

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΔΡΟΦΟΒΙΚΟΥ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Π. Κυριάκης¹, Α. Αποστολόπουλος², Π. Τσακίριδης³, Ν. Κασιώτης¹, Χ. Αποστολόπουλος^{2*}, Μ. Μπεάζη-Κασιώτη¹

¹ Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ

² Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών, Πανεπιστήμιο Πατρών

³ Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, ΕΜΠ

(*charrisa@upatras.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία, δοκιμάστηκε και μελετήθηκε η αξιοπιστία της αντιδιαβρωτικής προστασίας κυλινδρικών δοκιμίων οπλισμένου σκυροδέματος τα οποία προηγουμένως είχαν υποστεί υδροφοβικό εμπότισμό συγκεκριμένων επιλογών (οργανικών και ανόργανων υλικών) σε περιβάλλον επιταχυνόμενης διάβρωσης αλατονέφωσης για χρόνο έκθεσης 1000 ωρών. Κατά την διάρκεια της έκθεσης των δοκιμίων στο εργαστηριακό διαβρωτικό περιβάλλον, πραγματοποιήθηκε οπτική εξέταση της επιφανειακής κατάστασης της επικάλυψης. Στο πέρας της εργαστηριακής διάβρωσης πραγματοποιήθηκε αποκάλυψη του σιδηροοπλισμού και αποτιμήθηκε ο βαθμός βλάβης του (μέσω υπολογισμού της απώλεια μάζας και της μέτρησης των βελονισμών του σιδηροοπλισμού).

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι σημαντικό ρόλο στην αντιδιαβρωτική προστασία των δοκιμίων οπλισμένου σκυροδέματος (και κατ' επέκταση του χάλυβα οπλισμού), διαδραματίζει ο συνδυασμός και η αλληλουχία εφαρμογής των επιλεγόμενων υλικών προστασίας και όχι μεμονωμένα τα (εκάστοτε) επιλεγόμενα υλικά.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό ότι η ανθεκτικότητα του οπλισμένου σκυροδέματος των δομών, επηρεάζεται σημαντικά από τις υπάρχουσες περιβαλλοντικές συνθήκες (εσωτερικά και εξωτερικά) κάθε κατασκευής [1-2]. Σε παράκτια περιβάλλοντα η επίδραση της θερμοκρασίας, η σχετική υγρασία, τα χλωριόντα και άλλοι αέριοι ρύποι όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), διοξείδιο του θείου (SO₂) και τα οξειδία του αζώτου (NO_x), είναι παράγοντες θεμελιώδους σημασίας για τη φθορά και, κατά συνέπεια, την καταστροφή του σκυροδέματος, η οποία προκαλείται κατά κύριο λόγο από τη διάβρωση του σιδηρού οπλισμού [3]. Με βάση τα στοιχεία αυτά, γίνεται προφανές το διεθνές ερευνητικό ενδιαφέρον της ξεχωριστής διερεύνησης της προστασίας δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος μέσω επικαλύψεων εμπότισμού [4]. Η χρήση επικαλύψεων αποτελεί μια σημαντική μεθοδολογία αντιδιαβρωτικής προστασίας, μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η "απομόνωση" του μετάλλου από το διαβρωτικό περιβάλλον. Το μέγεθος της προστασίας που προσφέρουν οι επικαλύψεις εξαρτάται όχι μόνο από το πάχος της επικάλυψής τους αλλά και από τις φυσικομηχανικές τους ιδιότητες. Από χημικής άποψης οι επικαλύψεις διακρίνονται σε:

Οργανικές επικαλύψεις: Όπως διαφόρων τύπων οργανικά χρώματα, πολυμερή, ρητίνες κλπ.

Ανόργανες, μεταλλικές επικαλύψεις επί του χάλυβα: Όπως τα θυσιαζόμενα επιστρώματα Zn, Cd, Sn, Al).

Ανόργανες, μη μεταλλικές: Επικαλύψεις χημικής μετατροπής όπως οξειδία, φωσφορικά, χρωμικά, εμαγιέ) και η τσιμεντοκονία.

Η προστασία του σκυροδέματος και του σιδηροοπλισμού πραγματοποιείται μέσω: Διαποτισμού, Σφράγισης, Εμποτισμού, Υδροφοβικού εμπότισμού, Επικάλυψης με κονιάματα και Βαφής. Στην παρούσα εργασία, δοκιμάστηκε και μελετήθηκε η αξιοπιστία συγκεκριμένων σχημάτων υδροφοβικού εμπότισμού (οργανικών και ανόργανων υλικών) έναντι διάβρωσης επί στοιχείων

οπλισμένου σκυροδέματος σε περιβάλλον έκθεσης επιταχυνόμενης διάβρωσης αλατονέφωσης διάρκειας 1000 ωρών. Στόχος της εργασίας ήταν να μελετηθούν: η αντίσταση έκαστης κατηγορίας δοκιμίων σε διάβρωση, η μελέτη της βλάβης διάβρωσης του εγκιβωτισμένου χάλυβα καθώς και η μελέτη της μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος μέσω μηχανικών δοκιμών εφελκυσμού [5-6].

