

Σύγκριση διαφορετικών υλικών και μεθόδων για την επισκευή κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN1504.

Κοσμάς Κ. Σίδερης

Αναπληρωτής Καθηγητής Δ.Π.Θ., kksider@civil.duth.gr

Παναγιώτα Μανίτα

Δρ. Πολ. Μηχανικός, Επιστ. Συνεργάτης Δ.Π.Θ., peg.manita@gmail.com

Ευφοροσνίδης Χρήστος

Πολ. Μηχανικός Δ.Π.Θ., chris_efro@hotmail.com

Μπατσούκα Παρασκευή

Πολ. Μηχανικός Δ.Π.Θ., parabats@civil.duth.gr

Ναβροζίδης Αναστάσιος

Πολ. Μηχανικός Δ.Π.Θ., tnavrozidis@gmail.com

Παπαλού Ελευθερία

Πολ. Μηχανικός Δ.Π.Θ., elevpapa@gmail.com

1. Εισαγωγή

Η φθορά των κατασκευών σκυροδέματος εξ αιτίας της ρηγμάτωσης ή/και αποφλοιώσης της επιφανειακής στρώσης είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα του πολιτικού μηχανικού. Στην περίπτωση που η συντήρηση συγκρίνεται με την ανακατασκευή των βλαμμένων στοιχείων σκυροδέματος, συχνά η πιο οικονομική και εύχρηστη λύση είναι η εκτεταμένη επισκευή. Η επισκευή και η αποκατάσταση των στοιχείων σκυροδέματος έχει εξελιχθεί σε ιδιαίτερα υπολογίσιμο οικονομικό κλάδο κατά τις τελευταίες δεκαετίες, διότι ένας σημαντικός όγκος γηρασμένων κατασκευών σκυροδέματος, παγκοσμίως, παρουσίασε τμήματα με εκτεταμένη διάβρωση. Το συνολικό κόστος συντήρησης όλων των ειδών των κτιριακών κατασκευών υπολογίζεται άνω των 20 δις \$, περίπου, κατ' έτος [Raupach 2006] και σημαντικό μέρος αυτού του ποσού δαπανάται στην επισκευή και προστασία των κατασκευών σκυροδέματος. Επομένως, είναι άμεσα αντιληπτό πόσο αναγκαία είναι η γνώση σχετικά με τη χρήση υλικών και μεθόδων επισκευής μεγάλης διάρκειας.

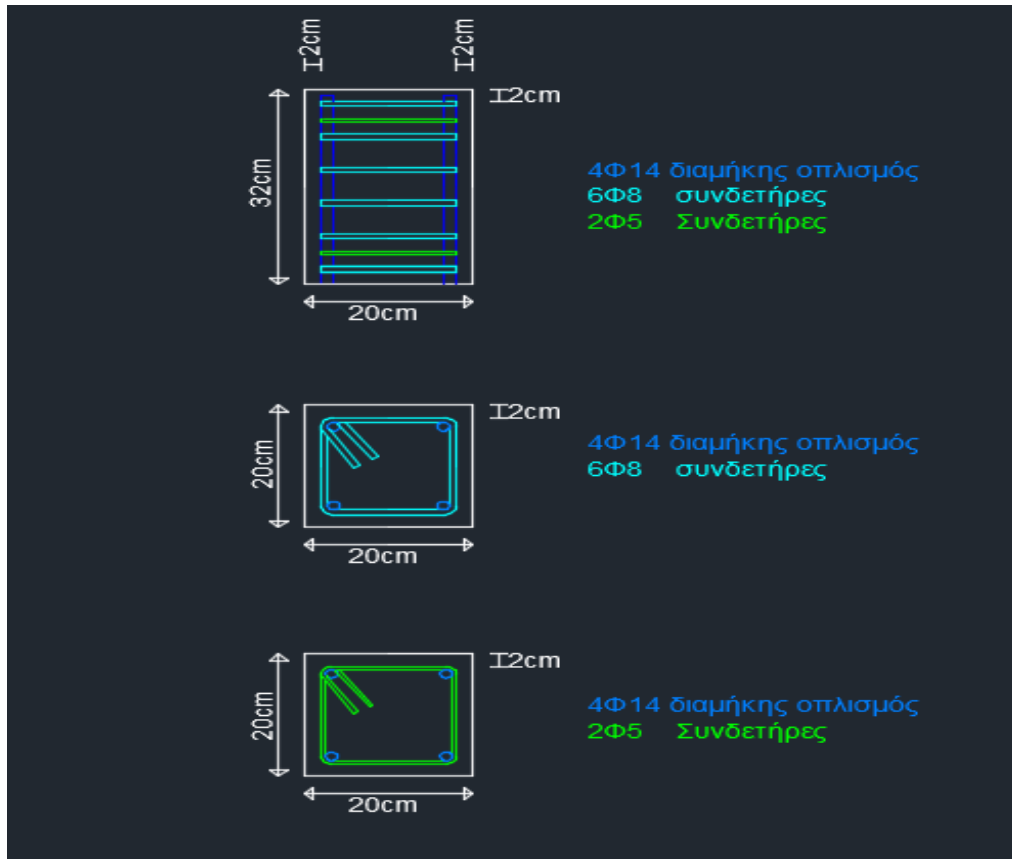
Το Εθνικό Πρότυπο «ΕΛΟΤ EN 1504: Προϊόντα και συστήματα για την προστασία και επισκευή δομημάτων από σκυρόδεμα – Ορισμοί, απαιτήσεις, έλεγχος ποιότητας και αξιολόγηση της συμμόρφωσης», έχει δημιουργήσει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για τη βιομηχανία επισκευής σκυροδέματος. Στα μέρη 2 έως 7 του EN 1504 παρουσιάζονται οι απαιτούμενες ιδιότητες των υλικών επισκευής και ορίζονται οι απαιτήσεις για την σήμανση CE των διαφόρων υλικών και μεθόδων που θα χρησιμοποιηθούν στην προστασία ή/και επισκευή των κατασκευών σκυροδέματος. Στο μέρος 8 καθορίζεται ο τρόπος ποιοτικού ελέγχου των προϊόντων, στο μέρος 9 περιγράφονται οι αρχές χρήσης των προϊόντων και στο μέρος 10 δίδεται μία γενική οδηγία για την επί τόπου εφαρμογή και την αξιολόγηση των εργασιών.

