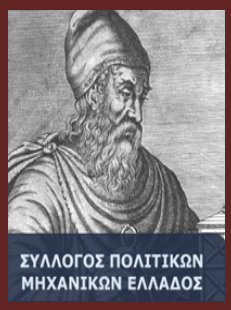
ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ 7

ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΧΑΛΥΒΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

(και δόκιμες πρακτικές για να μην επέλθει διάβρωση)



ΣΠΜΕ

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Έκδοση 1η

Νοέμβριος 2016

Αγαπητές & Αγαπητοί Συνάδελφοι,

Το παρόν τεύχος αποτελεί την 7η κατά σειρά Τεχνική Οδηγία της Επιτροπής Τεχνολογίας Σκυροδέματος του **Σ**υλλόγου **Π**ολιτικών **Μ**ηχανικών **Ε**λλάδος. Η παρούσα έκδοση αποτελεί το δεύτερο μέρος μιας τριλογίας επάνω στο κρίσιμο αντικείμενο της ανθεκτικότητας στοιχείων σκυροδέματος, το οποίο ενίοτε αμελείται ως το συμπληρωματικό του σχεδιασμού νέων δομημάτων. Στη δεδομένη δυσμενή συγκυρία της γενικευμένης επιβράδυνσης του κλάδου των Κατασκευών, η γνώση των μηχανισμών φθοράς και των πρακτικών συντήρησης των υφιστάμενων κατασκευών και υποδομών μπορεί να αποτελέσει μια εναλλακτική οδό που θα προσφέρει ευκαιρίες.

Πρόκειται για ένα πολύ ευρύ πεδίο, που στη συνέχεια θα εξειδικευτεί περαιτέρω με την Τεχνική Οδηγία 8 «Επισκευές ρωγμών».

Η Επιτροπή Τεχνολογίας Σκυροδέματος αποτελεί μια δραστήρια ομάδα καταρτισμένων κι έμπειρων συναδέλφων που με την αφιλοκερδή και συνεχή συμμετοχή τους έχουν συμβάλει ενεργά στη διάχυση της γνώσης προς το σύνολο των Συναδέλφων. Εκ μέρους του Δ.Σ. του Συλλόγου Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδος μεταφέρω τις θερμές Ευχαριστίες για τη συνεισφορά τους αυτή.

Οποιεσδήποτε παρατηρήσεις και επιστημονικές τοποθετήσεις επί του κειμένου είναι ευπρόσδεκτες και θα ληφθούν υπόψη σε μελλοντική έκδοση.

Το παρόν κείμενο σε καμία περίπτωση δεν αποτελεί κανονιστικό κείμενο με υποχρεωτική εφαρμογή και δεν υποκαθιστά κανονισμούς οι οποίοι βρίσκονται σε ισχύ ή θα ισχύσουν στο μέλλον.

Συναδελφικά,

Βασίλειος Μπαρδάκης

πρόεδρος Δ.Σ.

Η Επιτροπή Τεχνολογίας Σκυροδέματος Σ.Π.Μ.Ε. αποτελείται από:

Α. Σακελλαρίου, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός (Πρόεδρος Επιτροπής)

Χ. Ζέρης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Αντιπρόεδρος Επιτροπής)

Ν. Μαρσέλλος, Πολιτικός Μηχανικός, MSc (Γραμματέας Επιτροπής)

Χ. Βογιατζής, Πολ. Μηχανικός

Ν. Ζυγούρης, Πολ. Μηχανικός, MSc

Β. Μπαρδάκης, Δρ. Πολ. Μηχανικός

Κ. Παπανικολάου, Επίκουρη Καθηγήτρια Παν. Πατρών

Σ. Παπατζανή, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Γ. Πιττός, Πολ. Μηχανικός, MSc

Ι. Σφήκας, Δρ. Πολ. Μηχανικός Ε.Μ.Π. MSc

Ν. Καρυστινός, Πολ. Μηχανικός

ΣΥΛΛΟΓΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΛΛΑΔΑΣ
(ΣΠΜΕ)

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Τεχνική Οδηγία 7: Διάβρωση χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος

(και δόκιμες πρακτικές για να μην επέλθει διάβρωση)

Έκδοση 1η

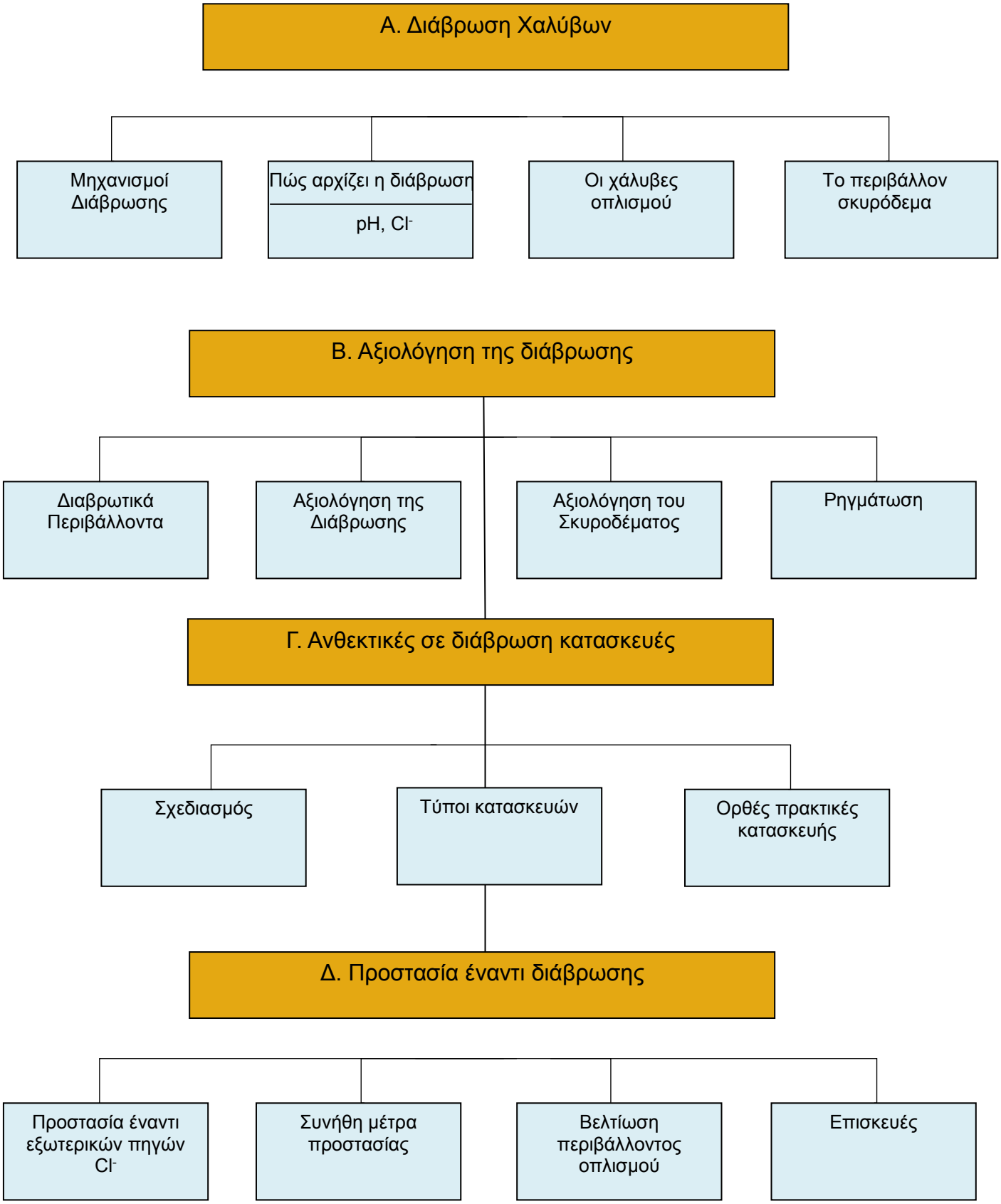
ΑΘΗΝΑ –2016

Πίνακας Περιεχομένων

Διάγραμμα Νο 1: Διάβρωση χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος (και δόκιμες πρακτικές για να μην επέλθει διάβρωση)

1. Γενικά
2. Ποιος είναι ο μηχανισμός διάβρωσης;
3. Πως αρχίζει η διάβρωση είτε από ενανθράκωση είτε από Cl^-;
4. Υπάρχουν οπλισμοί προστατευμένοι από διάβρωση;
5. Προστατεύεται ο οπλισμός από το περιβάλλον σκυρόδεμα;
6. Πως ταξινομούνται τα διάφορα διαβρωτικά περιβάλλοντα;
7. Ποιες είναι οι μέθοδοι αποτύπωσης του διαβρωτικού περιβάλλοντος και της βέλτιστης επιλογής επέμβασης μιας κατασκευής;
8. Ποιες μέθοδοι υπάρχουν για αξιολόγηση της διάβρωσης;
9. Ποιες μέθοδοι υπάρχουν για αξιολόγηση του σκυροδέματος;
10. Πως σχεδιάζουμε μια ανθεκτική σε διάβρωση κατασκευή;
11. Πως επηρεάζει η διάβρωση τους οπλισμούς ανά τύπο κατασκευής;
12. Ποιες κατασκευαστικές πρακτικές ακολουθούμε για μια ανθεκτική κατασκευή;
13. Ποια είναι η προστασία των κατασκευών από εξωτερικές πηγές Cl^-;
14. Πώς αξιολογείται μια κατασκευή έναντι ευαισθησίας σε διάβρωση; (αξιολόγηση και εν λειτουργία)
15. Ποια τα συνήθη μέτρα προστασίας;
16. Εμφάνιση ρωγμών από διάβρωση οπλισμού. Βασικές έννοιες
17. Πηγές

Διάγραμμα Νο 1: Διάβρωση χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος (και δόκιμες πρακτικές για να μην επέλθει διάβρωση)



1. Γενικά

- Η Οδηγία αυτή περιγράφει:
  α) τους παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού
  β) τα μέτρα για την προστασία του ενσωματωμένου οπλισμού στις νέες κατασκευές
  γ) τις τεχνικές για τον εντοπισμό της διάβρωσης σε εν λειτουργία κατασκευές και
  δ) τις διεργασίες για θεραπεία της διάβρωσης

- Η διάβρωση του χάλυβα σε κατασκευές από σκυρόδεμα παρατηρήθηκε, κατά τη διεθνή βιβλιογραφία, αρχικά σε κατασκευές κοντά σε θαλάσσιο περιβάλλον (1960). Κατασκευές εκτεθειμένες σε Cl^- , προερχόμενα από διάφορες πηγές όπως οδοστρώματα γεφυρών, χώροι στάθμευσης, κ.ά. ανέδειξαν το πρόβλημα. Η εκτεταμένη έρευνα που ακολούθησε και που ανέλυσε τους παράγοντες που συνεισφέρουν στη διάβρωση του χάλυβα έκανε κατανοητό το μηχανισμό διάβρωσης – ιδιαίτερα αυτόν λόγω Cl^- - και τα ευρήματα της έρευνας βοήθησαν τόσο στη μείωση των φαινομένων διάβρωσης στις νέες κατασκευές (μέσω ορθότερου σχεδιασμού για την αποφυγή τους) όσο και στη βελτίωση των μεθόδων εντοπισμού και επισκευής των βλαβών από διάβρωση στις υφιστάμενες κατασκευές.

- Ο σπουδαιότερος λόγος διάβρωσης του χάλυβα στις κατασκευές από σκυρόδεμα είναι η έκθεσή τους σε Cl^-. Όμως, διάβρωση μπορεί να επέλθει και δίχως την παρουσία Cl^- . Τέτοιο παράδειγμα είναι η ενανθράκωση του σκυροδέματος η οποία μειώνει την αλκαλικότητα του σκυροδέματος και έτσι επιτρέπει τη διάβρωση, βεβαίως με ταυτόχρονη παρουσία υγρασίας και οξυγόνου. Σημειωτέον ότι, τόσο η διαδικασία διείσδυσης Cl^- όσο και η ενανθράκωση, σε σκυροδέματα με χαμηλό λόγο Ν/Τ υπό συνήθεις συνθήκες περιβάλλοντος, είναι συνήθως μια μακρόχρονη διαδικασία.

- Η αλλοίωση του σκυροδέματος εξαιτίας της διάβρωσης του οπλισμού επέρχεται επειδή τα στερεά προϊόντα της διάβρωσης (σκουριά) καταλαμβάνουν μεγαλύτερο όγκο από ότι ο αρχικός χάλυβας και ασκούν σημαντικές πιέσεις λόγω διόγκωσης στο περιβάλλον σκυρόδεμα. Οι εξωτερικές εκδηλώσεις της οξείδωσης του χαλύβδινου οπλισμού περιλαμβάνουν κηλίδωση, ρηγμάτωση και αποφλοίωση του σκυροδέματος. Ταυτόχρονα, η διατομή του οπλισμού μειώνεται ενώ αλλοιώνεται και η συνάφειά του. Με την πάροδο του χρόνου, μπορεί να προκύψει απομείωση της φέρουσας ικανότητας του στοιχείου αλλά και της παραμορφωσιμότητάς του, καθώς ο οξειδωμένος χάλυβας ψαθυροποιείται, είτε εξαιτίας απώλειας συνάφειας μεταξύ του οπλισμού και του σκυροδέματος λόγω της μείωσης των νευρώσεων (εφόσον υπάρχουν), της ρηγμάτωσης και της αποκόλλησης, είτε ως αποτέλεσμα της απομείωσης της διατομής του οπλισμού. Το τελευταίο αποτέλεσμα μπορεί να είναι σημαντικό σε κατασκευές που περιέχουν προεντεταμένο χάλυβα υψηλής αντοχής στις οποίες μικρές απώλειες μετάλλου μπορεί να προκαλέσουν αστοχία.

- Οι έρευνες για τη διάβρωση δεν έχουν βρει ένα ανθρακούχο χάλυβα ή άλλο τύπο οπλισμού που δεν θα διαβρώνεται όταν χρησιμοποιείται στο σκυρόδεμα και ο οποίος θα είναι ταυτόχρονα οικονομικά και τεχνικά εφικτός. Σοβαρές σκέψεις έχουν γίνει για τη χρήση ανοξείδωτου (stainless) χάλυβα οπλισμού στις κατασκευές που εκτίθενται σε χλωριόντα και πολλές κατασκευές έχουν χτιστεί με ανοξείδωτο χάλυβα. Επιπλέον, η πράξη και η έρευνα υποδεικνύουν την ανάγκη για ποιοτικό σκυρόδεμα, προσεκτικό σχεδιασμό, καλές κατασκευαστικές πρακτικές και λογικά όρια στην ποσότητα των χλωριόντων στα αναμεμειγμένα συστατικά του σκυροδέματος. Άλλα μέτρα που έχουν χρησιμοποιηθεί και επιπλέον διερευνηθεί περιλαμβάνουν τη χρήση αναστολέων διάβρωσης, προστατευτικών επικαλύψεων στον οπλισμό και καθοδική προστασία. Γενικά, καθένα από αυτά τα μέτρα έχει αποδειχτεί ότι μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά, δεδομένου του ορθού σχεδιασμού αλλά και της σωστής εφαρμογής. Τα προβλήματα,

ωστόσο, που δημιουργούνται από την διάβρωση του ενσωματωμένου οπλισμού και άλλων μεταλλικών ενθεμάτων, δεν έχουν εξαλειφθεί.

2. Ποιος ο μηχανισμός διάβρωσης;

- Ως διάβρωση ορίζεται η ηλεκτροχημική διαδικασία που περιλαμβάνει τη μεταφορά φορτίου (ηλεκτρόνια) και τη σταδιακή απώλεια της λειτουργικότητας του χάλυβα σκυροδέματος. Με απουσία μια εξωτερικής ηλεκτρικής πηγής, η εν λόγω ηλεκτροχημική διαδικασία απαιτεί δύο αντιδράσεις: μία αντίδραση που *παράγει* ηλεκτρόνια (γνωστή και ως ανοδική αντίδραση, κατά την οποία λαμβάνει χώρα η οξείδωση του χάλυβα (oxidation), παράγοντας ιόντα σιδήρου), και μία αντίδραση που *καταναλώνει* ηλεκτρόνια (γνωστή και ως καθοδική αντίδραση, κατά την οποία λαμβάνει χώρα η αναγωγή οξυγόνου (reduction), παράγοντας ιόντα υδροξυλίου).

<u>Ανοδικές αντιδράσεις:</u>

$$Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^{-}$$

$$2Fe^{++} + 4OH^{-} \rightarrow 2Fe(OH)_2 \text{ (υδροξείδιο σιδήρου)}$$

$$2Fe(OH)_2 + 1/2O_2 \rightarrow 2FeOOH + H_2O$$

$$Fe + OH^{-} + H_2O \rightarrow HFeO_2^{-} + H_2$$

<u>Καθοδικές αντιδράσεις:</u>

$$2H_2O + O_2 + 4e^{-} \rightarrow 4(OH)^{-}$$

$$2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2$$

- Πρέπει να σημειωθεί ότι το ποιες από αυτές τις αντιδράσεις θα πραγματοποιηθούν κατά περίπτωση εξαρτάται τόσο από τη διαθεσιμότητα υγρασίας και οξυγόνου στο όμορο περιβάλλον του χάλυβα, όσο και το pH του διαλύματος των πόρων της σκληρυμένης τσιμεντόπαστας. Επιπλέον, ο ρυθμός διάβρωσης εξαρτάται και από το πάχος του παθητικού στρώματος προστασίας του χάλυβα, το οποίο, πάντως, είναι συνήθως μικρό.

- Η διάβρωση ολοκληρώνεται σε τρία βασικά στάδια: το πρώτο στάδιο αφορά στην έναρξη της διάβρωσης (initiation period), το δεύτερο την εξέλιξη και διασπορά της διάβρωσης (corrosion growth – propagation period), ενώ το τελευταίο στάδιο περιλαμβάνει την καταστροφή οπλισμού ή την εν γένει απώλεια της λειτουργικότητας.

- Περισσότερες πληροφορίες για τον μηχανισμό, αλλά και για τα στάδια της διάβρωσης μπορούν να αναζητηθούν στην Παράγραφο 7 της Τ.Ο.6 του Σ.Π.Μ.Ε. για το Ανθεκτικό Σκυρόδεμα (Διάβρωση οπλισμού λόγω ενανθράκωσης ή/και δράσης χλωριόντων). Όσο αφορά στο χημικό υπόβαθρο των αντιδράσεων, ο αναγνώστης μπορεί να αναζητήσει επιπλέον πληροφορίες στην αμερικανική οδηγία ACI 222R.01.

