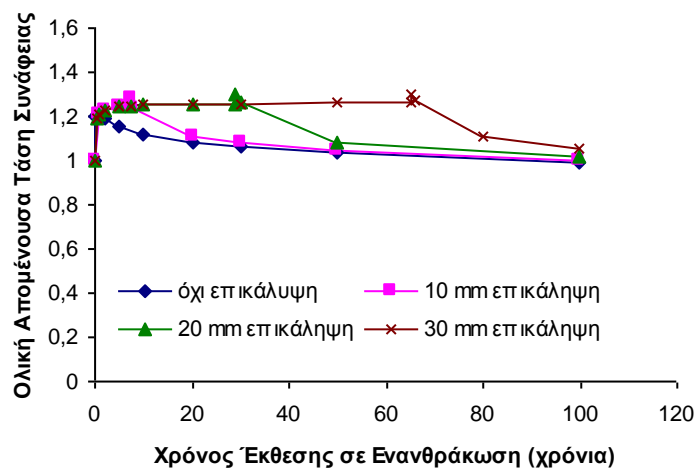
τάση συνάφειας λαμβάνοντας υπόψη την δράση της ενανθράκωσης σαν  $\bar{t}_R$  και τελικά η ολική απομένουσα τάση συνάφειας  $\bar{t}_R$  σε κάποιο χρονικό διάστημα αφότου η ενανθράκωση φτάσει την ράβδο, σαν τον λόγο της  $\bar{t}_R$  ενανθράκωση έφτασε την ράβδο /  $\bar{t}_R$  πριν η ενανθράκωση φθάσει την ράβδο (Εικόνα 7) (Δέμης, 2007).

$$\bar{t}_R (\%) = 92 - 4.33 \cdot \ln(t) \quad (6)$$

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm}, \quad \beta_{cc}(t) = \exp\left\{s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{0.5}\right]\right\} \quad (7)$$

$$\bar{t} = 2.25 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot 0.30 \cdot (1.15 \cdot f_{cm(t)})^{2/3} \quad (8)$$

Όπου:  $t$  = χρόνος (σε χρόνια),  $f_{cm}$  = μέση τιμή της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος σε 28 ημέρες,  $s$  = συντελεστής που εξαρτάτε από τον τύπο τσιμέντου που χρησιμοποιείται,  $n_1$ ,  $n_2$  = συντελεστές που εξαρτώνται από τις συνθήκες συνάφειας, την θέση και την διάμετρο της ράβδου.



Εικόνα 7. Ολική απομένουσα τάση συνάφειας κατά την διάρκεια ζωής του έργου

Παρατηρείται ότι τα αρνητικά αποτελέσματα της ενανθράκωσης στην συνάφεια των ινοπλισμένων πολυμερών στο σκυρόδεμα, σε βάθος χρόνου και κατά την διάρκεια ζωής του έργου εξισορροπούνται λόγω της αύξησης της θλιπτικής αντοχής (λόγω χρόνου και ενανθράκωσης).

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

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. 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 εναπόθεση ρυστάλλων  $\text{CaCO}_3$  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 ιών. Η επίδραση της ενανθράκωσης στην συνάφεια ΙΟΠ και σκυροδέματος κατά κάποιο τρόπο εξισορροπείται από την αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, λόγω χρόνου και ενανθράκωσης (15 % αύξηση). Φαίνεται ότι δεν χρειάζεται να ληφθεί υπόψιν η δράση της ενανθράκωσης, όσον αφορά την συνάφεια ΙΟΠ και σκυροδέματος, στον υπολογισμό συντελεστών ασφαλείας στα πλαίσια των κανονισμών.

#### ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Δέμης, Σ., «Ανθεκτικότητα ινοπλισμένων πολυμερών από γυαλί στο σκυρόδεμα», Διδακτορική Διατριβή (υπό την επίβλεψη του Καθ. Κ. Πιλακούτα), Department of Civil & Structural Engineering, The University of Sheffield, Sheffield, UK (2007)

Eurocode 2, Design of Concrete Structures – Part 1.1: general Rules and Rules for Buildings, EN 1992-1-1 (2004)

Karbhari, V.M., and Chu, W., “Degredation kinetics of pultruded E-glass/vinylester in alkaline media” ACI Materials journal, Vol. 102 (2005) 34-41

Yilmaz, V.T., and Glasser, F.P., “Chemical attack on alkali-resistant fibres in a hydrates cement matrix: characterization of corrosion products” J Non-Crystalline Solids, Vol. 151 (1992) 236-244

fib Bulletin 10 (2000) “Bond of Reinforcement in Concrete.” State-of-Art Report prepared by Task Group Bond Models (former CEB Task Group 2.5), August

BS EN 13295 (2004) British Standards. “Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures - Test Methods - Determination of Resistance to Carbonation.”