Στην παρούσα εργασία ερευνάται, πειραματικά, η αποτελεσματικότητα των συχνότερα χρησιμοποιούμενων υλικών επισκευής για τοπικές επισκευές.

2. Πειραματική διαδικασία

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν ήταν 20 υποστυλώματα διατομής 200 x 200mm και ύψους 320 mm. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν κατηγορίας αντοχής C12/15, με σκοπό την προσομοίωση της χαμηλής ποιότητας σκυροδέματος που χρησιμοποιείτο στα έργα πριν 40 χρόνια. Ο

διαμήκης οπλισμός αποτελείτο από 4 ράβδους χάλυβα διαμέτρου $\phi 14\text{mm}$. Οι συνδετήρες ήταν 6 ράβδοι διαμέτρου $\phi 8\text{mm}$ και 2 ράβδοι διαμέτρου $\phi 5\text{mm}$ (Σχήμα 1). Μετά την παρασκευή και την συμπίκνωσή τους, τα δοκίμια σκυροδέματος συντηρήθηκαν καλυμμένα με υγρές λινάτσες για 28 ημέρες.



Σχήμα 1: Διάταξη οπλισμών τυπικού υποστυλώματος διατομής (200x200)mm και ύψους 320mm

Στην ηλικία των 28 ημερών, τα δοκίμια υπεβλήθησαν σε ηλεκτροχημική διάβρωση, κατά την ακόλουθη διαδικασία. Τοποθετήθηκαν πάνω σε ξύλινη βάση στο εσωτερικό δεξαμενής που περιείχε υδατικό διάλυμα NaCl 3% κβ. Το επίπεδο του διαλύματος βρισκόταν, σταθερά, 5cm υψηλότερα της κάτω επιφάνειας των δοκιμίων. Ο κλωβός οπλισμού κάθε δοκιμίου συνδέθηκε με ηλεκτρικό κύκλωμα, ώστε να λειτουργήσει ως άνοδος στο κελί διάβρωσης. Ένα εξωτερικό χαλύβδινο πλέγμα βυθισμένο στη δεξαμενή λειτούργησε ως κάθοδος. Αμφότερες οι άνοδος και κάθοδος συνδέθηκαν με παροχή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος 6V. Μεταξύ της ανόδου και της παροχής ρεύματος τοποθετήθηκαν αμπερόμετρα, με σκοπό την μέτρηση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαπερνούσε κάθε δοκίμιο, σε διάφορα χρονικά διαστήματα.

Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης της πειραματικής διαδικασίας, όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε 5 κύκλους ύγρανσης – ξήρανσης. Η διάρκεια κάθε κύκλου ήταν 15 ημέρες: 3 ημέρες διαρκούσε η περίοδος ύγρανσης και 12 ημέρες η περίοδος ξήρανσης. Κατά τη διάρκεια της περιόδου ύγρανσης, τα δοκίμια ήταν βυθισμένα στη δεξαμενή και συνδεδεμένα με το κύκλωμα. Κατά τη διάρκεια της περιόδου ξήρανσης, τα δοκίμια παρέμεναν ασκεπή, σε εξωτερικό περιβάλλον.

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των τιμών του δυναμικού διάβρωσης (ΔV) και του ρεύματος διάβρωσης (I_{corr}). Ακόμη, η απώλεια μάζας του χάλυβα ΔM_s (g) που καταναλώθηκε σε χρόνο Δt (sec) υπολογίστηκε μέσω του νόμου Faraday, σύμφωνα με τον οποίο, ισχύει

$$\Delta M_s = I_{\text{corr}} \cdot \Delta t \cdot M / (n \cdot F)$$

όπου M το μοριακό βάρος του σιδήρου (55,87 g), n το ηλεκτρικό σθένος του σιδήρου (2: για την μετατροπή του $\text{Fe}^{2+} \rightarrow +2e$) και F η σταθερά Faraday $F=96500\text{A}$.



α)

β)

γ)

Σχήμα 2: α) Διαβρωμένα δοκίμια στο τέλος της πρώτης φάσης
 β) απομάκρυνση σκυροδέματος και καθαρισμός οπλισμού πριν την επισκευή και
 γ) επισκευασμένο δοκίμιο πριν την έναρξη της δεύτερης φάσης.

Μετά την ολοκλήρωση της πρώτης φάσης (Σχήμα 2α), τα δοκίμια απομακρύνθηκαν από το κελί διάβρωσης και επισκευάστηκαν χρησιμοποιώντας διαφορετικά υλικά και μεθόδους, σύμφωνα με τον κανονισμό ΕΛΟΤ EN 1504 (Πίνακας 1). Κάθε μέθοδος εφαρμόστηκε σε τρία διαβρωμένα δοκίμια. Των εργασιών επισκευής προηγήθηκε αφαίρεση του σαθρού σκυροδέματος και καθαρισμός του οπλισμού (Σχήμα 2β). Τρία δοκίμια δεν επισκευάστηκαν πριν την εισαγωγή τους στη δεύτερη φάση της πειραματικής διαδικασίας, με σκοπό να χρησιμεύσουν ως δοκίμια αναφοράς. Συγκεντρωτικά, οι μέθοδοι και τα υλικά επισκευής που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 1: Επισκευαστικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Προτύπου ΕΛΟΤ EN1504.

Υλικό επισκευής	Αρχή κατά ΕΛΟΤ EN1504-9	Μέθοδος κατά ΕΛΟΤ EN1504-9
Ινοπλισμένο Επισκευαστικό κονίαμα	3	3.1
Επισκευαστικό κονίαμα M [Strompinis et al]	3	3.1
Κρέμα Υδροφοβικού Εμποτισμού	2	2.1
Ψεκαζόμενος αναστολέας διάβρωσης	11	11.3
Βαφόμενος αναστολέας διάβρωσης	11	11.1

Μετά την ολοκλήρωση των επισκευών, όλα τα δοκίμια παρέμειναν παρέμεναν ασκεπή, σε εξωτερικό περιβάλλον, για 14 ημέρες (Σχήμα 2γ). Στην συνέχεια, βυθίστηκαν εκ νέου στη δεξαμενή, οπότε ξεκίνησε η δεύτερη φάση της πειραματικής διαδικασίας.

Η δεύτερη φάση της πειραματικής διαδικασίας συνίσταται από 5 νέους κύκλους ύγρανσης – ξήρανσης, όπου ο καθένας τους έχει διάρκεια 15 ημέρες και εξελίσσεται ακριβώς όπως, στην πρώτη φάση. Οι μετρήσεις διαφοράς δυναμικού (ΔV) και του ρεύματος διάβρωσης (I_{corr}) πραγματοποιήθηκαν και στη δεύτερη φάση, κατ' αναλογία. Η αποτελεσματικότητα κάθε

επισκευαστικής εργασίας εκτιμήθηκε μέσω του υπολογισμού της απώλειας μάζας των επισκευασμένων δοκιμίων.