3. Πώς αρχίζει η διάβρωση;

- Η ενεργός διάβρωση[1] του χαλύβδινου οπλισμού σκυροδέματος έπεται της αποδόμησης της παθητικής του προστασίας, δηλαδή της λεπτής επιφανειακής στρώσης του ένυδρου οξειδίου του σιδήρου που σχηματίζεται λόγω της υψηλής αλκαλικότητας του σκυροδέματος (pH 13[2]). Αυτή μπορεί να συμβεί σε όλη την επιφάνεια του χαλύβδινου στοιχείου (αποπαθητικοποίηση του χάλυβα – Φωτ.1α), λόγω μίας γενικής αλλαγής των θερμοδυναμικών συνθηκών, ή τοπικά (διάβρωση κατά βελονισμό – Φωτ.1β), εξαιτίας επικεντρωμένης χημικής προσβολής ή τοπικής βλάβης λόγω των παραλαμβανομένων τάσεων. Η πρώτη περίπτωση είναι συνήθως αποτέλεσμα της μείωσης του pH του σκυροδέματος σε τιμές που προκαλούν χημική αστάθεια της παθητικής προστασίας του χάλυβα (pH ≈ 9), ενώ η δεύτερη οφείλεται συνήθως στη δράση φθοροποιών ιόντων, όπως τα Cl^-, αλλά μπορεί να προκληθεί και από τη ρηγμάτωση της επικάλυψης (σκυροδέματος) του χαλύβδινου οπλισμού ή τοπικές συγκεντρώσεις τάσεων.

(α) (β)

Φωτ. 1. Χαλύβδινες ράβδοι οπλισμού σκυροδέματος: (α) με γενικευμένη διάβρωση και (β) με (τοπική) διάβρωση κατά βελονισμό

- Η συνηθέστερη αιτία της έναρξης διάβρωσης ενσωματωμένων στο σκυρόδεμα στοιχείων χάλυβα είναι η παρουσία Cl^-. Πηγές πλούσιες σε Cl^- είναι ορισμένα χημικά πρόσμικτα και χημικοί ρυπαντές, το θαλάσσιο περιβάλλον, τα παραπροϊόντα της βιομηχανίας χλωρίου-αλκάλεως και τα αντιπαγωτικά άλατα. Ο ακριβής και λεπτομερής μηχανισμός της αποδόμησης της στρώσης παθητικής προστασίας του χάλυβα δεν είναι επακριβώς γνωστός εξαιτίας των δυσκολιών που παρουσιάζει η μελέτη των σχετικών διεργασιών σε κλίμακα ατόμου σε εξαιρετικά λεπτά υμένια παθητικής προστασίας. Εκτιμάται ότι σε παχύτερες στρώσεις παθητικής προστασίας, τα χλωριόντα ενσωματώνονται σε αυτές σε σημεία αδυναμίας τους, δημιουργώντας ιοντικά ελλείμματα και ευνοώντας τη μετακίνηση ιόντων. Σε υπο-μονοστρωματικά υμένια παθητικής προστασίας, τα χλωριόντα είναι πιθανό να ανταγωνίζονται τα ιόντα υδροξυλίου για να καταλάβουν περιοχές έντονης

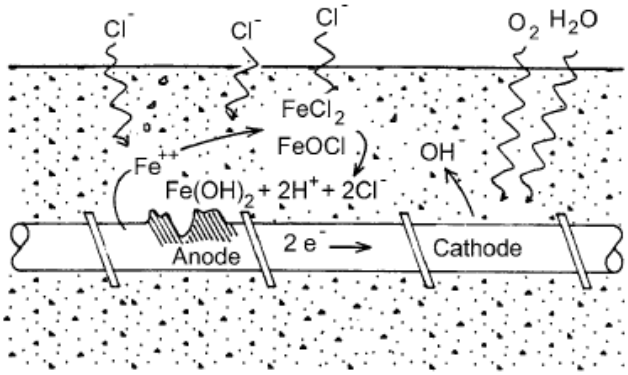
[1] Η ενεργός διάβρωση ευθύνεται για τη διαρκή απώλεια μάζας του υπό διάβρωση υλικού, σε αντίθεση με την ανενεργό διάβρωση, κατά την οποία σχηματίζεται μία χημικώς σταθερή στρώση οξειδίου του μετάλλου στην επιφάνεια του μεταλλικού στοιχείου που προστατεύει το εσωτερικό του από περαιτέρω διάβρωση.

[2] Το pH είναι ένας εύχρηστος τρόπος έκφρασης της συγκέντρωσης των ιόντων υδρογόνου [πιο σωστά, των κατιόντων υδροξωνίου (H_3O^+)] σε ένα υδατικό διάλυμα. Πιο συγκεκριμένα, με "pH" συμβολίζεται ο αρνητικός δεκαδικός λογάριθμος της συγκέντρωσης των ιόντων υδροξωνίου (κατιόντα υδρογόνου) στο διάλυμα. Το pH αποτελεί μέτρο οξύτητας ή αλκαλικότητας μίας χημικής ουσίας, εξ ου και αναφέρεται ως ενεργός οξύτητα. Στους 25 °C, η κλίμακα pH κυμαίνεται από 0 έως 14 και χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό της οξύτητας ενός διαλύματος. Διαλύματα για τα οποία η τιμή του pH είναι μικρότερη από 7 χαρακτηρίζονται ως όξινα, ενώ διαλύματα με pH μεγαλύτερο από 7 χαρακτηρίζονται αλκαλικά. Τέλος, τα διαλύματα με pH=7 ονομάζονται ουδέτερα.

ηλεκτροχημικής δραστηριότητας, με αποτέλεσμα να αποτρέπεται η παθητικοποίηση των περιοχών αυτών.

- Σε κάθε περίπτωση, το αποτέλεσμα είναι ότι η ενεργός διάβρωση μπορεί να ξεκινήσει από αυτές τις περιοχές και να εξελιχθεί με αυτοκαταλυτικό (και αυτοτροφοδοτούμενο) τρόπο (Σχήμα 1). Τα ιόντα χλωρίου και σιδήρου αντιδρούν μεταξύ τους και σχηματίζουν ένα ευδιάλυτο σύμπλεγμα το οποίο διαχέεται μακριά από την άνοδο. Όταν το σύμπλεγμα αυτό βρεθεί σε περιοχή με υψηλό pH, αποσυντίθεται αποδίδοντας αδιάλυτο υδροξείδιο του σιδήρου και απελευθερώνοντας το χλώριο, το οποίο είναι διαθέσιμο για την περαιτέρω απομάκρυνση σιδήρου από το χαλύβδινο στοιχείο. Επιπλέον, καθώς η περιοχή της τοπικής διάτρησης της στρώσης παθητικής προστασίας καθίσταται ανοδική, περισσότερα χλωριόντα έλκονται σε αυτή την περιοχή, με αποτέλεσμα την τοπική αύξηση της συγκέντρωσής τους.

- Το υδροξείδιο του σιδήρου παρουσιάζει χαμηλό βαθμό οξείδωσης και τείνει να αντιδρά περαιτέρω με οξυγόνο για τη δημιουργία οξειδίων μεγαλύτερου σθένους. Η διεργασία αυτή μπορεί να καταδειχθεί όταν θραυστεί για επισκόπηση ένα τμήμα οπλισμένου σκυροδέματος με τον οπλισμό του σε κατάσταση ενεργούς διάβρωσης: κοντά στην επιφάνεια του χάλυβα, παρατηρείται ένα ημιστερεό χημικό παράγωγο ανοικτού πράσινου χρώματος, το οποίο όταν έρθει σε επαφή με τον αέρα μαυρίζει και εν συνεχεία αποκτά το χαρακτηριστικό χρώμα της σκουριάς. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα υδροξείδια του σιδήρου έχουν μεγαλύτερο ειδικό όγκο σε σύγκριση με εκείνον του χάλυβα από τον οποίον προήλθαν. Συνεπώς, η αύξηση αυτή του όγκου, η οποία συνεχίζεται καθώς τα προϊόντα των αντιδράσεων αντιδρούν περαιτέρω με το διαλυμένο οξυγόνο στο νερό των πόρων, οδηγούν στην ανάπτυξη εσωτερικών θλιπτικών τάσεων στο σκυρόδεμα, οι οποίες μπορεί να καταστούν ικανές κάποια στιγμή να προκαλέσουν ρηγμάτωση και, στη συνέχεια, αποφλοίωση της επικάλυψης του διαβρωμένου οπλισμού. Ένας πρόσθετος (και «σιωπηλός») επιβαρυντικός παράγοντας της διαδικασίας διάβρωσης, ο οποίος συχνά παραβλέπεται εξαιτίας των εμφανών αποτελεσμάτων της (ρηγματώσεις), είναι η αυξημένη οξύτητα (δηλαδή η μείωση του pH) στην περιοχή της ανόδου, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε τοπική διάλυση του (σκληρυμένου) τσιμεντοπολτού.



Σχήμα 1. Μηχανισμός διάβρωσης κατά βελονισμό σε περιβάλλοντα πλούσια σε Cl^- (και παρουσία υγρασίας και οξυγόνου)

- ***Ελάχιστη περιεκτικότητα χλωριόντων για την έναρξη της διάβρωσης.*** Ο προσδιορισμός ενός συνολικού ελάχιστου ορίου της συγκέντρωσης χλωριόντων ικανό για την έναρξη της διάβρωσης δεν είναι εύκολος, λόγω της πολυπαραμετρικότητας του προβλήματος (συμπεριλαμβανόμενης και της επίδρασης των περιβαλλοντικών συνθηκών), αλλά και της δυσκολίας και μη ικανοποιητικής ακρίβειας που ενέχουν οι μέθοδοι εκτίμησης της περιεκτικότητας του σκυροδέματος σε χλωριόντα. Είναι ενδιαφέρον ότι αν και τα ελεύθερα χλωριόντα, όπως αναφέρθηκε πρόσφατα και στην Οδηγία TR 32 (Concrete Society, 2014), είναι υπεύθυνα για τη διάβρωση, οι μέθοδοι προσδιορισμού παρέχουν εκτιμήσεις για το σύνολο των χλωριόντων (ελεύθερα και δεσμευμένα) που

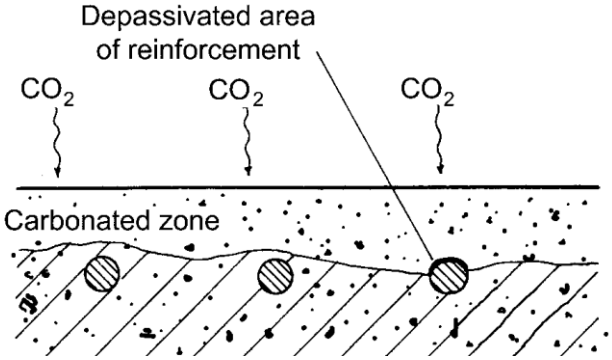
περιέχονται στο σκυρόδεμα. Επιπλέον, μία πολύ σημαντική παράμετρος του προβλήματος, ο λόγος της συγκέντρωσης των χλωριόντων προς τη συγκέντρωση των ιόντων υδροξυλίου, δεν είναι εύκολα προσδιορίσιμη πειραματικά. Τέλος, η μέθοδος μέτρησης (οξυδιαλυτά ή υδατοδιαλυτά χλωριόντα) και η έκφραση των αποτελεσμάτων (μάζα χλωριόντων κατά βάρος τσιμέντου ή σκυροδέματος) αποτελούν πρόσθετα σημεία δυσκολίας για τη σύγκριση αποτελεσμάτων από διαφορετικές βιβλιογραφικές πηγές. Για τους παραπάνω λόγους, τα ελάχιστα όρια της συγκέντρωσης χλωριόντων ικανά για την έναρξη της διάβρωσης δίνονται, γενικώς, ως τιμές περιεκτικότητας του συνόλου των Cl^- στο σκυρόδεμα (και όχι ως τιμές περιεκτικότητας των ευθυνόμενων για τη διάβρωση ελεύθερων χλωριόντων), έτσι ώστε να υπάρχει και συμβατότητα με τις συνηθέστερα εφαρμοζόμενες αναλυτικές μεθόδους, οι οποίες βασίζονται στη μέτρηση της ποσότητας οξυδιαλυτών χλωριόντων σε συγκεκριμένο δείγμα σκυροδέματος. Έτσι, τα περισσότερα κείμενα προδιαγραφών και κανονισμών θέτουν μέγιστα επιτρεπόμενα όρια συγκέντρωσης Cl^- στο σκυρόδεμα [δηλαδή, μέγιστες επιτρεπόμενες περιεκτικότητες των συνολικών (οξυδιαλυτών) χλωριόντων στο σκυρόδεμα], εκπεφρασμένα ως μάζα χλωριόντων επί τοις εκατό, κατά βάρος τσιμέντου (ή τσιμεντοειδών υλικών).

- Από την ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας προκύπτει ότι, για το σχεδιασμό στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, η τιμή 0.4% κατά βάρος τσιμέντου (ισοδυναμεί περίπου σε 1.4 kg/m^3 σκυροδέματος) μπορεί να ληφθεί ως μία κοινώς αποδεκτή τιμή του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου συγκέντρωσης χλωριόντων στο (μη ενανθρακωμένο και νωπό) σκυρόδεμα (κατά τον τρόπο που η συγκέντρωση αυτή ορίστηκε παραπάνω). Γενικά, οι τιμές των μέγιστων επιτρεπόμενων ορίων συγκέντρωσης χλωριόντων στο σκυρόδεμα που συνιστούν οι διάφοροι κανονισμοί είναι συντηρητικές και έχουν προέλθει από αστοχίες λόγω διάβρωσης (προκαλούμενης από χλωριόντα) σε στοιχεία προσόψεως κτιρίων, αλλά και σε προεντεταμένα στοιχεία. Τόσο το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206 (2013), όσο και άλλες εθνικές προδιαγραφές, περιορίζουν (κατά περίπτωση) τις τιμές της μέγιστης περιεκτικότητας σε Cl^- σε ένα εύρος που εκτείνεται από 0.1% έως 0.4%, κατά βάρος τσιμέντου (ή τσιμεντοειδών υλικών). Επιπλέον αξίζει να αναφερθεί ότι σε πρόσφατη ανασκόπηση μεγάλου αριθμού επιτόπιων διερευνήσεων σε πραγματικές κατασκευές ανά τον κόσμο, διαπιστώθηκε ότι, ανάλογα με τον τύπο του χάλυβα, αλλά και με τη μέθοδο προσδιορισμού, η περιεκτικότητα σε χλωριόντα που μετρήθηκε σε ήδη διαβρωμένους οπλισμούς κυμαινόταν από 0,02% έως 3,6% κ.β. τσιμεντοειδών υλικών στο μίγμα (Sfikas and Ingham, 2016).

- ***Έναρξη διάβρωσης λόγω ενανθράκωσης*** - Η ενανθράκωση είναι ένας γενικός όρος, ο οποίος χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει το φαινόμενο της μείωσης του pH του σκυροδέματος (σε τιμές μικρότερες του 9) μέσω αντίδρασης των αλκαλικών συστατικών του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού (ή ακόμα και συστατικών του μη ενυδατωμένου τσιμέντου) με το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) της ατμόσφαιρας, που διαχέεται σταδιακά προς το εσωτερικό του σκυροδέματος μέσω των πόρων. Το προϊόν της αντίδρασης αυτής είναι ανθρακικό ασβέστιο ($CaCO_3$). Αρχικά, το CO_2 διαχέεται διαμέσω της εξωτερικής επιφάνειας του σκυροδέματος λόγω της διαφοράς συγκέντρωσής του μεταξύ ατμόσφαιρας και συστήματος πορώδους του σκυροδέματος. Έτσι, δημιουργείται ένα λεπτό στρώμα ενανθρακωμένου σκυροδέματος πάχους μικρότερου του ενός χιλιοστού. Η περαιτέρω εισχώρηση του CO_2 εξαρτάται από τη διαπερατότητα του σκυροδέματος και την υγρασία. Η συνέχιση της ενανθράκωσης εξαρτάται από την ποσότητα του υδροξειδίου του ασβεστίου [$Ca(OH)_2$] που είναι διαθέσιμη προς αντίδραση με το CO_2.

- Η αντίδραση της ενανθράκωσης λαμβάνει χώρα στο υδατικό διάλυμα των πόρων. Επομένως, η πρώτη ένδειξη του ότι η ενανθράκωση βρίσκεται σε εξέλιξη είναι η πτώση του pH του διαλύματος των πόρων στο 8.5. Στην τιμή αυτή η στρώση παθητικής προστασίας του χάλυβα καθίσταται ασταθής. Η ενανθράκωση, γενικά, προχωρά εντός του

σκυροδέματος ως μέτωπο[1], εμπρός από το οποίο το σκυρόδεμα παραμένει ανεπηρέαστο και το pH του δεν μειώνεται. Όταν το μέτωπο της ενανθράκωσης φθάσει το χαλύβδινο οπλισμό (Σχήμα 2), τότε σημειώνεται γενικευμένη αποπαθητικοποίησή του σε μεγάλες περιοχές ή ακόμα και σε όλη την επιφάνειά του, ενώ μπορεί να ξεκινήσει εκτεταμένη διάβρωση. Ευτυχώς, ο ρυθμός ενανθράκωσης υγιών σκυροδεμάτων είναι σχετικά μικρός. Ωστόσο, κατασκευές σκυροδέματος μέσα ή κοντά σε βιομηχανικές περιοχές μπορεί να παρουσιάσουν ταχύτερους ρυθμούς ενανθράκωσης εξαιτίας της υψηλότερης συγκέντρωσης CO_2 στο περιβάλλον τους[2]. Υπό κανονικές συνθήκες, η συγκέντρωση CO_2 στην ατμόσφαιρα είναι ίση με 0.03% - 0.04% (με προοπτικές αύξησης λόγω της κλιματικής αλλαγής). Η τιμή αυτή δεκαπλασιάζεται σε μεγάλα αστικά κέντρα, ενώ σε βιομηχανικές περιοχές μπορεί να είναι έως και 100 φορές υψηλότερη.



Σχήμα 2. Το μέτωπο του ενανθρακωμένου σκυροδέματος συναντά τον οπλισμό

- ***Ρυθμός διάβρωσης μετά την έναρξή του*** – Η αποπαθητικοποίηση του χάλυβα (είτε τοπική είτε γενικευμένη) δεν είναι από μόνη της αρκετή για να επιφέρει ενεργό διάβρωση. Η παρουσία τόσο υγρασίας όσο και οξυγόνου στο σύστημα πορώδους του σκυροδέματος είναι απαραίτητη για να εξελιχθεί με έναν σημαντικό ρυθμό η διάβρωση. Και ενώ τα χλωριόντα είναι ευθέως υπεύθυνα για την έναρξη της διάβρωσης, διαδραματίζουν έμμεσο ρόλο στον καθορισμό του ρυθμού με τον οποίον εξελίσσεται αυτή μετά την έναρξή της. Οι κύριες παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν τον ρυθμό διάβρωσης (και αναφέρονται στο σκυρόδεμα) είναι η διαθεσιμότητα σε οξυγόνο, η ηλεκτρική αντίσταση, η σχετική υγρασία, το pH και η θερμοκρασία (με τις τρεις πρώτες παραμέτρους να είναι αλληλοσυνδεόμενες). Τα χλωριόντα (όπως προανεφέρθη) επηρεάζουν το pH, την ηλεκτρική αγωγιμότητα και το πορώδες του σκυροδέματος. Ομοίως, η ενανθράκωση προκαλεί καταστροφή της παθητικής προστασίας του χάλυβα, αλλά δεν επηρεάζει τον ρυθμό διάβρωσης. Μετά την έναρξη της διάβρωσης, ο ρυθμός εξέλιξής της μπορεί να μειωθεί με τη χρήση αναστολέων διάβρωσης.

[1] Το CO_2 διέρχεται ανεμπόδιστα από την ενανθρακωμένη στρώση του σκυροδέματος.