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Για τις ανάγκες των δοκιμών, προετοιμάστηκαν: Κυλινδρικά δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος με χάλυβα B500c διαμέτρου 12mm και σκυρόδεμα τύπου C_{16/20} με πάχος επικάλυψης 10mm. Από ένα σύνολο 9 δοκιμίων οπλισμένου σκυροδέματος τα 7 επικαλύφτηκαν επιφανειακά με ψυχρά υλικά μέσω υδροφοβικού εμποτισμού. Όλες οι επικαλύψεις και οι εμποτισμοί πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN-1504 02. Οι δοκιμές επιταχυνόμενης διάβρωσης αλατονέφωσης, πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με ASTM Standard B117. [7]



Εικόνα 1. Γενική άποψη των δοκιμίων μετά την προετοιμασία τους.

Στο δοκίμιο 1, η πρώτη στρώση, περιελάμβανε υδροφοβικό εμποτισμό με Primer υδατικού διαλύματος σιλοξάνης (ποσοστό στερεών σιλοξάνης 15%), με κατανάλωση: 0,125 Lt/m², η δεύτερη στρώση: περιελάμβανε εμποτισμό με ακρυλικό γαλάκτωμα επιφανειακής προστασίας με κολλοειδές νανοδομημένο διοξείδιο του πυριτίου (ποσοστό στερεών 15%) και κατανάλωση: 0,125 Lt/m², η τρίτη στρώση: περιελάμβανε επικάλυψη με ανακλαστικό χρώμα - ελαστομερές (anticarbonation) προστασίας έναντι διεισδύσεων, κατανάλωση: 0,330 Lt/m² και πάχος στεγνού φιλμ 250 μm.

Στο δοκίμιο 2, η πρώτη στρώση, εμποτισμός με ακρυλικό γαλάκτωμα επιφανειακής προστασίας με κολλοειδές νανοδομημένο διοξείδιο του πυριτίου (ποσοστό στερεών 15%) και κατανάλωση: 0,250 Lt/m².

Στο δοκίμιο 3, η πρώτη στρώση, περιελάμβανε υδροφοβικό εμποτισμό με Primer σιλοξάνης υψηλής συγκέντρωσης (ποσοστό στερεών 80%) και κατανάλωση: 0,200 Lt/m².

Στο δοκίμιο 4, η πρώτη στρώση, περιελάμβανε υδροφοβικό εμποτισμό με Primer υδατικού διαλύματος σιλοξάνης (ποσοστό στερεών σιλοξάνης 15%), με κατανάλωση: 0,250 Lt/m².

Στο δοκίμιο 5, η πρώτη στρώση, περιελάμβανε υδροφοβικό εμποτισμό με Primer υδατικού διαλύματος σιλοξάνης (ποσοστό στερεών σιλοξάνης 15%), με κατανάλωση: 0,250 Lt/m², η δεύτερη στρώση: περιελάμβανε επιφανειακή προστασία με ανόργανο φωτοκαταλυτικό χρώμα υψηλής διαπνοής με κατανάλωση: 0,125 Lt/m² και πάχος ξηρού φιλμ 90 μm.

Στο δοκίμιο 6, η πρώτη στρώση, περιελάμβανε υδροφοβικό εμποτισμό με Primer σιλοξάνη υψηλής συγκέντρωσης 80% με κατανάλωση: 0,200 Lt/m², η δεύτερη στρώση, περιελάμβανε

επιφανειακή προστασία με ανόργανο φωτοκαταλυτικό χρώμα υψηλής διαπνοής με κατανάλωση: 0,250 Lt/m² και πάχος ξηρού φιλμ 90 μm.

Στο δοκίμιο 7, η πρώτη στρώση, περιελάμβανε εμποτισμό με ακρυλικό γαλάκτωμα επιφανειακής προστασίας, (ποσοστό στερεών 15% με κατανάλωση: 0,250 Lt/m² , η δεύτερη στρώση, περιελάμβανε επιφανειακή προστασία με ανόργανο φωτοκαταλυτικό χρώμα υψηλής διαπνοής με κατανάλωση: 0,330 Lt/m² και πάχος ξηρού φιλμ 250 μm.