Πίνακας 2: Υλικά και μέθοδοι επισκευής και προστασίας που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε δοκίμιο

	Δοκίμια	Α' Φάση Διάβρωσης	Φάση Επισκευών	Β' Φάση Διάβρωσης
Δοκίμια Αναφοράς Μερικώς Διαβρωμένα	Δ8 Δ9 Δ38	Πλήρης συμμετοχή χωρίς προστασία	Χωρίς επισκευή	Χωρίς συμμετοχή
Δοκίμια Αναφοράς Πλήρως Διαβρωμένα	Δ10 Δ24 Δ28	Πλήρης συμμετοχή χωρίς προστασία	Χωρίς επισκευή	Πλήρης συμμετοχή
1 ^η ομάδα προστασίας (1η ΟΜ)	Δ6 Δ13 Δ17	2 κύκλοι χωρίς μέθοδο προστασίας + 3 κύκλοι μετά από επάλειψη κρέμας υδροφοβικού εμποτισμού	Χωρίς επισκευή	Πλήρης συμμετοχή
2η ομάδα προστασίας (2η ΟΜ)	Δ19 Δ30 Δ31	2 κύκλοι χωρίς μέθοδο προστασίας + 3 κύκλοι μετά από χρήση ψεκαζόμενου αναστολέα	Χωρίς επισκευή	Πλήρης συμμετοχή
1η ομάδα επισκευής (1η ΟΕ)	Δ11 Δ18 Δ32	Πλήρης συμμετοχή χωρίς προστασία	Επάλειψη οπλισμού με αναστολέα + Πλήρωση δοκιμίου με ινοπλισμένο επισκευαστικό κονίαμα + Εμποτισμός δοκιμίου με ψεκαζόμενο αναστολέα	Πλήρης συμμετοχή
2η ομάδα επισκευής (2η ΟΕ)	Δ26 Δ36	Πλήρης συμμετοχή χωρίς προστασία	Επάλειψη οπλισμού με αναστολέα + Πλήρωση δοκιμίου με επισκευαστικό κονίαμα Μ + Εμποτισμός δοκιμίου με ψεκαζόμενο αναστολέα	Πλήρης συμμετοχή
3η ομάδα επισκευής (3η ΟΕ)	Δ2 Δ3 Δ15	Πλήρης συμμετοχή χωρίς προστασία	Επάλειψη οπλισμού με αναστολέα + Πλήρωση δοκιμίου με ινοπλισμένο επισκευαστικό κονίαμα + Επάλειψη δοκιμίου με κρέμα υδροφοβικού εμποτισμού	Πλήρης συμμετοχή
4η ομάδα επισκευής (4η ΟΕ)	Δ12 Δ16 Δ33	Πλήρης συμμετοχή χωρίς προστασία	Επάλειψη οπλισμού με αναστολέα + Πλήρωση με ινοπλισμένο επισκευαστικό κονίαμα	Πλήρης συμμετοχή
Μη διαβρωμένα δοκίμια	Δ20 Δ22 Δ27	Παρασκευάστηκαν και παρέμειναν σε συνθήκες περιβάλλοντος. (Δεν υπέστησαν επιταχυνόμενη διάβρωση με χλωριόντα και δεν εφαρμόστηκαν σε αυτά μέθοδοι προστασίας και επισκευής).		

3. Πειραματικά αποτελέσματα και Ανάλυση

Η απώλεια βάρους του χάλυβα υπολογίσθηκε χρησιμοποιώντας τον νόμο του Faraday. Η τιμή του I_{corr} μετρήθηκε 2 φορές σε κάθε κύκλο: μετά την τοποθέτηση του δοκιμίου στη δεξαμενή και πριν την αφαίρεσή του από αυτή για να τοποθετηθεί στις συνθήκες ξήρανσης. Η μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης υπολογίσθηκε σύμφωνα με τον κανονισμό ASTM C876, με σκοπό την εκτίμηση της διάβρωσης του οπλισμού.