[2] Το φαινόμενο αφορά επίσης και ορισμένες τεχνικές επιταχυνόμενης συντήρησης μέσω τεχνητής θέρμανσης που υιοθετούνται στην προκατασκευή ή σε σκυροδέτηση σε χαμηλή θερμοκρασία (βλ. και Τ.Ο. 1).

4. Υπάρχουν οπλισμοί προστατευμένοι από τη διάβρωση;

Υπάρχουν ειδικές κατηγορίες (ποιότητες) ράβδων οπλισμού που παρουσιάζουν υψηλή αντοχή έναντι οξείδωσης και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, ανεξάρτητα από τις συνθήκες μέσα στις οποίες βρίσκονται. Οι ράβδοι αυτές είναι:

i. Ράβδοι με ειδική χημική σύσταση - Ανοξείδωτες (stainless steel bars)

ii. Ράβδοι με εποξική επικάλυψη (epoxy coated bars)

iii. Γαλβανισμένες ράβδοι (galvanized bars)

iv. Ράβδοι από ινοπλισμένα πολυμερή (με ίνες υάλου ή άνθρακα) (Fiber Reinforced Polymer – FRP bars/CFRP bars)

Οι παραπάνω κατηγορίες περιγράφονται συνοπτικά στην συνέχεια.

4.1 Ανοξείδωτες Ράβδοι - (stainless steel bars)

Με τον όρο «ανοξείδωτοι» χαρακτηρίζονται οι χάλυβες οι οποίοι έχουν περιεκτικότητα σε χρώμιο 10-12 % κ.β..

Αυτού του τύπου οι χάλυβες μπορούν να περιέχουν και άλλα στοιχεία όπως μαγγάνιο, νικέλιο κ.ά. τα οποία προσδίδουν πρόσθετες επιθυμητές ιδιότητες π.χ. συγκολλησιμότητα.

Το χρώμιο (βασικό συστατικό) έχει την ιδιότητα να δημιουργεί ένα προστατευτικό στρώμα τριοξειδίου του χρωμίου (Cr_2O_3) στην επιφάνεια της ράβδου, το οποίο παρά το μικρό του πάχος προστατεύει της ράβδο από τη διάβρωση.

Παρά το γεγονός ότι οι ανοξείδωτοι χάλυβες θεωρούνται απρόσβλητοι από οξείδωση, όταν βρεθούν σε περιβάλλον με υψηλή συγκέντρωση χλωρίων και κάτω υπό συγκεκριμένες συνθήκες, μπορούν να προσβληθούν.

Τα μέταλλα που θα χρησιμοποιηθούν και η περιεκτικότητα του κράματος εξαρτώνται από τον βαθμό της απαιτούμενης προστασίας, την απαιτούμενη αντοχή και το επιθυμητό κόστος.

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες συγκρινόμενοι με τους κοινούς χάλυβες, παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό, πλαστιμότητα, αντοχή σε κόπωση και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα.

4.2 Ράβδοι με εποξική επικάλυψη (epoxy coated bars)

Η χρήση των επικαλυμμένων ράβδων οπλισμού εφαρμόζεται για περισσότερο από 40 χρόνια. Η μέθοδος έχει εφαρμοστεί κυρίως σε έργα γεφυροποιίας, χώρους στάθμευσης οχημάτων, εδαφόπλακες, λιμενικά έργα, επισκευές κ.λπ. (Φωτ. 2).

Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο, οι ράβδοι οπλισμού επικαλύπτονται με εποξικό υλικό προκειμένου να προστατευτούν από τη διείσδυση των χλωριόντων και να καθυστερήσει το φαινόμενο της οξείδωσης.

Για τις ράβδους με επικάλυψη στις ΗΠΑ ισχύουν τα πρότυπα ASTM A775 και AASHTO M284 (το οποίο παραπέμπει στο προηγούμενο) και στην Ευρώπη το πρότυπο ISO 14654, τα οποία προδιαγράφουν με ακρίβεια την εφαρμογή της επικάλυψης και τις απαιτούμενες δοκιμές στο πλαίσιο του ποιοτικού ελέγχου.

Πρόβλημα για τις επικαλυμμένες ράβδους αποτελούν οι ασυνέχειες (σπασίματα) και τα σημειακά ελαττώματα (κατασκευαστικές ατέλειες) της εποξικής επικάλυψης.

Το πρότυπο ASTM A775 καθορίζει ότι :

1. το πάχος της επικάλυψης πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 130-300 μm
2. κατά την δημιουργία τυμπάνων, η επικάλυψη θα πρέπει να μη ρηγματώνεται

3. η επικάλυψη δεν θα πρέπει να έχει περισσότερα από έξι (6) σημειακά ελαττώματα (κατασκευαστικές ατέλειες) ανά μέτρο μήκους
4. σε περίπτωση που έχει καταστραφεί η επικάλυψη σε μία περιοχή της ράβδου, η επιφάνειά της δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το 2% της συνολικής επιφάνειας της ράβδου.

Φωτ. 2 Τοποθέτηση επικαλυμμένων ράβδων (EIG, Bridges)

4.3 Γαλβανισμένες ράβδοι (galvanized bars)

Οι γαλβανισμένες[1] ράβδοι χρησιμοποιούνται από το 1930 και είναι λιγότερο ευάλωτες έναντι διάβρωσης συγκρινόμενες με τις ράβδους με επικάλυψη. Κατασκευάζονται δε με επιψευδαργύρωση (π.χ. με εμβάπτιση επιφανειακά καθαρισμένου χάλυβα σε τήγμα ψευδαργύρου θερμοκρασίας περίπου 450°C).

Οι γαλβανισμένες ράβδοι όμως είναι ευάλωτες εάν βρεθούν σε επαφή με κοινό χάλυβα, οπότε θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε να απομονώνονται από τους λοιπούς οπλισμούς στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται και τα δύο είδη.

4.4 Ράβδοι από ινοπλισμένα πολυμερή ΙΟΠ (Fiber Reinforced Polymer - FRP)

Οι ράβδοι από ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ/Fiber Reinforced Polymer bars –FRP bars) αποτελούνται από πολυμερές υλικό οπλισμένο με ίνες υάλου (Glass FRP - GFRP) ή άνθρακα (Carbon FRP - CFRP).

Παρά το γεγονός ότι η έρευνα στις ράβδους από ΙΟΠ είναι σχετικά πρόσφατη, συγκρινόμενη με άλλους τύπους, οι ράβδοι αυτές έχουν χρησιμοποιηθεί σε πλήθος κατασκευών στη γεφυροποιία (καταστρώματα γεφυρών, στηθαία, πλάκες πρόσβασης, οχετοί κ.λπ.) και κυρίως σε κατασκευές που βρίσκονται σε περιβάλλον με υψηλή περιεκτικότητα σε χλωριόντα. Επίσης οι οπλισμοί αυτού του τύπου έχουν βρει εφαρμογή σε αποκαταστάσεις ιστορικών κατασκευών.

[1] Γαλβάνισμα είναι η διαδικασία εφαρμογής μιας επικάλυψης από ψευδάργυρο πάνω σε χάλυβα ή σίδηρο για να εμποδιστεί η διάβρωσή τους. Το γαλβάνισμα προστατεύει με δύο τρόπους:

- Πρώτον, δημιουργεί μια επικάλυψη ψευδαργύρου ανθεκτικού στη διάβρωση η οποία εμποδίζει τις διαβρωτικές ουσίες να φτάσουν το πιο ευαίσθητο σε διάβρωση μέταλλο και
- Δεύτερον, ο ψευδάργυρος χρησιμεύει ως μια θυσιαζόμενη άνοδος, έτσι ώστε ακόμη και αν η επικάλυψη γδαρθεί, ο εκτεθειμένος χάλυβας θα εξακολουθήσει να προστατεύεται από τον υπόλοιπο ψευδάργυρο.

Οι ράβδοι από ΙΟΠ (Φωτ. 3) παρουσιάζουν υψηλότερη εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας συγκρινόμενες με τους κοινούς χάλυβες, αλλά δεν εμφανίζουν μετελαστικό κλάδο (δεν έχουν δηλαδή επαρκή πλαστιμότητα).

Οι ράβδοι από ΙΟΠ έχουν χαμηλότερη θλιπτική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας, συγκριτικά με τα αντίστοιχα μεγέθη σε εφελκυσμό.

Φωτ. 3 Εφαρμογή ράβδων GFRP το 1999 (ACI 440.1R-06)

5. Προστατεύεται ο οπλισμός από το περιβάλλον σκυρόδεμα;

5.1 Γενικά

- Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, ορίζεται κατά ένα μεγάλο ποσοστό από την επιλογή των συστατικών του, δηλαδή του τσιμέντου, των αδρανών, του νερού και των προσθέτων. Κατά την εξέταση των επιπτώσεων στη διάβρωση του οπλισμού όλων των βασικών μηχανισμών προστασίας, όπως: μειωμένη διαπερατότητα, αντοχή σε ψύξη – απόψυξη, αντίσταση σε αλκαλοπυριτική αντίδραση, αντίσταση σε προσβολή θειικών, κ.λπ., η πιο σημαντική ιδιότητα του σκυροδέματος είναι η μειωμένη διαπερατότητα. Η διαπερατότητα περιγράφει την ταχύτητα μετακίνησης των υγρών ή των αερίων μέσα στο σκυρόδεμα και έχει σχέση με την σύνδεση των πόρων και των κενών στο σκληρυμένο σκυρόδεμα. Υποθέτοντας ότι υπάρχει επαρκής συντήρηση, η διαπερατότητα μπορεί να μειωθεί καταρχήν με τη χρήση χημικών προσθέτων ώστε να επιτευχθεί πρακτικά ο μικρότερος δυνατός λόγος Ν/Τσιμεντοειδή και κατά δεύτερον μέσω της χρήσης ποζολανικών προσθέτων, συμπληρωματικών τσιμεντοειδών υλικών και πολυμερών.

- Επομένως, οι αναλογίες του αναμίγματος που ενισχύουν την αντίσταση του οπλισμού έναντι διάβρωσης δεν είναι ουσιαστικά διαφορετικές από τις αναλογίες ενός καλής ποιότητας σκυροδέματος. Ο στόχος είναι να χρησιμοποιηθούν διαθέσιμα υλικά ώστε να παραχθεί ένα κατάλληλο ανάμιγμα που θα επιτρέπει τη σωστή ανάμιξη, μεταφορά, διάστρωση, συμπύκνωση και τελείωμα στη νωπή φάση και όταν συντηρηθεί κατάλληλα να δώσει χαμηλή διαπερατότητα στη σκληρυμένη φάση. Οι αναλογίες του αναμίγματος θα πρέπει να επιτρέπουν την άντληση του σκυροδέματος, αν απαιτείται, τον έλεγχο της εξίδρωσης και τη μείωση των συστολών (πλαστικής και ξηράνσεως).

5.2 Τσιμέντο και ποζολάνες

- Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, από την άποψη της διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού, οι παράγοντες ελέγχου είναι η σύσταση και η διαθεσιμότητα του διαλύματος των πόρων, παρά το ίδιο το σκυρόδεμα. Συνεπώς, είναι τα συστατικά του σκυροδέματος

που προσδιορίζουν το pH του διαλύματος των πόρων, το ολικό πορώδες και το μέγεθος των κόκκων που είναι σημαντικά για τη διαδικασία της διάβρωσης.

- Όταν ενυδατώνεται το τσιμέντο πόρτλαντ, το πυριτικό ασβέστιο αντιδρά και σχηματίζει ένυδρο πυριτικό ασβέστιο και υδροξείδιο του ασβεστίου. Το υδροξείδιο του ασβεστίου παρέχει ένα ουσιαστικό ρυθμιστή για το διάλυμα των πόρων διατηρώντας το pH στο επίπεδο του 12,6. Το pH είναι γενικά υψηλότερο από αυτήν την τιμή (τυπικά 13,5) εξαιτίας της παρουσίας των υδροξειδίων του καλίου και του νατρίου τα οποία θεωρητικά είναι πιο διαλυτά από το υδροξείδιο του ασβεστίου. Υπάρχουν σε περιορισμένες ποσότητες, ωστόσο, και κάθε ενανθράκωση ή ποζολανική δράση μειώνει γρήγορα το pH σε αυτό του κορεσμένου διαλύματος υδροξειδίου του ασβεστίου. Έτσι, από την άποψη της διάβρωσης, όσο πιο υψηλή είναι περιεκτικότητα αλκαλίων του τσιμέντου, τόσο πιο καλή είναι η προστασία έναντι διάβρωσης.

- Για ένα δοσμένο λόγο N/T, η λεπτότητα του τσιμέντου και τα ποζολανικά συστατικά προσδιορίζουν το πορώδες και το μέγεθος των πόρων. Γενικά, ορυκτά πρόσθετα όπως είναι η ιπτάμενη τέφρα, η σκωρία και η πυριτική παιπάλη μειώνουν και βελτιώνουν το πορώδες. Σκυροδέματα που περιέχουν αυτά τα ορυκτά επιδεικνύουν θεωρητικά ενισχυμένη αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων από το περιβάλλον. Εάν έχει χρησιμοποιηθεί μεγάλη ποσότητα ποζολάνης, όμως, όλο το υδροξείδιο του ασβεστίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ποζολανική δράση με αποτέλεσμα να μειωθεί ο ρυθμιστής pH και να επιτρέψει στο pH να πέσει σε επίπεδα στα οποία ο οπλισμός δεν είναι πλέον παθητικοποιημένος.

- Παραδοσιακά, η ικανότητα δέσμευσης του τσιμέντου για χλωριόντα έχει βρεθεί ότι σχετίζεται άμεσα με την περιεκτικότητα του τσιμέντου σε C_3A. Αυτό συμβαίνει επειδή τα ιόντα χλωρίου μπορούν να αντιδράσουν για να σχηματίσουν αδιάλυτα χλωροαργίλια. Τα ιόντα χλωρίου ωστόσο, δεν μπορούν να απομακρυνθούν όλα από το διάλυμα με χημική δέσμευση. Πάντα επέρχεται μια ισορροπία μεταξύ των δεσμευμένων και ελέυθερων χλωριόντων έτσι ώστε ακόμη και με υψηλές περιεκτικότητες C3A πάντα θα υπάρχουν μερικά ελεύθερα ιόντα χλωρίου στο διάλυμα.

5.3 Συνθήκες συντήρησης συναρτήσει του τύπου των τσιμέντων

- Όσο πιο πολύ χρόνο συντηρηθεί το σκυρόδεμα πριν εκτεθεί σε επιβλαβές περιβάλλον, τόσο καλύτερα θα αντισταθεί στη διείσδυση των χλωριόντων ή του CO2. Αυτό είναι εν μέρει σημαντικό για ανάμεικτα τσιμέντα ειδικά για εκείνα που περιέχουν ιπτάμενη τέφρα στα οποία η ποζολανική αντίδραση είναι πιο αργή από τις αντιδράσεις ενυδάτωσης του τσιμέντου πόρτλαντ. Σε πρώιμη ηλικία, το σκυρόδεμα με ιπτάμενη τέφρα συνήθως παρουσιάζει μικρότερη αντίσταση σε διείσδυση από χλωριόντα από ότι ένα σκυρόδεμα με τσιμέντο πόρτλαντ, ενώ σε μεταγενέστερη ηλικία το σκυρόδεμα ιπτάμενης τέφρας μπορεί να έχει καλύτερες ιδιότητες.

5.4 Λόγος N/T

- Το πορώδες και η ταχύτητα διείσδυσης των επιβλαβών ειδών σχετίζονται άμεσα με το λόγο νερού προς τσιμεντοειδή υλικά. Για σκυροδέματα υψηλής επιτελεστικότητας, ο λόγος είναι γενικά μικρότερος από 0,40 και μπορεί να γίνει και 0,30 με τη χρήση κατάλληλων προσθέτων μειωτών νερού. Γενικά, ένας μειωμένος λόγος N/T οδηγεί σε βελτιωμένη αντίσταση έναντι διάβρωσης.

5.5 Αδρανή

- Εκτός αν είναι πορώδη, επιμολυσμένα με χλωριόντα ή και τα δύο ταυτόχρονα, τα αδρανή γενικά έχουν μικρή επίδραση στην διάβρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα. Η ελεύθερη

υγρασία στα αδρανή θα συμβάλλει στην περιεκτικότητα σε νερό του αναμίγματος και γενικά αυξάνει το λόγο Ν/Τ εάν δεν υπολογιστεί για τη ρύθμιση της ποσότητας του νερού ανάμιξης. Το πορώδες της πάστας που περιβάλλει άμεσα τα αδρανή είναι συνήθως υψηλότερο από αυτό των αδρανών. Συνεπώς, αν τα αδρανή καταλαμβάνουν το πάχος επικάλυψης του οπλισμού η ικανότητα των χλωριόντων να φτάσουν τον οπλισμό αυξάνεται. Εάν χρησιμοποιηθούν ενεργά αδρανή και υπάρχουν αλκάλια στο συνδετικό υλικό θα πραγματοποιηθούν αλκαλοπυριτικές αντιδράσεις. Αυτό μπορεί να βλάψει το σκυρόδεμα και δυνητικά να επιταχύνει τη διαδικασία διάβρωσης σε ορισμένα περιβάλλοντα.

5.6 Αναστολείς διάβρωσης

- Ένας αναστολέας διάβρωσης (μετάλλων) σε σκυρόδεμα είναι μια ουσία που μειώνει τη διάβρωση (του μετάλλου) χωρίς μείωση της συγκέντρωσης του διαβρωτικού παράγοντα. Αυτή είναι μια παράφραση από τον ορισμό του ISO 8044 του αναστολέα διάβρωσης και χρησιμοποιείται για να υπάρξει σαφής διαχωρισμός μεταξύ του αναστολέα διάβρωσης και άλλων προσθέτων στο σκυρόδεμα που βελτιώνουν την αντίσταση σε διάβρωση μειώνοντας την είσοδο των χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Οι αναστολείς διάβρωσης μπορεί να δουλέψουν είτε ως ανοδικοί είτε ως καθοδικοί αναστολείς ή και τα δύο ή σαν δεσμευτές οξυγόνου. Μια σημαντική μείωση στην ταχύτητα είτε της ανοδικής είτε της καθοδικής αντίδρασης θα οδηγήσει σε σημαντική μείωση της ταχύτητας διάβρωσης.

- Όπως και στην περίπτωση των άλλων προσθέτων, οι αναστολείς διάβρωσης μπορεί να επηρεάσουν τις ιδιότητες του νωπού και του σκληρυμένου σκυροδέματος. Πριν τη χρήση τους, θα πρέπει να κατανοηθούν οι επιδράσεις τους στις ιδιότητες του σκυροδέματος και όπου είναι απαραίτητο να ληφθούν κατάλληλα μέτρα σε συνεννόηση με τον παραγωγό τους έτσι ώστε να υπερκεραστούν ή να ελαχιστοποιηθούν τα δυσμενή αποτελέσματα. Επειδή οι αναστολείς διάβρωσης είναι υδατοδιαλυτοί, υπάρχει ανησυχία ότι μπορεί να υπάρξει έκπλυση από το σκυρόδεμα ειδικά ανόργανων αλάτων, μειώνοντας έτσι τη συγκέντρωση του αναστολέα στο επίπεδο του οπλισμού. Όταν χρησιμοποιούνται σε σκυρόδεμα με λόγους Ν/Τ μικρότερους ή ίσους με 0,4 και επαρκή πάχη επικάλυψης οπλισμού, τα αποτελέσματα της έκπλυσης μειώνονται σημαντικά.