Τα δίχως επικάλυψη δοκίμια υπό στοιχεία 8 και 9 χρησιμοποιήθηκαν ως δοκίμια αναφοράς.



Εικόνα 2. Γενική άποψη των δοκιμίων μετά από έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Ο έντονος βαθμός της επιφανειακής βλάβης της επικάλυψης του σκυροδέματος (μετά 37 ημέρες) των δοκιμίων με στοιχεία 2, 5, 6, επέβαλλε την διακοπή της δοκιμής διάβρωσης και τον έλεγχο της κατάστασης του σιδηροοπλισμού μέσω μετρήσεων του ημιδυναμικού τους καθώς και στο δοκίμιο αναφοράς με στοιχεία 9. Το δυναμικό διάβρωσης E_{corr} του σιδηροοπλισμού, μετρήθηκε σε πέντε διακεκριμένες ισομεγέθεις περιοχές μήκους 10cm κατά μήκος του (Πίνακας 1), χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδιο αναφοράς Cu/CuSO₄ .

Πίνακας 1.

	I	II	III	IV	V
Δοκίμιο [2]	-520 (μV)	-440 (μV)	-510 (μV)	-520 (μV)	-420 (μV)
Δοκίμιο [5]	-440 (μV)	-395 (μV)	-345 (μV)	-330 (μV)	-350 (μV)
Δοκίμιο [6]	-345 (μV)	-305 (μV)	-325 (μV)	-310 (μV)	-320 (μV)
Δοκίμιο [9]	-515 (μV)	-470 (μV)	-465 (μV)	-440 (μV)	-380 (μV)

Οι έντονα δυσμενείς περιοχές των δοκιμίων (υψηλή πιθανότητα διάβρωσης <90 %) 9 και 2, ταυτίζονται με τις θέσεις όπου στο σκυρόδεμα προϋπήρχαν επιφανειακοί πόροι. Αντίθετα, στα δοκίμια με στοιχεία 5 και 6, οι τιμές του ημιδυναμικού εμφανίζουν μικρότερη ένταση, επομένως και μειωμένη πιθανότητα διάβρωσης του σιδηροοπλισμού γεγονός που μπορεί να αποδοθεί αφενός στην ικανοποιητική σκυροδέτηση, και αφετέρου, στην επαρκέστερη επιφανειακή προστασία του σκυροδέματος των δοκιμίων. Ο υπολογισμός της απώλειας μάζας του σιδηροοπλισμού, πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον Κ.Τ.Χ. 2008 κεφάλαιο 10.3 [8]. Στον Πίνακα 2, παρουσιάζονται οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα του υπολογισμού της ποσοστιαίας απώλειας

μάζας των δοκιμών με στοιχεία 1,3,4,7 καθώς και των δύο δοκιμών αναφοράς (υπό στοιχεία 8 και 9), έπειτα απο έκθεση 1000 ωρών στο διαβρωτικό περιβάλλον επιταχυνόμενης διάβρωσης αλατονέφωσης. Η απώλεια μάζας του σιδηροοπλισμού των δοκιμών 1, 3, 4, 7, καταγράφηκε κατά δέκα φορές μειωμένη σε σύγκριση με τα αντίστοιχα των δοκιμών αναφοράς (δίχως επιφανειακή προστασία). Στον Πίνακα 3, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών εφελκυσμού των ράβδων σιδηροοπλισμού από δοκίμια αναφοράς (μη διαβρωμένα), και δοκίμια σιδηροοπλισμού έπειτα από 1000 ώρες έκθεσης (γυμνών, εγκιβωτισμένων δίχως προστασία, και των εγκιβωτισμένων δοκιμών -1,3,4,7- με επιφανειακή προστασία). Με βάση την συμπεριφορά των δοκιμών 1, 3, 4 και 7 προέκυψε ότι σημαντικό παράγοντα προστασίας αποτελεί ο συνδυασμός και η αλληλουχία εφαρμογής των επιλεγόμενων υλικών προστασίας.

Πίνακας 2. Ποσοστιαίες απώλειες μάζας σιδηροοπλισμού.

Δοκίμια	Μήκος (mm)	Μάζα (gr)	Μάζα/Μήκος (gr/mm)	Μάζα Προστατ. με κερί (gr)	Τελική Μάζα (gr)	ΔΜ (gr)	Μάζα Διαβ. Περιοχής (gr)	Απώλεια Μάζας (%)	Μέση Τιμή (%)
1	533	472,06	0,885666	159,42	471,78	0,28	312,64	0,090	0,09625%
3	534	479,49	0,897921	161,63	479,19	0,30	317,86	0,094	
4	533,5	482,46	0,90433	162,78	482,18	0,28	319,68	0,088	
7	537	480,59	0,894953	161,09	480,23	0,36	319,50	0,113	
8	535	481,03	0,899121	161,84	478,35	2,68	319,19	0,840	1,077%
9	537,5	482,99	0,898586	161,75	478,77	4,22	321,24	1,314	

Πίνακας 3. Μηχανικά χαρακτηριστικά των ράβδων σιδηροοπλισμού.