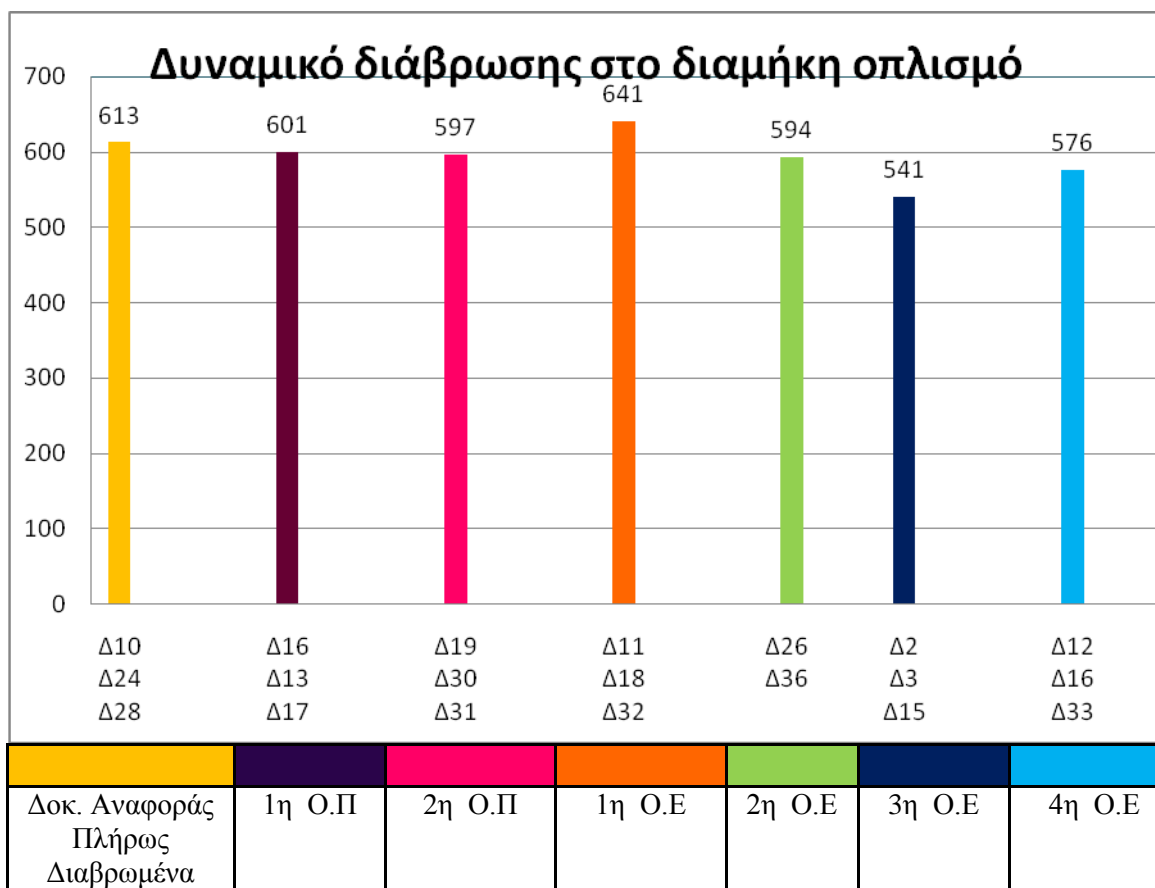
Μετά την ολοκλήρωση της πρώτης φάσης (5 κύκλοι ύγρανσης – ξήρανσης), παρατηρήθηκε απώλεια μάζας του χάλυβα περίπου 6%, σε όλα τα δοκίμια. Οι τιμές του δυναμικού διάβρωσης βρισκόταν στην περιοχή των -600mV , υποδεικνύοντας ότι όλα τα δοκίμια υπέστησαν σημαντική διάβρωση.

Μετά την πρώτη φάση, η αποδοτικότητα των υλικών επισκευής εκτιμήθηκε συγκριτικά, μετρώντας το δυναμικό διάβρωσης και το ρεύμα διάβρωσης των επισκευασμένων δοκιμίων σε διάφορα χρονικά διαστήματα. Όλες οι μέθοδοι επισκευής φάνηκαν αποτελεσματικές, εφόσον το δυναμικό διάβρωσης, όλων των επισκευασμένων δοκιμίων, αυξήθηκε άνω του 50%, μετά την επισκευή.