6. Πώς ταξινομούνται τα διάφορα διαβρωτικά περιβάλλοντα;

- Η ταυτοποίηση των περιβαλλοντικών επιδράσεων τις οποίες ενδέχεται να υποστούν οι (σε φάση σχεδιασμού) κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής τους είναι μία σημαντική παράμετρος, η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό, με στόχο οι κατασκευές να είναι προστατευμένες έναντι διάβρωσης. Έτσι, το σκυρόδεμα εντάσσεται στα διάφορα διαβρωτικά περιβάλλοντα ως εξής:

- **Σκυρόδεμα μη εκτεθειμένο στις καιρικές συνθήκες** – Τα δομικά στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος που παρουσιάζουν τον μικρότερο κίνδυνο διάβρωσης του ενσωματωμένου χαλύβδινου οπλισμού τους, είναι εκείνα που δεν έρχονται σε άμεση επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον και τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες. Δίχως την άμεση έκθεση σε υγρασία, σε συνδυασμό με τους κύκλους ξήρανσης που επέρχονται από τη χρήση στοιχείων θέρμανσης/ψύξης (π.χ. συστήματα κλιματισμού), ο οπλισμός των δομικών αυτών στοιχείων δεν διατρέχει υψηλό κίνδυνο διάβρωσης. Αν εξαιρεθούν ακραίες (ή/και ειδικές) συνθήκες και εάν ακολουθηθούν οι συστάσεις των κανονισμών για τα ελάχιστα πάχη επικάλυψης των οπλισμών και για την ποιότητα του σκυροδέματος, τα εν λόγω στοιχεία ενέχουν χαμηλή επικινδυνότητα έναντι διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού τους για τουλάχιστον 50 έτη. Εσωτερικά στοιχεία κτιρίων εκτιθέμενα σε περιοδική

διαβροχή, όπως στοιχεία σε κουζίνες, μπάνια, πισίνες ή χώρους με κρήνες/συντριβάνια και δομικά στοιχεία κατασκευασμένα με χλωριούχα πρόσμικτα μπορεί να αποτελέσουν εξαιρέσεις της ως άνω αναφερθείσας διαπίστωσης. Τέλος, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται σε χώρους όπως τα λεβητοστάσια όπου οι πλάκες στις οποίες εδράζονται οι λέβητες μπορεί να εκτίθενται σε συνεχή θέρμανση και σε επίπεδα συγκέντρωσης CO_2 υψηλότερα των συνήθων. Τα δομικά στοιχεία σε τέτοιους χώρους μπορεί να παρουσιάσουν φαινόμενα έντονης ενανθράκωσης. Το ίδιο ισχύει και για περίκλειστες κατασκευές στάθμευσης αυτοκινήτων.

- **Σκυρόδεμα εκτεθειμένο στις καιρικές συνθήκες** – Κατασκευές/στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος που εκτίθενται σε εναλλαγές των επιπέδων υγρασίας λόγω κλίματος διατρέχουν υψηλότερο κίνδυνο διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού τους σε σύγκριση με κατασκευές/στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος που δεν εκτίθενται σε καιρικές συνθήκες. Υπενθυμίζεται ότι ο αποπαθητικοποιημένος χαλύβδινος οπλισμός διαβρώνεται όταν το σύστημα του πορώδους του σκυροδέματος είναι μερικώς κορεσμένο, δηλαδή όταν υπάρχει παρουσία τόσο υγρασίας όσο και οξυγόνου. Η θερμοκρασία είναι άλλος ένας παράγοντας που επηρεάζει τον κίνδυνο διάβρωσης. Έτσι, μία κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος εκτεθειμένη σε καιρικές συνθήκες με μεγαλύτερη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος θα παρουσιάσει ταχύτερο ρυθμό διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού της από μία πανομοιότυπη κατασκευή εκτεθειμένη σε καιρικές συνθήκες με μικρότερη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας μπορούν να δημιουργήσουν ρηγματώσεις στο σκυρόδεμα διευκολύνοντας την εισχώρηση επιβλαβών συστατικών στη μάζα του και ευνοώντας τη διάβρωση του χάλυβα. Η έκθεση στις περιβαλλοντικές συνθήκες καθιστά τις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος πιο ευάλωτες στην ενανθράκωση, στη δράση της όξινης βροχής και τις επιπτώσεις των κύκλων ψύξης-απόψυξης.

- **Σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε αντιπαγωτικούς παράγοντες** – Το χλωριούχο νάτριο (NaCl) είναι ένας ευρέως χρησιμοποιούμενος αντιπαγωτικός παράγοντας εφαρμοζόμενος υπό τη μορφή κρυσταλλικού άλατος καθαρότητας τουλάχιστον 95%. Το χλωριούχο ασβέστιο είναι ένας πιο αποτελεσματικός χημικός αντιπαγωτικός παράγοντας, ο οποίος συνήθως χρησιμοποιείται σε θερμοκρασίες μικρότερες από –3.9 °C. Ωστόσο, τα χλωριόντα που προέρχονται από τους παραπάνω αντιπαγωτικούς παράγοντες είναι γνωστό ότι συμβάλλουν στη διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού του σκυροδέματος. Γέφυρες, κατασκευές που χρησιμεύουν ως χώροι στάθμευσης αυτοκινήτων και άλλες κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος που εκτίθενται σε χημικούς αντιπαγωτικούς παράγοντες διατρέχουν σοβαρό κίνδυνο διάβρωσης των οπλισμών τους. Οι ελάχιστες απαιτήσεις των διαφόρων κανονισμών ως προς το πάχος της επικάλυψης του σκυροδέματος και την ποιότητα αυτού για κατασκευές που εκτίθενται στη δράση χημικών αντιπαγωτικών παραγόντων είναι προφανές ότι αποτελούν τα ελάχιστα μέσα προστασίας τους έναντι διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού τους και της επιμήκυνσης της διάρκειας ζωής τους. Ανάλογα με τα προβλεπόμενα μέσα συντήρησης (π.χ. περιοδική διαβροχή των εξωτερικών επιφανειών με μαλακό νερό) και τον βαθμό προσβολής της κατασκευής (που εξαρτάται από το πόσο «επιθετικό» είναι το περιβάλλον της έκθεσης), πρόσθετα μέτρα προστασίας μπορούν να ληφθούν, όπως αυξημένα πάχη επικάλυψης, σκυρόδεμα χαμηλής διαπερατότητας, αναστολείς διάβρωσης (υπό τη μορφή προσμίκτων) ή προστατευτικές επικαλύψεις στους οπλισμούς ή/και στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

- **Σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε θαλάσσιο περιβάλλον** – Επειδή τα χλωριόντα που περιέχονται στο θαλασσινό νερό είναι πολύ πιθανό να εισέλθουν στη μάζα του σκυροδέματος παραθαλάσσιων ή θαλάσσιων κατασκευών, ο βαθμός επικινδυνότητας διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού τέτοιων κατασκευών είναι συγκρίσιμος με εκείνον που διατρέχουν κατασκευές που εκτίθενται σε χημικούς αντιπαγωτικούς παράγοντες. Η πλέον ευάλωτη περιοχή μίας θαλάσσιας κατασκευής είναι εκείνη της ζώνης διαβροχής (splash zone) ή της παλιρροιακής ζώνης (tidal zone), η οποία υπόκειται σε

εναλλασσόμενους κύκλους ύγρανσης και ξήρανσης (κατηγορία έκθεσης XS3, κατά EN206 [2013]). Σε αυτή την περίπτωση, ο Πρότυπος Κανονισμός του FIB (Model Code, 2010) προδιαγράφει ελάχιστα πάχη επικάλυψης σκυροδέματος ίσα με 45 mm και 55 mm για στοιχεία οπλισμένου και προεντεταμμένου σκυροδέματος, αντίστοιχα.

- **Σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε χημικά** – Κατασκευές οπλισμένου/προεντεταμμένου σκυροδέματος που στεγάζουν χώρους βιομηχανικής παραγωγής και μονάδες βιολογικού καθαρισμού[1] εκτίθενται συχνά σε επιβλαβείς χημικούς παράγοντες, όπως διάφορα οξέα, τα οποία δύνανται να οδηγήσουν σε αποσύνθεση του σκυροδέματος, αυξάνοντας τον κίνδυνο της διάβρωσης των χαλύβδινων οπλισμών. Αυτή η κατηγορία έκθεσης απαιτεί πρόσθετα προστατευτικά μέσα, πέραν τον όσων ισχύουν για περιπτώσεις έκθεσης σε υγρά περιβάλλοντα. Για χημικά περιβάλλοντα ικανά να επιφέρουν ιδιαιτέρως υψηλούς βαθμούς προσβολής στις κατασκευές, είναι απαραίτητη η επικάλυψη των εκτιθέμενων επιφανειών τους με αδιαπέρατες προστατευτικές στρώσεις και άλλα εξειδικευμένα μέτρα.

- **Σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε όξινη βροχή** – Η παρατεταμένη απελευθέρωση βιομηχανικών ρυπαντών, όπως το διοξείδιο του θείου και τα οξείδια του αζώτου, έχει επιφέρει αλλαγές στη χημική ισορροπία της ατμόσφαιρας. Το νερό της βροχής αλληλεπιδρά με τα προαναφερθέντα οξείδια και σχηματίζει θειικό οξύ, νιτρικό οξύ, ή και τα δύο και η βροχή μετατρέπεται σε όξινη. Η παρατεταμένη προσβολή των κατασκευών από όξινη βροχή μπορεί να οδηγήσει σε και/ή να επιταχύνει διαδικασίες αποσύνθεσης του σκυροδέματος και διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού τους.

7. Ποιες είναι οι μέθοδοι αποτύπωσης του διαβρωτικού περιβάλλοντος και της βέλτιστης επιλογής επέμβασης μιας κατασκευής;

- Ας σημειωθεί εξ' αρχής ότι η αποτύπωση του διαβρωτικού περιβάλλοντος ενός φορέα είναι ένα μόνο τμήμα μίας διαδικασίας επιλογής της βέλτιστης από οικονομική και τεχνική άποψη λύσης για επέμβαση σε μια προσβεβλημένη από διάβρωση κατασκευή. Μέσω της αποτύπωσης ποσοτικοποιείται μεν το πρόβλημα (άρα και από μια άποψη μπορεί να κοστολογηθεί), αλλά δεν παρέχονται στοιχεία: α) για την πηγή του προβλήματος που οδήγησε στη διάβρωση (άρα δεν είναι εγγυημένη η αποτελεσματικότητα της λύσης που θα επιλεγεί) και β) την εξέλιξη του προβλήματος σε βάθος χρόνου (άρα δεν είναι βέλτιστη και αποτελεσματική, ενδεχομένως, η λύση). Ως εκ τούτου, απαιτείται μια πλέον ολοκληρωμένη διαδικασία σχεδιασμού της επέμβασης, η οποία περιλαμβάνει πριν και μετά από την αποτύπωση συγκεκριμένα βήματα για την επιλογή της τεχνικά εφικτής και οικονομικά αποδεκτής λύσης επέμβασης. Με δεδομένα τα ανωτέρω, η διαδικασία ταυτοποίησης του διαβρωτικού περιβάλλοντος και της υπάρχουσας διάβρωσης μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

7.1 Αρχική επιλογή μιας τεχνικά εφικτής και οικονομικά αποδεκτής λύσης επέμβασης

Μια βήμα προς βήμα διαδικασία για την επιλογή μίας τεχνικά εφικτής και οικονομικά αποδεκτής λύσης για την επέμβαση που θα απαιτηθεί σε μια κατασκευή που βρίσκεται σε ένα διαβρωτικό περιβάλλον είναι όπως παρακάτω[2]:

1. Συλλογή και καταγραφή πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση του δομήματος και το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται.

[1] Λόγω της υπερβολικής χρήσης λιπασμάτων, στην κατηγορία αυτή δέον να περιλαμβάνονται και κατασκευές υποδομών σε αγροτικές περιοχές όπου ο υδροφόρορς ορίζοντας είναι ψηλά.

[2] Η μεθοδολογία έχει εφαρμοσθεί με επιτυχία σε γέφυρες αλλά μπορεί να επεκταθεί σε οιασδήποτε μορφής δόμημα. Αντίστοιχες μεθοδολογίες έχει προτυποποιήσει και ο Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών των ΗΠΑ, ASCE

- Περιλαμβάνει τα εξής βήματα:
  - Συλλογή και έλεγχος των σχεδίων και ξυλοτύπων (και κατά πόσο αυτά έχουν εφαρμοστεί στην πράξη)
  - Συλλογή και ανάλυση παλαιότερων αποτυπώσεων της κατάστασης (εάν υπάρχουν)
  - Συλλογή των περιβαλλοντικών συνθηκών στο έργο (και στο υπέδαφος) (από ιστορικά αρχεία αλλά και μετρήσεις κατά την περίοδο αποτύπωσης)
- Στις πληροφορίες που αποδελτιώνονται πρέπει να περιλαμβάνονται τα εξής:
  - Χωροθέτηση, τύπος, μορφή, ηλικία του δομήματος
  - Ειδικές συνθήκες σχεδιασμού
  - Συνθήκες περιβαλλοντικής έκθεσης (π.χ., εναλλαγή της θερμοκρασίας και των επικρατούντων ανέμων, υγρασία, έκθεση σε θαλάσσιο περιβάλλον, υετός)
  - Λεπτομέρειες οπλισμού
  - Είδος χάλυβα οπλισμού (τένοντες ή συμβατικός, νευροχάλυβας, στρεπτοχάλυβας, λείος χάλυβας)
  - Λεπτομέρειες συλλογής και απορροής των ομβρίων (ή υγρών άλλης προέλευσης)
  - Ιστορικό επεμβάσεων, προσθηκών, αλλαγών χρήσης/ιδιοκτησίας, επισκευών και συντηρήσεων
  - Τυχόν παρουσία συστημάτων αντιδιαβρωτικής προστασίας

2. Η πληροφορία φιλτράρεται μέσα από μία τεχνική μελέτη, η οποία καθορίζει το αντικείμενο των εργασιών αποτύπωσης και καθορισμού του προβλήματος
   - Στη φάση αυτή γίνεται η καταγραφή και η μελέτη των πληροφοριών ώστε να καθορισθεί το πρόγραμμα των διερευνητικών εργασιών που θα ακολουθηθεί στην επόμενη φάση για να αναγνωρισθεί και να ποσοτικοποιηθεί η διάβρωση στο έργο. .

3. Πραγματοποιείται μια λεπτομερής αποτύπωση της κατάστασης του δομήματος (condition survey)
   - Στη φάση αυτή διενεργείται μια λεπτομερής σειρά από διερευνητικές εργασίες στο πεδίο και στο εργαστήριο, που έχουν σαν σκοπό να εκτιμηθεί επακριβώς η τρέχουσα κατάσταση (και τυχόν βλάβες) του δομήματος.

4. Αναλύονται τα δεδομένα της λεπτομερούς αποτύπωσης
   - Στη φάση αυτή δίδεται έμφαση στην ανάλυση των αποτελεσμάτων από τις διερευνητικές εργασίες στο πεδίο και/ή στο εργαστήριο, ώστε να προκύψουν τα αναγκαία δεδομένα και οι παράμετροι εκείνες για τον καθορισμό ενός προσομοιώματος εξέλιξης της δομητικής φθοράς (deterioration) του δομήματος.

5. Εκπονείται το προσομοίωμα της δομητικής φθοράς του δομήματος
   - Πρόκειται για το μαθηματικό προσομοίωμα που περιλαμβάνει τις μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν το βαθμό διάβρωσης των δομικών υλικών σε συνάρτηση με:
     - την απομένουσα ωφέλιμη διάρκεια λειτουργικής ζωής του,
     - τη μελλοντική του κατάσταση διάβρωσης και/ή
     - τη μελλοντική του φθορά
   - Έχουν προταθεί τέτοιου είδους προσομοιώματα τα οποία αποδίδουν το συμβατικό απομένοντα χρόνο ζωής του δομήματος, τα οποία βασίζονται σε διαφορετικό ορισμό του τι θεωρείται λήξη της συμβατικής ζωής του δομήματος (μεταξύ άλλων, Bentz [2003] και Ehlen et al. [2009]).
   - Επί πλέον, το προσομοίωμα φθοράς δίδει και το βέλτιστο χρόνο επέμβασης στο δόμημα για αναστολή της διαδικασίας διάβρωσης και την επισκευή (repair) ή αποκατάσταση (rehabilitation) της βλάβης (damage).

- Μια γενική παρατήρηση είναι ότι η αξιοπιστία αυτών των προσομοιωμάτων βασίζεται στη συνεχή βαθμονόμησή τους, είτε με παρατηρήσεις σε βάθος χρόνου στο πεδίο (ή/και το εργαστήριο) είτε με συγκριτικές αναλύσεις από εκτενή δεδομένα, που περιέχονται σε αντίστοιχες βάσεις δεδομένων τέτοιων παρατηρήσεων.

6. Καθορίζονται οι εφικτές επιλογές αποκατάστασης για το συγκεκριμένο δόμημα
   - Τα αποτελέσματα από την αποτύπωση της κατάστασης, σε συνδυασμό με τα εξαγόμενα από το προσομοίωμα της δομητικής φθοράς του δομήματος και η ποσοτικοποίηση της επιτρεπόμενης φθοράς που μπορεί να είναι αποδεκτή στο δόμημα πριν την επέμβαση, καθορίζουν τον αριθμό των εφικτών εναλλακτικών επιλογών αποκατάστασης προς την επιθυμητή διάρκεια ζωής, για το συγκεκριμένο φορέα.

7. Εκπονείται μια μελέτη Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής-ΑΚΚΖ (Life Cycle Cost Analysis – LCCA)
   - Η ΑΚΚΖ αποτελεί μια ενιαία συγκριτική βάση για τις εναλλακτικές παραπάνω, ώστε να επιλεγεί η πλέον συμφέρουσα οικονομικά και η τεχνικά εφικτότερη.
   - Από την ΑΚΚΖ εξάγεται και το κόστος επέμβασης καθώς και το πρόγραμμα συντήρησης, εφόσον αφορά το έργο και την επιλεγμένη διαδικασία.
   - Απαιτεί για κάθε εναλλακτικό σενάριο επέμβασης, τον καθορισμό
     - του αρχικού κόστους,
     - του επαναλαμβανόμενου κόστους συντήρησης και
     - της συμβατικής διάρκειας ζωής του έργου.