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (Μη Διαβρωμένα)					
Όνομασία Δοκιμίου	Απώλεια Μάζας (%)	Όριο Διαρροής [R _p] (MPa)	Όριο Αντοχής [R _m] (MPa)	Παραμόρφωση Θράυσης [E ₁₀₀] (%)	Ενέργεια Παραμόρφωσης [U] (MPa)
Φ12-Ref1	-	563,9	654,14	9,45	59,22
Φ12-Ref2	-	573	658,4	10,25	62,35
Φ12-Ref3	-	558	651,2	9,63	58,32
Μέση Τιμή	-	564,97	654,58	9,78	59,96
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΓΥΜΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (Διάβρωση 1000 Ώρες)					
Φ12-Bare-3	3,19	496,63	605,19	9,1	52,35
Φ12-Bare-4	4,25	489,85	594,9	8,94	51,41
Μέση Τιμή	3,72	493,24	600,05	9,02	51,88
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΧΩΡΙΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ (Διάβρωση 1000 Ώρες)					
Φ12-8	0,84	551,59	643,48	9,19	56,47
Φ12-9	1,314	548	641	9,27	56,89
Μέση Τιμή	1,077	549,795	642,24	9,23	56,68
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ (Διάβρωση 1000 Ώρες)					
Φ12-1	0,09	558,61	651,79	9,55	60,08
Φ12-3	0,094	565,64	656,46	8,92	54,3
Φ12-4	0,088	557,59	654,14	9,89	60,9
Φ12-7	0,113	558,62	656,48	9,72	59,77

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Απο τον στερεοσκοπικό έλεγχο της επιφάνειας των ράβδων σιδηροοπισμού των δοκιμών υπο στοιχεία 1, 3, 4 και 7 έπειτα από έκθεση 1000 ωρών στην διάβρωση, δεν προέκυψαν μετρήσιμα βάθη βελονισμών (σε σύγκριση με τα την αρχική τους κατάσταση). Ομοίως και τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών των αντίστοιχων ράβδων χάλυβα (1,3,4,7) συγκρινόμενα με τις αντίστοιχες ράβδους αναφοράς (Reference) δεν παρουσίασαν διαφοροποίηση. Σημαντικός παράγοντας της αντιδιαβρωτικής προστασίας των δοκιμών οπισμένου σκυροδέματος, αναδείχτηκε ο συνδυασμός και η αλληλουχία εφαρμογής των επιλεγόμενων υλικών προστασίας και όχι τα εκάστοτε μεμονωμένα υλικά προστασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Zawadiak J, Wojciechowski S, Piotrowski T, Krypa A. (2017). *AICHE*, 5(3): 37-42.
- [2] Ahmed, N.M., Mohamed, M.G., Tammam, R.H., Mabrouk, M.R., Performance of coatings containing treated silica fume in the corrosion protection of reinforced concrete, *Pigment and Resin Technology* 47(4), 2018, pp. 350-359
- [3] Luna Molina, F.J., Alonso Alonso, M.C., Sánchez Moreno, M., Jarabo Centenero, R., Corrosion protection of galvanized rebars in ternary binder concrete exposed to chloride penetration, *Construction and Building Materials* 156, 2017, pp. 468-475
- [4] Ahmed, N.M., Mohamed, M.G., Mabrouk, M.R., Study on the anticorrosive behavior of new core-shell pigments for protection of reinforced concrete steel in sulfate environment, *Construction and Building Materials* 118, 2016, pp. 226-234
- [5] Saravanan, K., Selvaraj, R., Sekar, A.S.S., Corrosion of steel reinforcement bars and its protection by geopolymer coating, *International Journal of Applied Engineering Research* 10(21), 2015, pp. 42440-42444
- [6] Kamde, D.K., Pillai, R.G., Effect of the degree of corrosion on bond performance of Cement Polymer Composite (CPC) Coated steel rebars, *MATEC Web of Conferences*, 2018, 199, 04010.
- [7] ASTM Standard B117. Standard Practice for Operating Slat Spray (Fog) Apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, DOI: 10.1520/B0117-97; 1997.
- [8] Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων 2008 (ΚΤΧ 2008), Κεφάλαιο 10, παράγραφος 10.1-10.4.