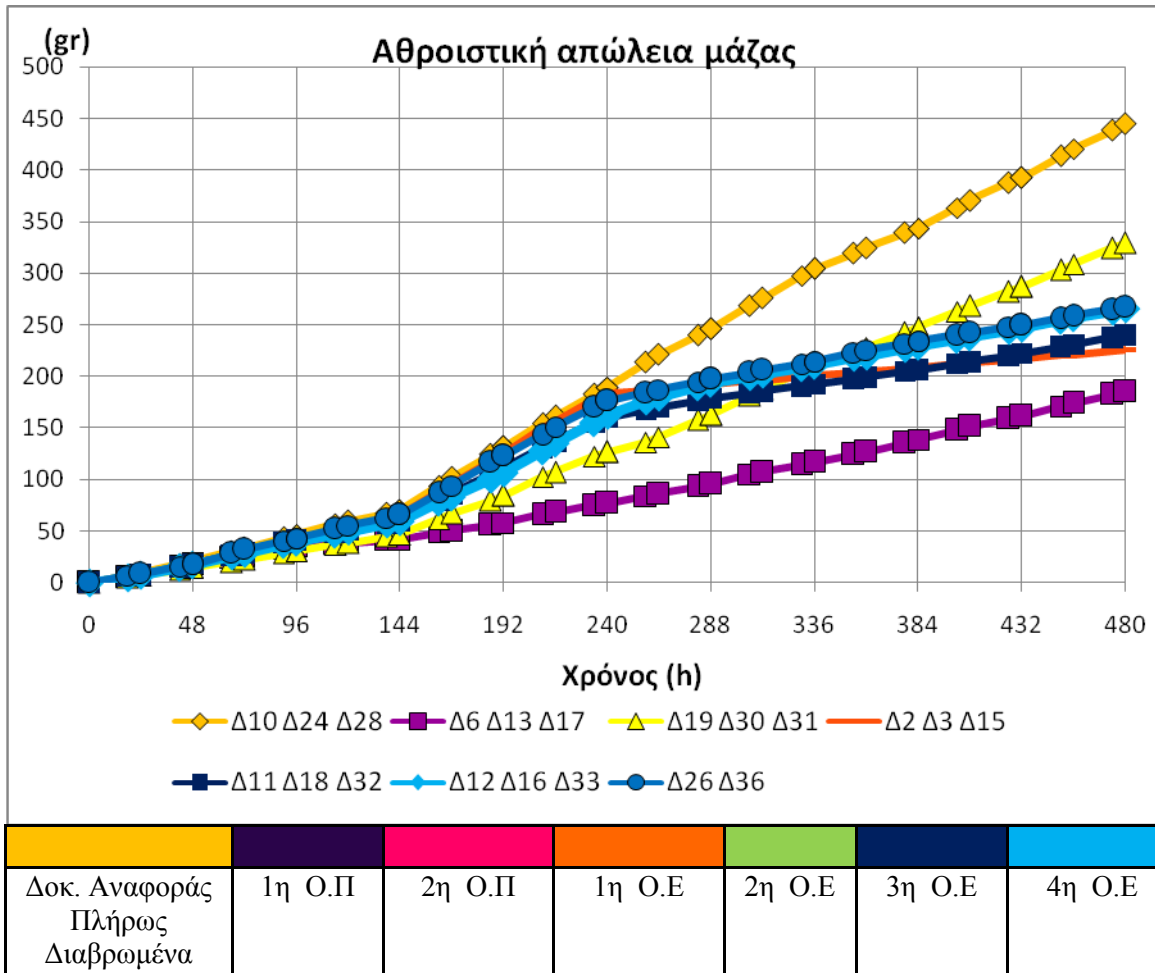
Κατά τη δεύτερη φάση διάβρωσης, το δυναμικό διάβρωσης των επισκευασμένων δοκιμίων μειώθηκε ακολουθώντας πορεία ανάλογη αυτής που παρουσίασε κατά την πρώτη φάση.

Την αναμενόμενη μείωση παρουσίασε το ρεύμα διάβρωσης, όπου όμως, σημειώθηκαν διαφοροποιήσεις μεταξύ των δοκιμίων με διαφορετικά υλικά επισκευής. Έχοντας ως κριτήριο την μείωση της τιμής του ρεύματος διάβρωσης, την πιο αποτελεσματική επισκευή σημείωσε ο συνδυασμός της ομάδας επισκευών 3 και της ομάδας επισκευών 1. Ο συνδυασμός των υλικών σε αυτές τις περιπτώσεις προστάτευσε τον οπλισμό των δοκιμίων σε ποσοστό 49.2% και 46.1 %, αντίστοιχα, σε σχέση με τα δοκίμια που δεν υπέστησαν επισκευή. Γενικά πάντως, όλες οι μέθοδοι επισκευής υπήρξαν ικανοποιητικά αποτελεσματικές, προσφέροντας ένα βαθμό προστασίας που κυμαινόταν μεταξύ 40,0% και 49.2%.