8. Καθορίζεται το πλέον οικονομικό εναλλακτικό σενάριο για την αποκατάσταση του δομήματος

7.2 Ανακεφαλαίωση των βημάτων της μεθοδολογίας για το σκοπό της επιλογής μιας τεχνικά βιώσιμης και οικονομικά εφικτής λύσης

Το πρώτο βήμα στην μεθοδολογία περιλαμβάνει ανασκόπηση των κατασκευαστικών σχεδίων, αναφορές από προηγούμενες έρευνες της κατασκευής και διαθέσιμες πληροφορίες για τις συνθήκες περιβάλλοντος επιτόπου. Οι πληροφορίες θα πρέπει να περιλαμβάνουν τα παρακάτω:

- Τοποθεσία, μέγεθος, τύπος και ηλικία της κατασκευής
- Οποιαδήποτε ασυνήθιστα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά
- Συνθήκες περιβαλλοντολογικής έκθεσης όπως είναι διακυμάνσεις θερμοκρασίας, παραθαλάσσιο περιβάλλον και βροχοπτώσεις
- Λεπτομέρειες όπλισης
- Τύπος οπλισμού όπως είναι ακάλυπτος, εποξεικά επικαλυμμένος, γαλβανισμένος, μη προεντεταμένος χάλυβας ή προεντεταμένος χάλυβας
- Λεπτομέρειες στράγγισης, συντήρηση και ιστορικό επισκευών
- Παρουσία οποιωνδήποτε συστημάτων προστασίας διάβρωσης

Το δεύτερο βήμα συνεπάγεται μηχανική ανάλυση των λαμβανομένων πληροφοριών ώστε να αναπτυχθεί ένας συγκεκριμένος σκοπός εργασιών που ακολουθείται στο τρίτο βήμα της διεργασίας, το οποίο είναι να διεξαχθεί μια συνολική έρευνα της κατάστασης της κατασκευής. Η έρευνα των συνθηκών προϋποθέτει την εκτέλεση κατάλληλων επί τόπου και εργαστηριακών δοκιμών για την ποσοτικοποίηση της επιμόλυνσης της συγκεκριμένης κατασκευής. Το τέταρτο βήμα εστιάζει στην ανάλυση των επί τόπου και εργαστηριακών ελέγχων η οποία διευκολύνει το επόμενο βήμα της διαδικασίας: ανάπτυξη ενός μοντέλου επιμόλυνσης. Τα μοντέλα επιμόλυνσης είναι ένα σετ από μαθηματικές σχέσεις μεταξύ των δεδομένων των συνθηκών διάβρωσης και της απομένουσας ζωής, της μελλοντικής κατάστασης της κατασκευής ή της εκτιμώμενης μελλοντικής βλάβης. Έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα που προβλέπουν την απομένουσα ζωή λειτουργίας χρησιμοποιώντας

διαφορετικούς ορισμούς για το τέλος χρήσης της κατασκευής. Για να είναι λειτουργικά αυτά τα μοντέλα πρέπει να συσχετιστούν με πραγματικές επί τόπου συνθήκες ή με επαρκώς μεγάλη βάση δεδομένων. Ένα μοντέλο επιμόλυνσης επίσης παρέχει πληροφορίες για το βέλτιστο χρόνο επισκευής ή αποκατάστασης της κατασκευής. Λεπτομερείς πληροφορίες για την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής των κατασκευών από σκυρόδεμα μπορούν να βρεθούν στο ACI 365R.

Τα δεδομένα για την έρευνα της κατάστασης, τα αποτελέσματα από το μοντέλο επιμόλυνσης και το μέγεθος της διάβρωσης που μπορεί να υπάρχει σε μια συγκεκριμένη κατασκευή πριν αυτή επισκευαστεί χρησιμοποιούνται στο επόμενο βήμα, εντοπίζοντας επιλογές αποκατάστασης που είναι βιώσιμες για τη συγκεκριμένη κατασκευή. Σε αυτό το βήμα, ένα πλήθος από επιλογές αποκατάστασης ορίζονται βασιζόμενες σε τεχνική βιωσιμότητα και επιθυμητή διάρκεια ζωής της κατασκευής.

Το τελευταίο βήμα στη μεθοδολογία είναι το LCCA, το οποίο συγκρίνει και αξιολογεί το συνολικό κόστος των ανταγωνιστικών επιλογών αποκατάστασης για να ικανοποιήσει ίδιες λειτουργίες που βασίζονται στην αναμενόμενη ζωή της αποκατεστημένης κατασκευής. Η αξία μιας συγκεκριμένης επιλογής αποκατάστασης περιλαμβάνει όχι μόνο το αρχικό της κόστος, αλλά επίσης το κόστος χρήσης αυτής της επιλογής για την επιθυμητή περίοδο. Για την πραγματοποίηση του LCCA, θα πρέπει κάποιος να εκτιμήσει το αρχικό κόστος, το κόστος συντήρησης και τη διάρκεια ζωής για κάθε στρατηγική αποκατάστασης. Τελικά, βασιζόμενοι στα αποτελέσματα του LCCA, μπορεί να επιλεγεί η πιο οικονομική στρατηγική αποκατάστασης.

8. Ποιες μέθοδοι υπάρχουν για αξιολόγηση της διάβρωσης;

Οι μέθοδοι για την αξιολόγηση της διάβρωσης που αναφέρονται παρακάτω αφορούν κυρίως κατασκευές από σκυρόδεμα με μη προεντεταμένους οπλισμούς αν και γίνεται επίσης μια πιο περιορισμένη αναφορά στο προεντεταμένο σκυρόδεμα.

8.1 Οπλισμένο σκυρόδεμα (μη προεντεταμένο)

1) Οπτικός έλεγχος (visual inspection):
Το πρώτο στάδιο οποιαδήποτε διερεύνησης είναι ο (επιτόπιος) οπτικός έλεγχος και η αξιολόγηση της κατασκευής, με σκοπό την εκτίμηση της έκτασης των βλαβών που σχετίζονται με τη διάβρωση αλλά και της γενικής κατάστασης του σκυροδέματος. Κατά τον έλεγχο αυτό, πρέπει να καταγράφονται επί σχεδίων και κατάλληλων σκαριφημάτων, που θα συνοδεύονται από επαρκές φωτογραφικό υλικό, τυχόν ρωγμές, αποφλοιώσεις, σημάδια σκουριάς, και γενικώς οποιεσδήποτε ενδείξεις τοπικής ή εκτεταμένης υποβάθμισης του σκυροδέματος. Επιπλέον, πρέπει να καταγράφονται οποιεσδήποτε προηγούμενες εμφανείς παρεμβάσεις ή επεμβάσεις, αλλά και εξωγενείς παράγοντες που μπορεί να συνέβαλαν ή πρόκειται μελλοντικά να συμβάλλουν στη διάβρωση του οπλισμού, π.χ. ελλιπής ή προβληματική αποχέτευση ομβρίων, λιμνάζοντα νερά, απόσταση από πηγή χλωριόντων (π.χ. θάλασσα, προσανατολισμός κτιρίου, δρόμος με ανάγκη αντιπαγωτικών αλάτων, κ.λπ.). Είναι προφανές ότι ο έλεγχος αυτός προϋποθέτει εμπειρία του παρατηρητή και εις βάθος γνώση των μηχανισμών υποβάθμισης του σκυροδέματος.

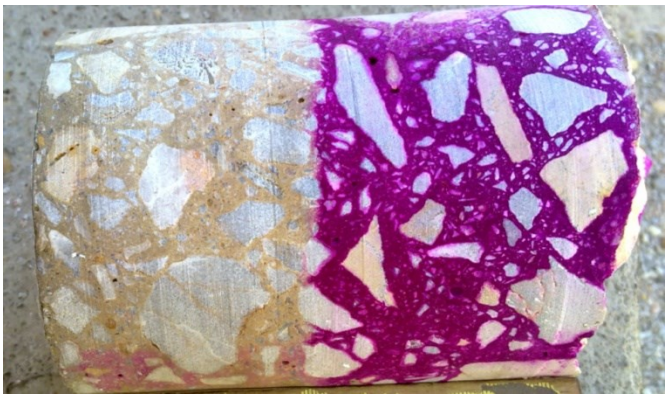
2) Διερεύνηση διαχωρισμού / αποφλοιώσεων (delamination):
Μία από τις σπουδαιότερες μορφές αστοχίας λόγω διάβρωσης του οπλισμού είναι η αποφλοίωση του σκυροδέματος. Ως αποφλοίωση ορίζεται ο διαχωρισμός εξωτερικών στρώσεων σκυροδέματος, συνήθως παράλληλων στον οπλισμό, λόγω των δυνάμεων που δημιουργούνται από τη διόγκωση του διαβρώμενου χάλυβα (υπενθυμίζεται ότι ο όγκος των

προϊόντων διάβρωσης είναι πολλαπλάσιος του αρχικού όγκου, βλ. και Σχήμα 5 της ΤΟ 6) και επιδεινώνεται εν χρόνω λόγω της εξέλιξης της διάβρωσης, κύκλων ψύξης-απόψυξης (υπό κατάλληλες συνθήκες) ή λοιπών παραγόντων. Μέθοδοι για τον εντοπισμό τέτοιων προβληματικών περιοχών βασίζονται σε μηχανικές, ηλεκτρομαγνητικές ή θερμικές μεθόδους.

3) Μετρήσεις πάχους επικάλυψης (cover depth):
Το πάχος επικάλυψης του χάλυβα οπλισμού έχει αδιαμφισβήτητα πολύ μεγάλη επιρροή στο χρόνο έναρξης της διάβρωσης. Μικρότερα πάχη επικάλυψης επιτρέπουν την ευκολότερη διείσδυση των βλαβερών εκείνων ουσιών που μπορούν, σε συνδυασμό με λοιπές κατάλληλες συνθήκες (χλωριόντα, υγρασία, οξυγόνο) στην περιοχή του οπλισμού, να οδηγήσουν σε ταχεία διάβρωση και, κατ' επέκταση, σε υποβάθμιση της κατασκευής, είτε τοπικά είτε ως σύνολο. Για τον λόγο αυτό, ο προσδιορισμός του πάχους επικάλυψης αποτελεί σημαντικό τμήμα των επιτόπου διερευνήσεων.

4) Ανάλυση περιεκτικότητας σε χλωριόντα (chloride-ion concentration):
Η περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε χλωριόντα είναι πολύ σημαντική, διότι, παρουσία επαρκούς υγρασίας και οξυγόνου, μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση του οπλισμού. Ο προσδιορισμός της γίνεται με προσεκτική δειγματοληψία επιτόπου στο έργο και περαιτέρω εργαστηριακή ανάλυση.

5) Προσδιορισμός βάθους ενανθράκωσης (carbonation depth):
Η δοκιμή ενανθράκωσης μπορεί να διεξαχθεί σε μεταγενέστερο στάδιο σε ορθώς διατηρημένους πυρήνες (ώστε να μην επιμολυνθούν από εξωγενείς παράγοντες) ή κατά τη διάρκεια πετρογραφικής ανάλυσης που θα πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο (εφόσον προδιαγράφεται). Το βάθος ενανθράκωσης μετράται επί επιφάνειας σκυροδέματος με την εφαρμογή (ψεκασμό) με διάλυμα φαινολφθαλεΐνης, το οποίο χρωματίζεται βαθύ κόκκινο / πορφυρό/ ροζ όταν το pH είναι μεγαλύτερο από 9, ενώ διαφορετικά παραμένει διαφανές (Φωτ. 4). Κατά συνέπεια, το διάλυμα μπορεί να προσδιορίσει περιοχές μειωμένης αλκαλικότητας.



Φωτ 4. Προσδιορισμός ενανθράκωσης σκυροδέματος σε πυρήνα

6) Δοκιμή ηλεκτρικής συνέχειας (electrical continuity):
Η εν λόγω δοκιμή πραγματοποιείται με σκοπό τον προσδιορισμό της ύπαρξης (ή μη) ηλεκτρικής συνέχειας μεταξύ των διαφόρων εγκιβωτισμένων μεταλλικών στοιχείων. Ο σκοπός της δοκιμής είναι η χρήση των ευρημάτων στην αξιολόγηση διερευνητικών εργασιών διάβρωσης και ειδικότερα του ρυθμού διάβρωσης, μιας και η άμεση επαφή μεταξύ χάλυβα οπλισμού και άλλων μετάλλων μπορεί δυνητικώς να οδηγήσει σε επιτάχυνση του φαινομένου της διάβρωσης, εάν ο χάλυβας είναι περισσότερο ανοδικός εν σχέσει προς το άλλο μεταλλικό στοιχείο, π.χ. αλουμίνιο.

7) Μετρήσεις υγρασίας και ειδικής αντίστασης (humidity, resistivity):
Αν και συνήθως δεν περιλαμβάνονται στον κατάλογο των επιτόπιων ελέγχων, η υγρασία και η ειδική αντίσταση του σκυροδέματος αποτελούν σημαντικούς παράγοντες που σχετίζονται με την πιθανότητα υποβάθμισης του υλικού (και άρα με την εκτίμηση της πιθανότητας αυτής).

8) Χαρτογράφηση δυναμικού διάβρωσης (corrosion potential):
Το δυναμικό αποτελεί μία παράμετρο που μπορεί να προσδιορίσει την κατάσταση της διαδικασίας διάβρωσης, δηλαδή σε ποιο βαθμό έχει αυτή συντελεστεί, όχι όμως και τον ρυθμό της. Επιπλέον, είναι σημαντικό κατά την ερμηνεία των μετρήσεων να λαμβάνονται υπόψη άλλες συνθήκες όπως: η ενανθράκωση του σκυροδέματος, ο βαθμός κορεσμού/ υγρασία του σκυροδέματος, η ηλεκτρική συνέχεια μεταξύ των οπλισμών, η παρουσία ρεύματος, τυχόν επιχρίσματα οπλισμών (συγκολλήσεις, γαλβανισμένοι οπλισμοί), η ύπαρξη άλλων μεταλλικών στοιχείων εγκιβωτισμένων στο σκυρόδεμα, η παρουσία οξυγόνου, η συγκέντρωση χλωριόντων κ.λπ. Η χαρτογράφηση πρέπει να γίνεται μόνο σε υγιείς, μη αποφλοιωμένες περιοχές, επομένως ο έλεγχος για τυχόν αποκολλήσεις (άμεσα ορατές ή μη) πρέπει να προηγείται τυχόν χαρτογραφήσεων. Επίσης, σημαντικό είναι οι χαρτογραφήσεις να γίνονται ανά τακτά διαστήματα, ώστε να γίνεται συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων για τη διαπίστωση της εξέλιξης του φαινομένου.

9) Μετρήσεις ρυθμού διάβρωσης (rate of corrosion):
Ο ρυθμός διάβρωσης εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία, το δυναμικό ισορροπίας, η αντίσταση του σκυροδέματος, η συγκριτική ποσόστωση περιοχών ανόδου και καθόδου και ο ρυθμός διάχυσης οξυγόνου σε σημεία καθόδου. Στη βιβλιογραφία προτείνονται διάφορες ηλεκτροχημικές μέθοδοι, μεταβαλλόμενης ή σταθερής κατάστασης, για τον προσδιορισμό του ρυθμού διάβρωσης. Η γνωστότερη και συνήθως επιλεγόμενη είναι η αντίσταση γραμμικής πόλωσης (linear polarization resistance, LPR), λόγω της αξιοπιστίας και απλότητάς της. Η αναλυτική μεθοδολογία εκτέλεσης της μεθόδου ξεφεύγει από το σκοπό της παρούσας οδηγίας και μπορεί να αναζητηθεί αλλού. Άλλες μέθοδοι είναι η τεχνική εναλλασσόμενης αντίστασης, η κυκλική βολταμετρία μικρού πλάτους, ο προσδιορισμός ηλεκτροχημικού θορύβου, κ.λπ.

10) Απώλεια διατομής λόγω διάβρωσης (section loss):
Η δοκιμή αυτή πραγματοποιείται με σκοπό την άμεση ποσοτικοποίηση του ποσοστού διάβρωσης που έχει επέλθει σε ράβδους οπλισμού, μέσω μετρήσεων της απώλειας διατομής με χρήση κατάλληλου βαθμονομητή. Για την πραγματοποίηση της δοκιμής η ράβδος πρέπει να είναι ήδη αποκαλυμμένη (σε αποφλοιωμένες περιοχές) ή να αποκαλυφθεί με προσοχή. Επίσης, πριν τη μέτρηση, η ράβδος θα πρέπει να καθαριστεί πλήρως από τα προϊόντα της διάβρωσης με εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων. Εφόσον είναι δυνατό και δεν επιφέρει πρόβλημα στο έργο, προτείνεται η λήψη δείγματος του χάλυβα οπλισμού και σχολαστικός έλεγχος σε κατάλληλο εργαστήριο.

8.2 Προεντεταμένο σκυρόδεμα

Κατά κανόνα, οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη Παράγραφο 9.1 για το οπλισμένο (μη προεντεταμένο) σκυρόδεμα μπορούν να εφαρμοστούν και στο προεντεταμένο σκυρόδεμα. Πάντως, ο προσδιορισμός του βαθμού διάβρωσης είναι εν γένει δυσκολότερος στους προεντεταμένους οπλισμούς, για τον λόγο ότι η τοπική διάβρωση μπορεί να συμβεί χωρίς ορατές ενδείξεις (βλάβες) στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Επίσης, εάν οι προεντεταμένοι οπλισμοί είναι εγκιβωτισμένοι σε προστατευτικούς αγωγούς (σωλήνες), το δυναμικό και ο ρυθμός της διάβρωσης δεν μπορούν να προσδιοριστούν και η εκτίμηση της διάβρωσης μπορεί να γίνει μόνο με τοπική αποκάλυψη, η οποία πάντως δεν παρέχει στοιχεία για την κατάσταση του προεντεταμένου τένοντα σε άλλα σημεία. Σημαντική είναι επίσης η μεθοδολογία κατασκευής των προεντεταμένων ράβδων (με ή χωρίς χρήση ενέματος εντός του προστατευτικού αγωγού), καθώς και η προστασία στο σημείο αγκύρωσης έναντι διείσδυσης εξωτερικών βλαπτικών παραγόντων (νερό, χλωριόντα). Η

τοπική αποκάλυψη στο σημείο αγκύρωσης μπορεί να δώσει κάποιες πληροφορίες για την κατάσταση του χάλυβα, αν και ενέχει κάποιο βαθμό επικινδυνότητας και πρέπει να πραγματοποιείται από εξειδικευμένο εκτιμητή. Επιπλέον, η διερεύνηση των χαρακτηριστικών του ενέματος αλλά και του προστατευτικού αγωγού μπορούν να δώσουν κάποια έμμεση εκτίμηση για την κατάσταση γύρω από τους τένοντες. Συνολικά, αν και δεν υπάρχουν προτυποποιημένες μέθοδοι για προεντεταμένα στοιχεία, η ερευνητική κοινότητα αναζητά νέες μεθόδους που θα επιτρέψουν τον προσδιορισμό του βαθμού διάβρωσης και σε αυτά τα στοιχεία με μεγαλύτερη αξιοπιστία.

9. Ποιες μέθοδοι υπάρχουν για αξιολόγηση του σκυροδέματος;

9.1 Για την αξιολόγηση της φθοράς στο σκυρόδεμα, πέραν της οπτικής εξέτασης, η οποία εκτελείται σύμφωνα με όσα περιγράφονται στην παράγραφο 9 της παρούσας Οδηγίας, προτείνονται επιπλέον οι εξής δοκιμές από την οδηγία ACI 222R-01 §4.4:

1) Αποτίμηση της θλιπτικής αντοχής:
Ο έλεγχος της θλιπτικής αντοχής πυρήνα αποσκοπεί τόσο στον έλεγχο της αντοχής σε σχέση με τη αντοχή σχεδιασμού της σύνθεσης που έχει επιλεγεί όσο και στον εντοπισμό επιβαρυντικών παραγόντων όπως η αλκαλο-πυρητική αντίδραση ή βλάβη από κύκλους ψύξης - απόψυξης, οι οποίες υποδηλώνονται από τις στατιστικές αποκλίσεις.

2) Δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων (ηλεκτρικής αντίστασης της επιφάνειας του σκυροδέματος – Rapid Chloride Permeability Test)
Η διαπερατότητα του σκυροδέματος από χλωριόντα εκτιμάται καλύτερα μέσω εργαστηριακής μέτρησης της περιεκτικότητας χλωριόντων μέσα στη μάζα του σκυροδέματος. Με την ταχεία δοκιμή διαπερατότητας χλωριόντων, μετράται το ηλεκτρικό ρεύμα (σε Cb) που περνά από δοκίμιο σκυροδέματος πάχους 50 mm και διαμέτρου 100 mm κατά τη διάρκεια 6 ωρών υπό διαφορά δυναμικού 60 volts. Η αγωγιμότητα του σκυροδέματος και η διαπερατότητα χλωριόντων σχετίζονται άμεσα με το πορώδες, και ως εκ τούτου, το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο που διαπερνά το σκυρόδεμα δίνει ένδειξη της διείσδυσης χλωριόντων. Υψηλό φορτίο (> 4000 coulombs) υποδεικνύει υψηλή διαπερατότητα χλωριόντων. Αντίθετα, χαμηλή αγωγιμότητα (< 1000 coulombs) υποδεικνύει περιορισμένη διαπερατότητα χλωριόντων. Η εν λόγω δοκιμή περιγράφεται αναλυτικά στις οδηγίες AASHTO T-277 και ASTM C 1202. Η δοκιμή ελέγχεται ως προς την ακρίβειά της, καθώς μετρά τη συνολική ποσότητα όλων των διερχόμενων ιόντων (πέραν από τα Cl^- αποκλειστικά).

3) Πετρογραφική ανάλυση και άλλοι εργαστηριακοί έλεγχοι υλικών
Η μεθοδολογία που διέπει τις πετρογραφικές αναλύσεις περιγράφεται στην οδηγία ASTM C 856 αλλά και η Οδηγία SR2 (Applied Petrography Group, 2010). Στην ουσία, πρόκειται για έλεγχο δοκιμίου με τη χρήση πολωτικού μικροσκοπίου (ανακλώμενου και διερχόμενου φωτισμού). Το δοκίμιο αφαιρείται από πυρήνα και στιλβώνεται καταλλήλως. Η πετρογραφική ανάλυση, συνήθως, συμπληρώνεται με περιθλασιμετρία ακτίνων Χ (XRD: X-ray Diffraction) καθώς και ανάλυση με ηλεκτρονικά μικροσκόπια σάρωσης (SEM: Scanning Electron Microscopy) και απαιτεί εξειδικευμένους έμπειρους αξιολογητές.
Κάποια από τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν μέσω πετρογραφικών αναλύσεων περιλαμβάνουν:

- Την κατάσταση του σκυροδέματος (π.χ. μικρορηγμάτωση)
- Τα αίτια επιδείνωσης ποιότητας
- Τον εντοπισμό βλαβών από εισβολή χλωριόντων, ενανθράκωση, αλκαλοπυριτική αντίδραση ή βλάβη από κύκλους ψύξης - απόψυξης
- Πιθανή επιτελεστικότητα σε βάθος χρόνου
- Το ποσοστό επίτευξης των σχεδιαστικών παραμέτρων
- Το ποσοστό ενυδάτωσης του τσιμεντοπολτού

- Την εκτίμηση του λόγου νερό προς τσιμέντο και της πυκνότητας
- Την έκταση της ενανθράκωσης στον τσιμεντοπολτό
- Την ανάλυση της ορυκτολογικής σύστασης

Η οδηγία ACI 222R-01 περιλαμβάνει ένα πλήρη κατάλογο των εξαγομένων συμπερασμάτων από τις πετρογραφικές αναλύσεις.

9.2 Στο σημείο αυτό σκόπιμο είναι να παρατεθούν στοιχεία και από τις ευρωπαϊκές οδηγίες οι οποίες είναι πιο αναλυτικές [17.16], [17.17], καθώς και από συναφή βιβλιογραφία (Πίνακας 1).

Πίνακας 1

Ζητούμενη πληροφορία	**Μέθοδος / δοκιμή**	**Ευρωπαϊκές Οδηγίες ή άλλη βιβλιογραφία**
Αντοχή	Α) Πυρηνοληψία Β) Κρουσιμέτρηση Γ) Internal fracture test Δ) Break off test Ε) Winsdor probe test	Α) BS 6089: 2010: Guide to assessment of concrete strength in existing structures. London: BSI, 2010 EN 12390-6: 2009: Testing hardened concrete – Part 6: Tensile splitting strength of test specimens.: CEN, 2009 EN 12390-7: 2009: Testing hardened concrete – Part 7: Density of hardened concrete. CEN, 2000 EN 12504-1: 2009: Testing concrete in structures – Part 1: Cored specimens – Taking, examining and testing in compression. CEN, 2009 Β) EN 12504-2: 2012: Testing concrete in structures – Part 2: Non-destructive testing – Determination of rebound number. CEN 2012 Γ) BS 1881-207: 1992: Testing concrete – Part 207: Recommendations for the assessment of concrete strength near-to-surface tests. London: BSI, 1992 EN 12504-3: 2005: Testing concrete in structures – Part 3: Determination of pull-out force. CEN, 2005 Δ) BS 1881-207: 1992: Testing concrete – Part 207: Recommendations for the assessment of concrete strength near-to-surface tests. London: BSI, 1992 Ε) Bungey, J.H. and Millard, S.G. Testing of concrete in structures. 3rd ed. London: Blackie, 1996 {Since superseded by Bungey, J.H., Millard, S.G. and Grantham, M.G. Testing of concrete in structures. 4th ed. Abingdon: Taylor & Francis, 2006}

Ποιότητα σκυροδέματος	Μέθοδος τασικών κυμάτων - υπέρηχοι	EN 12504-4:2004: Testing concrete in structures – Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity. CEN, 2004
Βάθος ενανθράκωσης	Α) Δοκιμή με φαινολοφθαλεΐνη Β) Πετρογραφικές αναλύσεις	Α) EN 14630: 2006: Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method. CEN, 2006 Β) Bungey, J.H. and Millard, S.G. Testing of concrete in structures. 3rd ed. London: Blackie, 1996 {Since superseded by Bungey, J.H., Millard, S.G. and Grantham, M.G. Testing of concrete in structures. 4th ed. Abingdon: Taylor & Francis, 2006}Concrete Society. Analysis of hardened concrete. Concrete Society Technical Report 32.2nd Edition. London: Concrete Society, 2014 St John, D.A., Poole A.W. and Sims, I. Concrete petrography: a handbook of investigative techniques. London: Arnold, 1998 APG SR2, July 2010. Acode of practice for the petrographic examination of concrete. Compiled by MA Eden. Applied Petrography Group. SR2.
Διαπερατότητα	Α) Initial Surface Absorption test (Isat) Β) Δοκιμή διαπεραρότητας ύδατος & αερίων (υπό πίεση) Γ) Μέτρηση υδαταπορροφητικότητας	Α) BS 1881-208: 1996: Testing concrete – Part 208: Recommendations for the determination of the initial surface absorption of concrete. London: BSI, 1996 Β) Βιβλιογραφία του κυρίως κειμένου της παρούσας οδηγίας [17.5]. Επί τόπου δοκιμές Figg και 'CLAM' για διαπερατότητα ύδατος και αέρα Kropp, J. and Hilsdorf, H.K. Performance criteria for concrete durability: state of the art report. RILEM Report 12. London: Spon, 1995 Γ) BS 1881-122: 2011: Testing concrete – Part 122: Method for determination of water absorption. London: BSI, 2011 Concrete Bridge Development Group. Guide to testing and monitoring the durability of concrete structures. Technical Guide 2. Crowthorne: Concrete Society, 2002

Παρουσία χλωριόντων	Α) Χημική ανάλυση δειγμάτων – προτεινόμενη Β) Δοκιμές επί τόπου Hatch και Quantab	Α) EN 13396: 2004: Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Measurement of chloride ion ingress. CEN, 2004 BS 1881-124: 2014: Testing concrete. Methods for analysis of hardened concrete. London: BSI, 2014 Concrete Society. Analysis of hardened concrete. Concrete Society Technical Report 32. 2nd Edition. London: Concrete Society, 2014 Β) Bungey, J.H. and Millard, S.G. Testing of concrete in structures. 3rd ed. London: Blackie, 1996 {Since superseded by Bungey, J.H., Millard, S.G. and Grantham, M.G. Testing of concrete in structures. 4th ed. Abingdon: Taylor & Francis, 2006}
Περιεχόμενη υγρασία	Α) εργαστηριακός προσδιορισμός Β) ηλεκτρική μέτρηση	Α) Προσδιορισμός μέσω μεταβολής βάρους μετά από ξήρανση [17.17] Β) Μέθοδος Wenner ή ASTM C 876

Πίνακας 1: Ευρωπαϊκές Οδηγίες και άλλη βιβλιογραφία για την αξιολόγηση του σκυροδέματος.

10. Πώς σχεδιάζουμε μια ανθεκτική σε διάβρωση κατασκευή;

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες παραγράφους, ο χάλυβας οπλισμού κινδυνεύει από οξείδωση όταν χαθεί η «παθητική προστασία» που προκαλεί σε αυτόν το περιβάλλον σκυρόδεμα. Ο κίνδυνος οφείλεται είτε σε χλωριόντα που συγκεντρώνονται στη διεπιφάνεια χάλυβα-σκυροδέματος είτε σε μείωση της αλκαλικότητας του περιβάλλοντος σκυροδέματος λόγω ενανθράκωσης.

Ζητούμενο κατά τον σχεδιασμό μίας νέας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι να αποφευχθούν φαινόμενα οξείδωσης των ράβδων οπλισμού.

Ο σχεδιασμός μίας ανθεκτικής σε διάβρωση κατασκευής, στοχεύει δηλαδή στην αύξηση της διάρκειας του χρόνου ζωής της.

10.1 Απαιτήσεις σκυροδέματος και λεπτομερειών όπλισης

Προκειμένου να επιτευχθεί ένας σωστός σχεδιασμός, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη όλες οι εκείνες οι παράμετροι που δεν ενισχύουν και δεν υποβοηθούν τους μηχανισμούς προσβολής. Οι παράμετροι αυτές είναι η χρήση σκυροδέματος με κατάλληλες ιδιότητες και η εξασφάλιση επαρκούς επικάλυψης του οπλισμού όπως περιγράφονται στη συνέχεια.

- Βασική απαίτηση για την παραγωγή ανθεκτικού σκυροδέματος είναι η χαμηλή διαπερατότητά του, η οποία επιτυγχάνεται τόσο με την απαραίτητη περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο, όσο κυρίως όμως με το χαμηλό λόγο νερό/τσιμέντο.

  Προφανώς, έχει ιδιαίτερη σημασία να τηρούνται οι κανόνες για τη σωστή μεταφορά, διάστρωση και συντήρηση του σκυροδέματος.

- Σημαντικός είναι επίσης, ο περιορισμός της περιεκτικότητας του σκυροδέματος σε χλωριόντα. Η περιεκτικότητα αυτή θα πρέπει να βρίσκεται κάτω από κάποια προκαθορισμένα όρια τα οποία καθορίζονται στο EN206/2013 (Πίνακας 15). Εναλλακτικά, η οδηγία ACI 222R-01 καθορίζει δυσμενέστερα όρια, τα οποία φαίνονται στο Πίνακα 1.

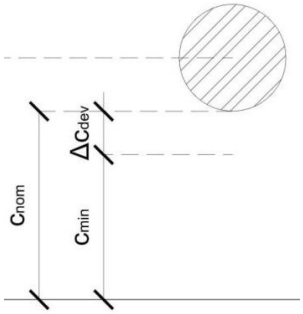
Πίνακας 2

Κατηγορία	Όριο περιεκτικότητας χλωριόντων για νέες κατασκευές (% κ.β. τσιμέντου)		
	Μέθοδος δοκιμής		
	Διαλυτά σε οξέα	Υδατοδιαλυτά	
	ASTM C 1152	ASTM C 1218	Soxhlet*
Προεντεταμένο σκυρόδεμα	0.08	0.06	0.06
Οπλισμένο σκυρόδεμα σε υγρό περιβάλλον	0.10	0.08	0.08
Οπλισμένο σκυρόδεμα σε ξηρό περιβάλλον	0.2	0.15	0.15

(*). Η μέθοδος Soxhlet περιγράφεται στο ACI 222.1

Πίν. 2 Όρια περιεκτικότητας χλωριόντων για νέες κατασκευές (πηγή: ACI 222R-01)

- Όλοι οι σύγχρονοι κανονισμοί ανάλογα με τις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες μιας κατασκευής, καθορίζουν και την ελάχιστη επικάλυψη του οπλισμού του σκυροδέματος.
- Το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN206 (2013) και ο Ευρωκώδικας 2 (EN1992-1, 2004) κάνουν εκτεταμένη αναφορά στις συνθήκες έκθεσης του σκυροδέματος μ;ιας κατασκευής και δίνουν σχετικούς πίνακες από όπου καθορίζονται η ελάχιστη κατηγορία αντοχής σκυροδέματος και η ελάχιστη επικάλυψη των ράβδων οπλισμού (Σχήμα 3).



Σχήμα 3. Τιμές καθορισμού της ονομαστικής επικάλυψης του οπλισμού

- Στο Σχήμα 3 οι τιμές c_{nom} και c_{min} αναφέρονται στην επικάλυψη του χάλυβα οπλισμού. Η τιμή c_{nom} καλείται ονομαστική τιμή επικάλυψης και είναι αυτή η οποία αναγράφεται στις παραδοχές της μελέτης, ενώ η τιμή c_{min} εκφράζει την ελάχιστη τιμή της επικάλυψης, η οποία πρέπει να εξασφαλιστεί για δεδομένες απαιτήσεις και αφορά στις απαιτήσεις ανθεκτικότητας.

Η τιμή c_{nom} είναι πάντα μεγαλύτερη από την c_{min}, με σκοπό οι τυχόν κατασκευαστικές αποκλίσεις (ΔC_{dev}) να μην προκαλέσουν μείωση της επικάλυψης του οπλισμού κάτω από την τιμή c_{min}. Οι κατασκευαστικές αποκλίσεις καθορίζονται σε συνεργασία με τον εργολάβο, ο οποίος οφείλει να δηλώσει μια εγγυημένη μέγιστη τιμή

Ανάλογη μεθοδολογία υπολογισμού της ελάχιστης και της ονομαστικής επικάλυψης σκυροδέματος δίδονται και στον κανονισμό σκυροδέματος ACI318.

- Να σημειωθεί ότι μία κατασκευή μπορεί να έχει τμήματα με διαφορετικές τιμές επικαλύψεων ανάλογα με τις συνθήκες έκθεσης.

10.2 Χρήση πρόσθετων τεχνολογιών

Εκτός των παραπάνω παραγόντων, έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες οι οποίες μπορούν να υιοθετηθούν στα πλαίσια της μελέτης μιας νέας κατασκευής. Οι μέθοδοι αυτές περιγράφονται στην συνέχεια.

- **Χρήση ειδικής κατηγορίας ράβδων οπλισμού**

Οι ειδικές κατηγορίες ράβδων οπλισμού αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η χρήση τους μπορεί να γίνεται αφού πρώτα ληφθούν υπόψη όλες οι απαιτήσεις της κατασκευής.

Κρίσιμη παράμετρος για την χρήση ειδικών χαλύβων είναι η συμπεριφορά τους (κυρίως σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση και το λόγο αντοχής σε διάρρηξη προς αντοχή σε διαρροή) η οποία καθορίζει και την αντισεισμική συμπεριφορά της κατασκευής.

Ειδικές κατηγορίες χαλύβων μπορούν πιο ελεύθερα να χρησιμοποιηθούν σε στοιχεία τα οποία δεν έχουν αντισεισμικές απαιτήσεις αλλά ταυτόχρονα είναι ευάλωτα σε προσβολή που θα επιφέρει διάβρωση (π.χ. υπόγεια κ.λπ.).

Σε κάθε περίπτωση όταν χρησιμοποιούνται χάλυβες ειδικής κατηγορίας θα πρέπει να συνυπολογίζονται και όλες αυτές οι παράμετροι που αφορούν την μεταφορά, την αποθήκευση και την τοποθέτηση των χαλύβων αυτών.

- **Σωστή διαχείριση υδάτων (αποστράγγιση)**

Ο σωστός σχεδιασμός περιλαμβάνει απαραίτητα την σωστή διαχείριση των υδάτων που ενδεχομένως, μπορούν να συσσωρευτούν στην κατασκευή. Είναι απαραίτητη η σύνταξη των κατάλληλων λεπτομερειών των συστημάτων αποστράγγισης και απομάκρυνσης των υδάτων καθώς επίσης και άλλων ουσιών όπως αντιπαγωτικά άλατα (κυρίως για γέφυρες και χώρους στάθμευσης).

Οι κατασκευές θα πρέπει, επιπλέον, να έχουν τις απαραίτητες ρύσεις λαμβάνοντας υπόψη τα βέλη και τις παραμορφώσεις που ενδεχομένως, να αναπτυχθούν στη διάρκεια ζωής της κατασκευής.

- **Σωστή στεγάνωση αρμών**

Οι αρμοί μιας κατασκευής αποτελούν πάντα σημεία συσσώρευσης και διόδου υδάτων και άλλων ουσιών οι οποίες προσβάλλουν τον οπλισμό του σκυροδέματος. Η σωστή στεγάνωση των αρμών αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση ενός σωστού σχεδιασμού.

- **Ενσωματούμενα στοιχεία**

Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην προστασία των στοιχείων εκείνων, τα οποία ενσωματώνονται στο σκυρόδεμα και είναι ευάλωτα στους επιθετικούς παράγοντες από το περιβάλλον της κατασκευής. Τέτοια στοιχεία για παράδειγμα, είναι τα μεταλλικά στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται στα προκατασκευασμένα δομικά μέλη και βρίσκονται εντός της επικάλυψης του οπλισμού, αναμονές ή αρμοκλείδες οπλισμού μελλοντικής επέκτασης, ειδικά ενσωματούμενα τεμάχια που εξυπηρετούν ηλεκτρομηχανολογικές οδεύσεις / διελεύσεις, οι εγκάρσιοι σύνδεσμοι των ξυλοτύπων («δέστρες»), εγκιβωτισμένοι σωλήνες ή χιτώνια,

αντικεραυνική προστασία κλπ.. Τα στοιχεία αυτά θα πρέπει να είναι γαλβανισμένα ή ανοξείδωτα, αλλιώς πρέπει να είναι πλήρως προστατευμένα από περιβαλλοντική έκθεση σε βάθος χρόνου.

- **Χρήση μονωτικών μεμβρανών**

Χρησιμοποιούνται κυρίως με σκοπό να περιορίσουν την διείσδυση χλωριόντων (ή/και θειικών) στο σκυρόδεμα. Το ιδανικό σύστημα στεγάνωσης με χρήση μεμβρανών θα πρέπει να είναι εύκολο στην τοποθέτηση, να έχει καλή εφαρμογή στο υπόστρωμα και να είναι ανθεκτική στην ακτινοβολία (όπου αφορά). Τα υλικά τα οποία θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να είναι συμβατά μεταξύ τους και η μεμβράνη να είναι αδιαπέρατη από χλωριόντα (ή άλλες χημικές ουσίες που είναι παρούσες στο περιβάλλον της κατασκευής) και υγρασία. Ο σχεδιασμός και η επιλογή κατάλληλων μεμβρανών αποτελεί ξεχωριστή τεχνολογία που θα πρέπει να διεξάγεται σε συνεργασία με εξειδικευμένους μηχανικούς.