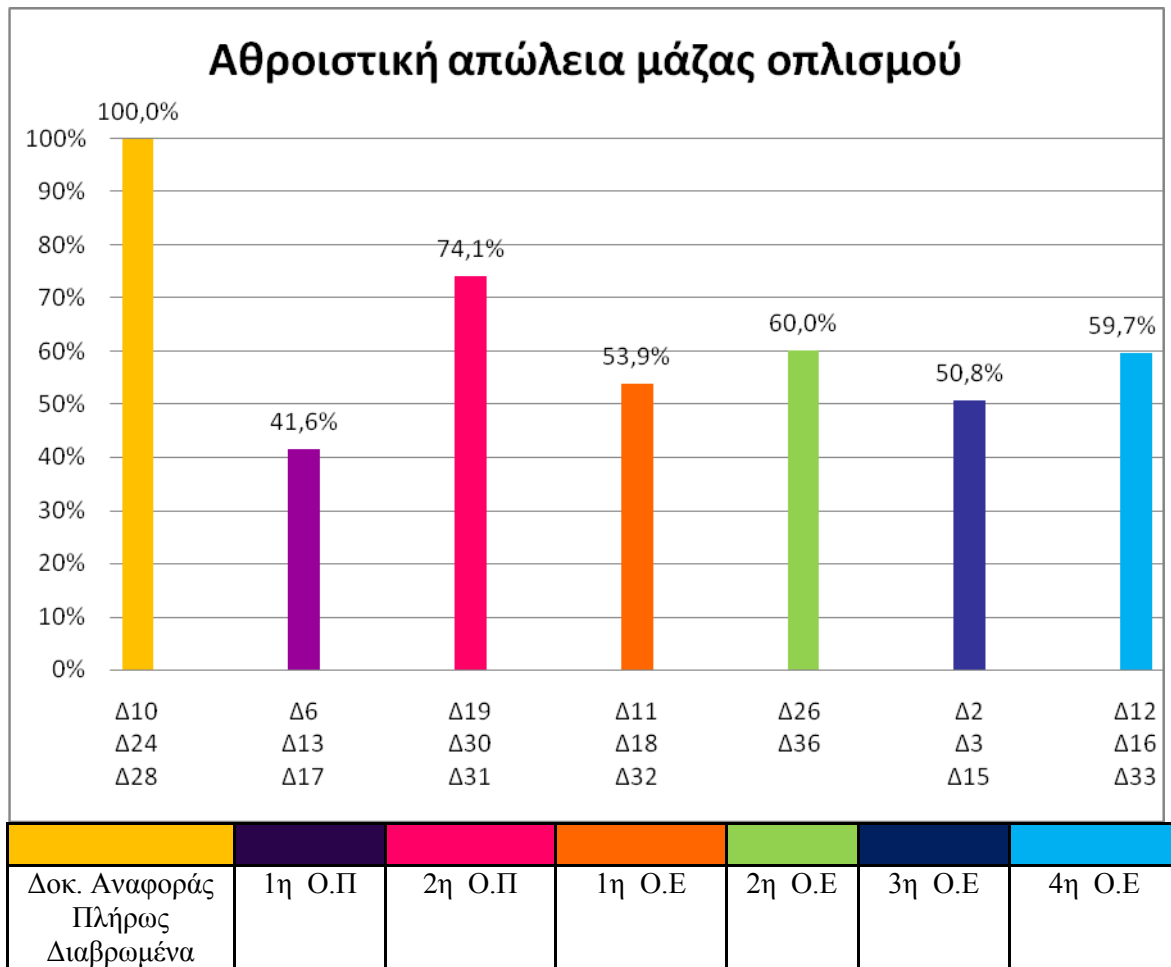
Αξιοσημείωτο όμως είναι το γεγονός ότι, τα δοκίμια της 1^{ης} ομάδας που υπέστησαν προστασία με βαφή υδροφοβικού εμποτισμού παρουσίασαν την χαμηλότερη τιμή απώλειας οπλισμού, καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Τα δοκίμια της 2ης ομάδας προστασίας – βαφή με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης – παρουσίασαν ικανοποιητικό βαθμό προστασίας μέχρι και τον 1^ο κύκλο της δεύτερης φάσης διάβρωσης. Μετά το σημείο αυτό όμως, ο ρυθμός διάβρωσης αυξήθηκε με αποτέλεσμα η ομάδα αυτών των δοκιμίων να παρουσιάζει τελικά το χαμηλότερο βαθμό προστασίας στο σύνολο του πειράματος. Είναι γνωστό ότι η εφαρμογή ψεκαζόμενου αναστολέα διάβρωσης είναι μία προληπτική μέθοδος προστασίας, η οποία πρέπει να επαναλαμβάνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Ενδεχομένως λοιπόν, η συχνότερη εφαρμογή του αναστολέα να οδηγούσε τελικά σε εξίσου χαμηλά ποσοστά απώλειας οπλισμού.