- **Χρήση πολυμερών**

Η αντίσταση του σκυροδέματος έναντι της δράσης των χλωριόντων επιτυγχάνεται επίσης, και με χρήση πολυμερών τα οποία είτε εμποτίζονται στο σκυρόδεμα είτε διαστρώνονται καλύπτοντας τις επιφάνειές του.

11. Πώς επηρεάζει η διάβρωση τους οπλισμούς ανά τύπο κατασκευής;

- Ο τύπος κατασκευής και συνάμα το περιβάλλον στο οποίο αυτή θα εκτεθεί, καθώς και η προσδοκώμενη χρήση της, αποτελούν παράγοντες σχεδιασμού βάσει των οποίων καθορίζονται κύριες παράμετροι σχεδιασμού (design parameters) όπως η ποιότητα (κατηγορία) σκυροδέματος που θα χρησιμοποιηθεί και το πάχος επικάλυψης που θα προδιαγραφεί.

- Οι δύο αυτές θεμελιώδεις παράμετροι σχεδιασμού μαζί με άλλες επιμέρους παραμέτρους, διαμορφώνονται ως εξής, ανάλογα με τον δομητικό τύπο κατασκευής σύμφωνα με την οδηγία ACI 222.3R-11:

  1) Γέφυρες: Το βασικό ζητούμενο όταν σχεδιάζουμε το κατάστρωμα, την ανωδομή αλλά και τα θεμέλια έναντι διάβρωσης είναι η έκθεση σε χλωριόντα και ο απαιτούμενος βαθμός προστασίας. Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό ότι ο σχεδιασμός μίας γέφυρας σε μία ημι-ξηρή περιοχή στην ενδοχώρα θα διαφέρει σε σχέση με μία γέφυρα που θα σχεδιαστεί σε παραθαλάσσια περιοχή αν και τα θαλάσσια χλωριόντα μπορούν να αερομεταφερθούν σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις (ειδικά σε περιοχές με υψηλές ταχύτητες ανέμων).
  Παράλληλα, πρέπει να ληφθεί υπόψη και η πιθανότητα έκθεσης σε χημικά αποπάγωσης (deicing chemicals), ώστε η άνω επιφάνεια του καταστρώματος να σχεδιαστεί με μεγαλύτερο πάχος επικάλυψης από την κάτω επιφάνεια. Το αντίθετο επιβάλλεται για το σχεδιασμό γέφυρας πάνω από θαλασσινό νερό. Εδώ, η κάτω επιφάνεια πρέπει να διαθέτει μεγαλύτερο πάχος επικάλυψης.
  Αξίζει να σημειωθεί ότι και η ανωδομή και τα θεμέλια χρήζουν ιδιαίτερης προστασίας έναντι διάβρωσης, αφού η διείσδυση νερού πλούσιου σε ιόντα χλωρίου μέσα από ρωγμές και αρμούς, οδηγεί σε διάβρωση του οπλισμού. Ακόμα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η πιθανή σώρευση πάγου ποτισμένου με αντιπαγωτικά στη βάση των γεφυρών ή οι κύκλοι ύγρανσης και ξήρανσης που υφίστανται κατασκευές σε παλιρροιακές ζώνες.
  Σε ότι αφορά στις γέφυρες, είναι τέλος σημαντικό να εντοπίζονται σημεία - ανοίγματα από τα οποία μπορούν να διεισδύσουν χλωριόντα, όπως αρμοί ή αποχετεύσεις (drains), ώστε να λαμβάνονται ειδικά μέτρα προστασίας σε τοπικό επίπεδο (π.χ. χρήση ανοξείδωτου οπλισμού, όπως αναφέρθηκε παραπάνω).

2) Χώροι στάθμευσης οχημάτων: Σε αρκετές περιπτώσεις η πιθανότητα διάβρωσης από διείσδυση χλωριόντων είναι υψηλότερη από ότι στις γέφυρες. Αυτό, γιατί τα δάπεδα στις εν λόγω κατασκευές δέχονται απορροές χλωριόντων από τα σταθμευμένα αυτοκίνητα, χωρίς χρονικό περιορισμό. Έτσι, αν δεν έχει σχεδιαστεί σύστημα έκπλυσης και απορροής αυτών των υδάτων, ο κίνδυνος διάβρωσης είναι υψηλός, δεδομένου ότι μόνο υπαίθριοι χώροι στάθμευσης ή χώροι στάθμευσης σε ταράτσες έχουν πιθανότητα καθαρισμού από τα όμβρια.
Όπως και στην περίπτωση των γεφυρών, πρέπει να ληφθεί υπόψη το περιβάλλον στο οποίο θα κατασκευαστεί ο χώρος στάθμευσης (ηπειρωτικό ή παραθαλάσσιο), αν χρησιμοποιούνται αντιπαγωτικά χημικά, αν διαβρέχεται από θαλασσινό νερό ή αν το επίπεδο υγρασίας είναι υψηλό.

3) Βιομηχανικά δάπεδα: Το είδος της βιομηχανικής εγκατάστασης επηρεάζει το σχεδιασμό έναντι διάβρωσης. Κυρίως πρέπει να ελεγχθεί αν χρησιμοποιούνται οξέα ή άλλα διαβρωτικά χημικά τα οποία μπορεί να έρθουν σε απευθείας επαφή με το σκυρόδεμα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, προτείνεται η χρήση μεμβρανών και ειδικών επιστρώσεων.

4) Προσόψεις από εμφανές σκυρόδεμα: Ειδικά στην περίπτωση των προσόψεων, το περιβάλλον έκθεσης αποτελεί πολύ σοβαρό παράγοντα σχεδιασμού (π.χ. η έκθεση σε περιοχές υψηλής βιομηχανικής δραστηριότητας ή η δόμηση σε πόλεις που παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα και ρύπων, προκαλώντας επιταχυνόμενη ενανθράκωση).
Επίσης, χρήζουν ιδιαίτερου σχεδιασμού προσόψεις που εκτίθενται σε χλωριόντα από συσσώρευση όγκων χιονιού στις παρειές, το οποίο κατά την τήξη μπορεί να προσβάλει τον οπλισμό ή τα ενσωματούμενα μεταλλικά τεμάχια.
Τέλος, προσοχή πρέπει να δοθεί σε προσόψεις από προεντεταμένο σκυρόδεμα.

5) Λιμενικά έργα και δομήματα κοντά στη θάλασσα: Κατασκευές όπως προβλήτες, αποβάθρες ή δεξαμενές αποθήκευσης που βρίσκονται κοντά σε θαλάσσιο περιβάλλον είναι γενικά ευάλωτες σε διάβρωση από χλωριόντα. Επίσης, κατασκευές σε παλιρροιακές ζώνες κινδυνεύουν και από διάβρωση όχι μόνο από χλωριόντα, αλλά και από γενική διάβρωση λόγω κύκλων ύγρανσης και ξήρανσης. Τα (μονίμως) βυθισμένα τμήματα στα οποία η συγκέντρωση του οξυγόνου είναι χαμηλή, παρουσιάζουν και χαμηλότερο ρυθμό διάβρωσης από χλωριόντα.

6) Πλάκες επί εδάφους: Έδαφος το οποίο είναι ρυπασμένο με χλωριόντα μπορεί να προκαλέσει διάβρωση του οπλισμού. Πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό του σκυροδέματος, κυρίως μέσω του λόγου νερού προς τσιμεντοειδή υλικά και ελέγχου της επιτρεπτής διαπερατότητας.

7) Λοιπά δομικά συστήματα: το σκυρόδεμα σε εγκαταστάσεις διαχείρισης αποβλήτων, δεξαμενές, αγροτικά δίκτυα ή υπονόμους μπορεί να εκτεθεί σε χημικά οξέα ή θειικά άλατα και να αποσαθρωθεί, εκθέτοντας τον οπλισμό. Ειδικά τα δομήματα από προεντεταμένο σκυρόδεμα απαιτούν επικάλυψη π.χ. από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ενισχυμένη σύνθεση (shotcrete cover). Απορροή ομβρίων ή διαρροή μέσα από δεξαμενές, σε συνδυασμό με παρουσία οξυγόνου μπορεί να προκαλέσει ηλεκτροχημική διάβρωση των τενόντων προέντασης.

12. Ποιες κατασκευαστικές πρακτικές ακολουθούμε για μια ανθεκτική κατασκευή;

12.1 Ανάμιξη και μεταφορά του σκυροδέματος

- Ως προς την ανάμιξη και τη μεταφορά του σκυροδέματος το ACI 22.3R-11 παραπέμπει σε άλλες επιμέρους προδιαγραφές που είναι οι: ACI 301 (προδιαγραφή για σκυρόδεμα κατασκευών), ACI 304R (ανάμιξη, μεταφορά και διάστρωση του σκυροδέματος), ASTM C94 (έτοιμο σκυρόδεμα) και ASTM C494 (πρόσθετα σκυροδέματος).

- Ιδιαιτέρως, επισημαίνει τις δυσκολίες που υπάρχουν για την ανάμιξη του σκυροδέματος με χαμηλό λόγο N/T ≤ 0,30, όπου υποδεικνύει τον χωρισμό της φόρτωσης του αναμικτήρα σε δύο μέρη και την προανάμιξη των χονδρόκοκκων αδρανών με το νερό, τη μικρή ποσότητα των υπερρευστοποιητών και την πυριτική παιπάλη (silica fume) πριν φορτωθεί το τσιμέντο. Ακολούθως φορτώνεται το τσιμέντο, και αυτό αναμιγνύεται με τα υλικά για ένα λεπτό, πριν φορτωθεί η άμμος. Τότε, στο τέλος, φορτώνεται η άμμος και η υπόλοιπη ποσότητα του προσθέτου. Μια περαιτέρω καθυστέρηση προσθήκης των προσθέτων: 30sec, βελτιώνει την αποτελεσματικότητα. Σε λόγους N/T=0,40-0,45, τα προβλήματα αυτά, απότομης απώλειας κάθισης, κ.λπ. δεν συναντώνται και οι συνήθεις πρακτικές φόρτωσης υλικών είναι επαρκείς.

- Το ASTM C 94, επιτρέπει την προσθήκη νερού στο έργο, μία μόνο φορά (Σημ. Στον ΚΤΣ 2016, δεν επιτρέπεται σε καμιά περίπτωση) υπό τον όρο να μην γίνει υπέρβαση του λόγου N/T, που έχει ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό δηλαδή στη μελέτη σύνθεσης του σκυροδέματος, και μόνο με σκοπό να επαναφέρει την επιθυμητή εργασιμότητα. Τα συνεργεία διάστρωσης δεν πρέπει να προσθέτουν στο έργο νερό ή χημικά πρόσθετα, χωρίς την έγκριση του Μηχανικού, που είναι υπεύθυνος για το σχεδιασμό της σύνθεσης του σκυροδέματος και σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να έχει προηγηθεί ο έλεγχος της αποτελεσματικότητάς τους σε εργαστηριακό επίπεδο.

- Φορτία σκυροδέματος που λόγω καθυστερήσεων υπερβαίνουν τα 90 λεπτά από την παραγωγή του, θα αναγκάσουν τον Επιβλέποντα στο έργο να απορρίψει το σκυρόδεμα (Σημ. στον ΚΤΣ 2016 ισχύει το ίδιο αν και επιτρέπεται, αν έχει προστεθεί επιβραδυντικό, χρόνος: 120 λεπτά).

12.2 Διάστρωση σκυροδέματος, σιδηροπλισμός

12.2.1 Ξυλότυποι

Οι ξυλότυποι πρέπει να έχουν σχεδιαστεί με επαρκή αντοχή και ακαμψία ώστε να φέρουν και τα φορτία και τις πλευρικές πιέσεις που προκαλούνται από το σκυρόδεμα, τον εξοπλισμό και τους τεχνίτες. Επίσης, πρέπει να είναι επαρκώς στηριγμένοι ώστε να διατηρούν τις προδιαγραφόμενες ανοχές και επικαλύψεις οπλισμών και να μην επιτρέπουν παραμορφώσεις πάνω από τις επιτρεπτές, που θα μπορούσαν να προκαλέσουν ρηγμάτωση του σκυροδέματος.

Κακή ποιότητα υλικού κατασκευής ή/και ανωμαλίες στην επιφάνεια του ξυλοτύπου μπορεί να προκαλέσουν δυσκολία στη σωστή ροή και συμπύκνωση του σκυροδέματος και να έχουν ως αποτέλεσμα κενά και «σφηκοφωλιές» (honey – combing). Αυτά μπορεί, στη συνέχεια, να αποτελέσουν «πύλες εισόδου» για νερό και χλωριόντα.

Πριν τη χρήση του, ο ξυλότυπος πρέπει να καθαρίζεται προσεκτικά από σκουπίδια, πριονίδια, σύρματα πρόσδεσης, νερό, χιόνι, πάγο, διότι αυτά τα υλικά μπορεί να δημιουργήσουν κενά στην επιφάνεια.

12.2.2 Σιδηροπλισμός

Οι επικαλύψεις οπλισμών που προβλέπονται στον ΕΚΩΣ, στους Ευρωκώδικες και στο ACI 318 και ACI 201.2R είναι «ελάχιστες επικαλύψεις». Οι «μέγιστες επικαλύψεις» μπορεί να μπουν στο σχεδιασμό, όταν πρόκειται για σκυρόδεμα σε πιθανό διαβρωτικό περιβάλλον (π.χ. παραθαλάσσιο, κ.λπ.). Για να επιτευχθούν στην πράξη οι επικαλύψεις αυτές είναι επιβεβλημένο οι οπλισμοί να εδράζονται στερεά σε αποστατήρες κατάλληλων διαστάσεων, από μη διαβρούμενα υλικά μηδαμινής υδατοαπορροφητικότητας (αποκλείονται τεμάχια από τούβλο, οπλισμό, μάρμαρα κλπ.). Σε περιοχές όπου υπάρχει πυκνός οπλισμός, η απόσταση των ράβδων μεταξύ τους θα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να διέρχεται το σκυρόδεμα ανάμεσά τους (π.χ. τουλάχιστον 3 φορές τη διάσταση του μέγιστου κόκκου του αδρανούς D_{max}), μειώνοντας την πιθανότητα κενών ή «σφηκοφωλιών».

Οι επιφάνειες των οπλισμών πρέπει να είναι καθαρές από λάσπη ή λάδια ή άλλες προσμίξεις. Πολύ ελαφριά διάβρωση στις ράβδους οπλισμού από οξείδια, θα εξουδετερωθεί (passivate) από το σκυρόδεμα και δεν αποτελεί συνθήκη, συνήθως, που θα προκαλέσει διάβρωση στο μέλλον.

Στο ACI 301, όπως και στο Κεφάλαιο: 3.4 του ACI 222.3R-11, δίνονται οδηγίες για ράβδους με εποξεική επικάλυψη. Μεγάλη προσοχή απαιτείται και στην τοποθέτηση ράβδων οπλισμού/τενόντων προεντάσεως, στη διασφάλιση της ακριβούς θέσης τους, καθώς και στην προστασία του αγωγού (sheath).

Μετά την τοποθέτηση του οπλισμού, προεντεταμένου ή μη, θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η κίνηση των τεχνιτών ή άλλες εργασίες στην κοντινή περιοχή των ξυλοτύπων που θα μπορούσαν να προκαλέσουν μετακίνηση του οπλισμού.

12.2.3 Διάστρωση σκυροδέματος

Η διάστρωση του σκυροδέματος πρέπει να γίνει με προσοχή ώστε να προστατέψει τον σιδηροπλισμό από μελλοντική διάβρωση. Στο ACI 305 (υψηλές θερμοκρασίες) και ACI 306 (χαμηλές θερμοκρασίες) δίνονται τα μέτρα προστασίας του σκυροδέματος που πρέπει να αξιολογηθούν πριν από τη σκυροδέτηση (Σημ. Αναλυτικές οδηγίες υπάρχουν και στις ΤΟ 1, ΤΟ 2, ΤΟ 3 του ΣΠΜΕ –www.spme.gr). Ιδιαίτερα, θα πρέπει να ακολουθηθούν οι διαδικασίες που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 5 του ACI 304R και στον ΚΤΣ (2016) και να δοθεί προσοχή ώστε να μη γίνει απόμιξη των αδρανών και του κονιάματος και να γίνει αποφυγή κενών και υψηλού πορώδους.

Εάν υπάρχουν σωστές αναλογίες στο σκυρόδεμα και σωστές διαστάσεις στους ξυλοτύπους, ώστε να αποφευχθεί η απόμιξη και να χωράει το σκυρόδεμα χωρίς να εμποδίζεται η διέλευσή του, μπορεί να γίνει σκυροδέτηση με ελεύθερη πτώση (freefall) χωρίς ειδικά μέσα όπως: σωληνώσεις, χωνιά (tremie pipes), κ.λπ.. Τέτοιες τεχνικές θα χρειαστούν σε σκυροδετήσεις από μεγάλο ύψος σε υψηλές κολώνες, φρέατα (shafts), παρουσία πυκνού οπλισμού, κ.λπ. Η εφαρμογή άντλησης είναι πλεονεκτική, διότι φέρνει το στόμιο του σωλήνα της αντλίας πολύ κοντά στην τελική θέση διάστρωσης.

Πρέπει να γίνει σωστό πρόγραμμα σκυροδέτησης που να ελαχιστοποιεί τους αδρανείς χρόνους (π.χ. καθυστέρηση διάστρωσης επόμενης παρτίδας σκυροδέματος) ώστε να αποφευχθεί ο «ψυχρός αρμός» με άλλη στρώση που έχει διαστρωθεί νωρίτερα, και να αποφευχθεί έναρξη ρηγματώσεων στον ψυχρό αρμό αργότερα. Σε σκυροδέτηση κάτω από το νερό, πρέπει να αποφευχθεί ο εγκλωβισμός νερού στο σκυρόδεμα.

Γενικά, πρέπει να γίνει αυστηρή επίβλεψη της διάστρωσης για τη διασφάλιση της ποιότητας του σκυροδέματος και για να γίνει καλύτερος συντονισμός μεταξύ των διαστρώσεων (sequencing).

12.3 Συμπύκνωση σκυροδέματος

Στην προδιαγραφή ACI 309R και στον ΚΤΣ (2016), υπάρχει πολύτιμο πληροφοριακό υλικό για την συμπύκνωση του σκυροδέματος και ειδικά:

- Για τη σημασία της σωστής συμπύκνωσης
- Την επίδραση του σχεδιασμού του μίγματος και της εργασιμότητας
- Τις μεθόδους και την επιλογή του εξοπλισμού συμπύκνωσης
- Τις συνιστώμενες πρακτικές δόνησης για τα διάφορα είδη κατασκευών

Άλλες καλές πηγές βιβλιογραφίας είναι το ACI 309.1R για τις «αρχές δόνησης», ACI SP-96 και μια ειδική έκθεση του FHWA (Whiting et al., 1987). Τέλος, οι κατασκευαστές δονητών έχουν πληροφοριακό υλικό, φυλλάδια κ.λπ., πολύ κατατοπιστικά.