Σχήμα 3: Παρουσίαση τιμών δυναμικού διάβρωσης στο διαμήκη οπλισμό, ανά ομάδες δοκιμίων, μετά την ολοκλήρωση της Β φάσης διάβρωσης.



Σχήμα 4: Απεικόνιση της απώλειας μάζας (σε gr.) του σπλισμού κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, ανά ομάδες δοκιμίων.



Σχήμα 5: Απεικόνιση της απώλειας μάζας του οπλισμού (%), συγκριτικά με την απώλεια μάζας του οπλισμού των πλήρως διαβρωμένων δοκιμίων, ανά ομάδες δοκιμίων, στο τέλος της Β φάσης.

4. Συμπεράσματα

Η αποτελεσματικότητα διαφορετικών μεθόδων και υλικών επισκευής και προστασίας του οπλισμού του σκυροδέματος από διάβρωση λόγω χλωριόντων εξετάστηκε πειραματικά με την παρούσα εργασία. Παρά το δυσμενές σενάριο διάβρωσης που εφαρμόστηκε, όλες οι επισκευαστικές μέθοδοι παρουσίασαν σχεδόν την ίδια αποτελεσματικότητα προστατεύοντας τον οπλισμό του σκυροδέματος σε ποσοστό 40% έως 48%. Η προληπτική εφαρμογή ψεκαζόμενου αναστολέα διάβρωσης δεν προσέφερε αποτελεσματικό βαθμό προστασίας έναντι της διάβρωσης του οπλισμού καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, παρά το γεγονός ότι ο ρυθμός της διάβρωσης μειώθηκε κατά τους πρώτους τρεις κύκλους μετά την εφαρμογή. Φαίνεται λοιπόν ότι η συγκεκριμένη μέθοδος προστασίας μπορεί να αποβεί περισσότερο αποτελεσματική μετά από επαναλαμβανόμενες εφαρμογές μικρότερης χρονικής περιόδου. Η προληπτική προστασία με εφαρμογή υδροφοβικού εμποτισμού προσέφερε τη μέγιστη αποτελεσματικότητα έναντι της διάβρωσης του οπλισμού. Τα δοκίμια αυτά δεν υπέστησαν ρωγμές, δεν επισκευάστηκαν και μετά το τέλος και της δεύτερης φάσης της επιταχυνόμενης διάβρωσης παρουσίασαν συγκριτικά την μικρότερη απώλεια μάζας μεταξύ όλων των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν και επισκευάστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας.

Ευχαριστίες

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα ήταν προσφορά των εταιριών Sika Hellas ΑΕ και NORDIA ΑΕ.

Βιβλιογραφία

ΕΛΟΤ EN 1504: Προϊόντα και συστήματα για την προστασία και επισκευή δομημάτων από σκυρόδεμα – Ορισμοί, απαιτήσεις, έλεγχος ποιότητας και αξιολόγηση της συμμόρφωσης.

Raupach, M. (2006) Concrete repair according to the New European Standard EN 1504, in M. Alexander, H.D. Beushausen, F. Dehn and P. Moyo (eds) Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting –Taylor & Francis Group, London, ISBN 0 415 39654 9, pp.6-8.

Strompinis N., Sideris K.K., Douros V-Z, Vitsios I, Zervos I 2014: Self-compacting repair mortars according to BS EN 1504-3. in: Proceeding of Concrete Solutions 5th International Conference on Concrete Repair, Belfast, 1-4 September 2014: 653-657.

The Concrete Society, 2009. Repair of concrete structures with reference to BS EN 1504. Technical Report No. 74. Surrey: The concrete Society.

The Concrete Society, 2011.Cementitious materials. The effect of ggbs, fly ash, silica fume and limestone on the properties of concrete. Technical Report No. 69. Surrey: The concrete Society.

Tilly, G. P. & Jacobs, J. 2007.Concrete repairs. Performance in service and current practice. UK: IHS BRE Press

ΕΠΕΣ



Ελληνική Επιστημονική Εταιρία Ερευνών Σκυροδέματος (ΕΠΕΣ) - ΤΕΕ / Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας

Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος **«Κατασκευές από Σκυρόδεμα»**

Θεσσαλονίκη, 10-12 Νοεμβρίου 2016