Γενικά επηρεάζουν:

- Ο χρόνος συμπύκνωσης σε συνάρτηση με την εργασιμότητα του σκυροδέματος, τη διάμετρο του δονητή, την πυκνότητα του οπλισμού (βλ. HETEK/Report No 81/1997).
- Το πάχος της στρώσης, το ύψος πτώσης, η μορφή του στοιχείου, το είδος της κατασκευής (λιμενικό, γεφυροποιία, σήραγγες, κτιριακό, κ.λπ.)
- Η σύνθεση του σκυροδέματος, τα φυσικά/θραυστά αδρανή, η ποσότητα τσιμέντου ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος, η προσθήκη προσθέτων, κ.λπ.

12.4 Επίδραση της συντήρησης στη διάβρωση του οπλισμού

- Στο ACI-308R ορίζεται ως συντήρηση: «Συντήρηση είναι η διατήρηση ικανοποιητικής υγρασίας και θερμοκρασίας του σκυροδέματος, κατά τα πρώιμα στάδιά του, ώστε να αναπτυχθούν επιθυμητές ιδιότητες, όπως: αντοχή, μέτρο ελαστικότητας (elastic modulus), αντίσταση σε ψύξη/απόψυξη».
  Στις επιθυμητές ιδιότητες περιλαμβάνονται επίσης:
  - Η υψηλή ηλεκτρική αντίσταση (electrical resistivity) και
  - Η αδιαπερατότητα σε ρευστά μέσα (π.χ. νερό), ατμούς, χλωριόντα σε διάλυση, οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα, μέσω της μείωσης του πορώδους και της κατάλληλης τροποποίησης της δομής του (π.χ. ομοιόμορφη κατανομή μεγέθους πόρων)
- Η θερμοκρασία και οι συνθήκες υγρασίας πρέπει να διατηρηθούν τόσο στο εσωτερικό όσο και στην επιφάνεια του σκυροδέματος, σύμφωνα με τα: ACI 305R, ACI 306R, ACI 308R.
- Ιδιαίτερα μέτρα πρέπει να ληφθούν όταν προβλέπεται ότι η θερμοκρασία του αέρα θα είναι χαμηλότερη από 10°C, σε οποιαδήποτε στιγμή, κατά τις πρώτες ημέρες μετά τη σκυροδέτηση, καθώς και όταν προβλέπεται γρήγορη εξάτμιση της επιφανειακής υγρασίας στο νωπό σκυρόδεμα καθώς και υψηλές ταχύτητες ανέμου, ξηρό περιβάλλον με χαμηλή σχετική υγρασία, κ.λπ.
- Στο ACI 309R αναφέρονται μέθοδοι προστασίας όπως[1]:
  - Μεμβράνες συντήρησης, πλαστικά φύλλα, θερμαινόμενες κουβέρτες
  - Βύθιση, πλημμύρισμα της κατασκευής, ψεκασμός ή καταιονισμός με νερό (sprinklers), υγρές λινάτσες, κ.λπ.
  - Σκίαση της κατασκευής, ανεμοφράκτες, ψεκασμός με νερό υδρατμών (fog – spraying) ή άλλες τεχνικές για ψύξη της επιφάνειας του σκυροδέματος.

[1] Βλ. και ΤΟ1, ΤΟ2 και ΤΟ3 (ΣΠΜΕ, www.spme.gr).

13. Ποια είναι η προστασία των κατασκευών από εξωτερικές πηγές Cl^-;

- Τα κυριότερα μέτρα προστασίας των κατασκευών έναντι εισχώρησης χλωριόντων από εξωτερικές πηγές είναι μεμβράνες, διάφορες επικαλύψεις και πολυμερικός εμποτισμός. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη περιγραφή των παραπάνω προστασιών.

13.1 Υδατοστεγανές μεμβράνες - Οι υδατοστεγανές μεμβράνες χρησιμοποιούνται για να περιορίσουν την είσοδο των χλωριόντων (αλλά και άλλων χημικών ουσιών) στο σκυρόδεμα. Κάθε εμπόδιο στην εισχώρηση νερού μπορεί να δράσει και σαν εμπόδιο στα υδατοδιαλυτά χλωριόντα. Ορισμένες μεμβράνες προσφέρουν σημαντική αντίσταση στην είσοδο χλωριόντων και υγρασίας, ακόμη και στην περίπτωση που υπάρχουν στην επιφάνεια φυσαλίδες ή ρωγμές. Για τη μέτρηση της αντοχής μιας μεμβράνης σε υδροστατική πίεση πάνω από υφιστάμενη ρωγμή, θα πρέπει να χρησιμοποιείται η δοκιμή που περιγράφεται στο πρότυπο ASTM D5385.

- Οι κύριες απαιτήσεις για ένα ιδανικό υδατοστεγές σύστημα είναι οι εξής:
  - Ευκολία στην εγκατάσταση
  - Καλή πρόσφυση με το υπόστρωμα
  - Συμβατότητα μεταξύ των υλικών του συστήματος συμπεριλαμβανομένου του υποστρώματος, όπως αστάρι, συγκολλητικά, επικαλύψεις
  - Διατήρηση της αδιαπερατότητας σε χλωριόντα και υγρασία σε συνθήκες λειτουργίας και ειδικά σε ακραίες θερμοκρασίες, διανοίξεις ρωγμών, φαινόμενα γήρανσης και επιβαλλόμενα φορτία

13.2 Πολυμερικές επιστρώσεις από σκυρόδεμα από πολυμερή (Polymer Concrete Overlays - PCO) – Οι επιστρώσεις αυτές αποτελούνται από σκυρόδεμα αδρανών, με συνδετική ύλη ένα πολυμερές γαλάκτωμα. Τα πιο κοινά πολυμερή για τη χρήση αυτή είναι οι πολυεστέρες, τα ακρυλικά και τα εποξειδικά. Οι επιστρώσεις τοποθετούνται είτε με επάλειψη της ρητίνης σε όλη την οριζόντια επιφάνεια του δομικού στοιχείου (υπόστρωμα) και διασπορά των αδρανών μέσα στη ρητίνη, είτε με προ-ανάμιξη όλων των συστατικών και τελική εφαρμογή τους με χρήση κατάλληλου εξοπλισμού. Οι πολυμερικές επιστρώσεις από σκυρόδεμα έχουν μικρό χρόνο πήξης, καλύπτουν μεγάλο εύρος αντοχών και ευκαμψίας και παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση στην απότριψη και στη διείσδυση νερού και χλωριόντων. Τα πάχη τους κυμαίνονται από 5 mm έως 40 mm. Λόγω μεγάλης συρρίκνωσης και υψηλών συντελεστών θερμικής διαστολής, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των κατάλληλων πολυμερών και της κοκκομετρίας των αδρανών. Περισσότερες πληροφορίες για τις πολυμερικές επικαλύψεις από σκυρόδεμα (PCO) δίνονται στο ACI 548.5R.

13.3 Τσιμεντοειδείς επικαλύψεις από σκυρόδεμα - Οι επικαλύψεις αυτές με τσιμέντο τύπου Πόρτλαντ εφαρμόζονται σαν τμήμα μιας κατασκευής δύο φάσεων. Η εφαρμογή της επικάλυψης μπορεί να γίνει είτε πριν την τελική πήξη του σκυροδέματος (υπόστρωμα) είτε αρκετές μέρες αργότερα, οπότε είναι απαραίτητη και η χρήση κάποιας ενδιάμεσης συνδετικής στρώσης μεταξύ των δυο στρώσεων από σκυρόδεμα. Τα πλεονεκτήματα της πρώτης περίπτωσης είναι η μείωση του συνολικού χρόνου κατασκευής και η απουσία προετοιμασίας της υπόβασης που οδηγούν σε μείωση του κόστους. Ανεξάρτητα του χρόνου εφαρμογής που θα επιλεγεί, τα υλικά των τσιμεντοειδών επικαλύψεων προσφέρουν βελτιωμένη αντίσταση στη διείσδυση αλάτων, στη φθορά και στην ολίσθηση.

13.4. Επιστρώσεις από σκυρόδεμα εμπλουτισμένο με πυριτική παιπάλη – Η επίδοση αυτής της επίστρωσης είναι πολύ ανώτερη των προηγούμενων και υπερτερεί στη συμπύκνωση και στο φινίρισμα. Η χρήση πυριτικής παιπάλης και μειωτών νερού υψηλής απόδοσης (high range water retarders HRWR) έχουν ως αποτέλεσμα τη χαμηλή διαπερατότητά της σε χλωριόντα. Ο λόγος Νερού / (Τσιμέντο + Παιπάλη) θα πρέπει να είναι αρκετά μικρότερος του 0.40. Στην περίπτωση που θα χρησιμοποιηθεί σε εξωτερικούς χώρους θα πρέπει να περιέχει και αερακτικό. Λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας σε λεπτά υλικά, ο κίνδυνος εμφάνισης ρωγμών από εξίδρωση και πλαστική συρρίκνωση είναι αυξημένος. Για το λόγο αυτό η σωστή και έγκαιρη συντήρησή του είναι σημαντική.

13.5. Επιστρώσεις από σκυρόδεμα τροποποιημένο με latex– Η επίστρωση αυτή αποτελείται από κοινό τσιμέντο Πόρτλαντ με την προσθήκη πολυμερούς latex. Το latex είναι μια κολλοειδής διασπορά πολυμερικών σωματιδίων μέσα σε νερό. Τα σωματίδια σταθεροποιούνται για να αποτρέψουν την πήξη, ενώ γίνεται και χρήση αντιαφρωδών παραγόντων antifoaming agents που αποτρέπουν την παγίδευση επιπλέον αέρα κατά την ανάμιξη. Το νερό διασποράς του latex βοηθά στην ενυδάτωση του τσιμέντου και τα πολυμερή προσδίδουν επιπρόσθετες συνδετικές ιδιότητες στο μίγμα, με αποτέλεσμα το χαμηλό λόγο Νερού / (Τσιμέντο + Latex), τη μεγάλη ανθεκτικότητα και την υψηλή αντίσταση στη διαπερατότητα από χλωριόντα.

13.6 Πολυμερικός εμποτισμός (Polymer Impregnated Concrete - PIC) – Ο πολυμερικός εμποτισμός συνίσταται στην πλήρωση των κενών του σκληρυμένου σκυροδέματος από ένα μονομερές υλικό με μικρό ιξώδες το οποίο στη συνέχεια πολυμερίζεται επί τόπου. Εργαστηριακές έρευνες έχουν δείξει ότι ένα σκυρόδεμα πολυμερικού εμποτισμού αποκτά αντοχή, ανθεκτικότητα και είναι σχεδόν αδιαπέρατο. Οι ιδιότητές του καθορίζονται κυρίως από την ποσότητα του πολυμερούς μέσα στο σκυρόδεμα. Η αύξηση της ποσότητας αυτής επιτυγχάνεται με την πλήρη ξήρανση του σκυροδέματος, την απομάκρυνση του περιεχόμενου αέρα με τεχνικές κενού, την πλήρωση μέχρι κορεσμού με μονομερές υλικό υπό πίεση και τον πολυμερισμό του με ταυτόχρονη παρεμπόδιση της εξάτμισης του μονομερούς. Τόσο ο κίνδυνος εμφάνισης ρωγμών στο σκυρόδεμα από την πλήρη ξήρανση όσο και το υψηλό κόστος, έχουν αποτρέψει τη μέθοδο αυτή από την εφαρμογή της σαν πρακτική λύση περιορισμού της εισόδου χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Περισσότερες πληροφορίες για το σκυρόδεμα πολυμερικού εμποτισμού (PIC) δίνονται στο ACI 548.1R.

14. Πως αξιολογείται μια κατασκευή έναντι ευαισθησίας σε διάβρωση (αξιολόγηση και εν λειτουργία);

- Η διάβρωση του οπλισμού σκυροδέματος μιας κατασκευής αποτελεί μια διακινδύνευση της δομικής της ακεραιότητας, η οποία εκδηλώνεται κατά τη διάρκεια ζωής και λειτουργίας της. Επομένως οφείλει να αξιολογείται διαρκώς ώστε να προλαμβάνεται ή να αντιμετωπίζεται παράλληλα με την πλήρη χρήση της κατασκευής, με όρους τεχνικής επάρκειας και οικονομικής αποδοτικότητας, ώστε να διασφαλίζεται η ασφάλεια, η ποιότητα και η λειτουργικότητα.

- Όπως έχει αναφερθεί, οι κύριες αιτίες διάβρωσης οπλισμού είναι η προσβολή από χλωριόντα και η έντονη ενανθράκωση του περιβάλλοντος σκυροδέματος. Βασικά στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη κατά την αξιολόγηση της διακινδύνευσης αυτής είναι:
  - Οι περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες εκτίθεται. Σημειώνεται κυρίως η άμεση επαφή με θαλασσινό νερό αλλά και η γενικότερη έκθεση σε παραθαλάσσιο περιβάλλον που οδηγεί σε διαβροχή από θαλασσινό νερό.
  - Οι ειδικές συνθήκες που καθιστούν μια κατασκευή ευάλωτη στο συγκεκριμένο τύπο προσβολής. Χαρακτηριστική περίπτωση οι οδικές υποδομές που κατά τη διάρκεια του χειμώνα προστατεύονται έναντι παγετού με τη χρήση άλατος. Ακόμα και η μεταφορά τέτοιων υγρών με περιεχόμενο αλάτων σε χώρους πάρκινγκ μέσω των τροχών των οχημάτων μπορεί να αποβεί επιβαρυντικός παράγοντας. Παράλληλα η διείσδυση των αλάτων μέσω ρωγμών ή αρμών οδηγεί σε επιβάρυνση και κάτω από την επιφάνεια.
  - Σε περιπτώσεις που δεν προκύπτει άμεσα ο κίνδυνος προσβολής από χλωριόντα η διάβρωση μπορεί να επέλθει μέσω άλλου μηχανισμού, όπως η εξασθένιση της παθητικής αντιδιαβρωτικής προστασίας του οπλισμού λόγω ενανθράκωσης του σκυροδέματος. Για παράδειγμα σε κατασκευές όπως οι πύργοι ψύξεως η υψηλή θερμοκρασία και η αυξημένη υγρασία επιταχύνουν την ενανθράκωση, ενώ ενδέχεται στο εσωτερικό τους να δημιουργείται υψηλότερη του κανονικού συγκέντρωση διαλυμένων επιβαρυντικών ουσιών.
  - Οικοδομικές διατάξεις που συντελούν στη δημιουργία τοπικών συνθηκών οι οποίες επιδεινώνουν την πιθανότητα διάβρωσης του οπλισμού ακόμα και για γενικώς ξηρό περιβάλλον. Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα αναφέρεται η επικάλυψη επιφανειών σκυροδέματος με οικοδομικά υλικά που έχουν μειωμένη υδατοπερατότητα και άρα παγιδεύουν νερό σε επαφή με την επιφάνεια του σκυροδέματος. Άλλο παράδειγμα είναι η χρήση προσμίκτου που εμπεριέχει χλωριόντα, πράγμα που οδηγεί σε επιβαρυντικό συνδυασμό που μπορεί να δημιουργήσει συνθήκες διάβρωσης χωρίς να είναι αναμενόμενες ή να γίνουν εγκαίρως αντιληπτές.

- Πρέπει να σημειωθεί πως η πιο επιτυχημένη απόφαση παρέμβασης δεν είναι η απλή χρήση ακόμα και του πλέον προηγμένου επισκευαστικού υλικού, αλλά η σε βάθος διάγνωση και τελικά ο εντοπισμός του μηχανισμού προσβολής που οδήγησε στην ανάπτυξη της διάβρωσης η οποία τελικά θα οδηγήσει στην επιλογή των κατάλληλων μεθόδων, διατάξεων και υλικών που θα επιτύχουν την αναίρεσή του, με απώτερο σκοπό την εξασφάλιση της επιθυμητής διάρκειας ζωής ή και την επέκταση της αρχικώς προβλεφθείσας.

- Δεδομένου πως η κατασκευή εξυπηρετεί κάποιο σκοπό ο οποίος έχει και οικονομικό αντίκρυσμα, προκύπτει πως ο σχεδιασμός μιας παρέμβασης αποκατάστασης αποτελεί μια διαδικασία η οποία εκτός από τεχνικά στοιχεία περιλαμβάνει και την οικονομική αποδοτικότητά της, σε συνάρτηση πάντα με το σκοπό που επιτελεί η κατασκευή. Προκειμένου να σχεδιαστεί μια τεχνικά επιτυχημένη και οικονομικά συμφέρουσα κι αποδοτική παρέμβαση σε μια κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος της οποίας ο οπλισμός έχει υποστεί διάβρωση προτείνεται μια τεχνικο-οικονομική μεθοδολογία με συγκεκριμένη αλληλουχία βημάτων, όπως αυτά που αναλύονται στο Κεφάλαιο 7.

15. Ποια τα συνήθη μέτρα προστασίας;

- Η ευαισθησία σε διάβρωση των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος πολύ λίγο επηρεάζεται από τη χημική τους σύσταση, τις μηχανικές τους ιδιότητες ή την εντατική τους κατάσταση. Κατά συνέπεια για να αποφευχθεί η διάβρωση μέσα σε ένα διαβρωτικό περιβάλλον, είτε ο οπλισμός θα πρέπει να έχει παραχθεί από υλικό που δεν διαβρώνεται, είτε ο χάλυβας του οπλισμού θα πρέπει να έχει κάποια επικάλυψη που να απομονώνει την επιφάνειά του από την επαφή με το οξυγόνο, την υγρασία και τα χλωριόντα. Η διάβρωση του χάλυβα μπορεί επίσης να εμποδιστεί με τη χρήση αναστολέων διάβρωσης (corrosion inhibitors) ή τη χρήση καθοδικής προστασίας. Τα παραπάνω δεν ισχύουν σε χάλυβες προέντασης.

- Στη συνέχεια περιγράφονται τα παραπάνω συνήθη μέτρα προστασίας

15.1 Χάλυβες ανθεκτικοί σε διάβρωση*:*

α. Οι ανθεκτικοί στις ατμοσφαιρικές συνθήκες χάλυβες (weathering steels) που συνήθως χρησιμοποιούνται στις μεταλλικές κατασκευές, αποτελούνται από κράματα που τους επιτρέπουν να παρουσιάζουν ιδιαίτερα αυξημένη αντίσταση στη διάβρωση, λόγω ενός προστατευτικού στρώματος στην επιφάνειά τους που δημιουργείται κάτω από την επίδραση του περιβάλλοντος. Οι χάλυβες όμως αυτοί δεν συμπεριφέρονται ανάλογα μέσα σε σκυρόδεμα που περιέχει υγρασία και χλωριόντα και συνεπώς δεν θεωρούνται κατάλληλοι ως οπλισμός σκυροδέματος.

β. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες (stainless steels) που χρησιμοποιούνται σε πολύ εξειδικευμένες εφαρμογές, έχουν όμως υψηλό κόστος που δεν τους επιτρέπει να αντικαταστήσουν τους κοινούς χάλυβες ως οπλισμός σκυροδέματος στα συνήθη έργα.

15.2 Επικαλύψεις και Επιχρίσματα:

α. Οι μεταλλικές επικαλύψεις του χάλυβα οπλισμού διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: στις θυσιαζόμενες και στις ευγενείς (μη θυσιαζόμενες). Γενικά τα (λιγότερο ευγενή) μέταλλα με μικρότερο δυναμικό διάβρωσης από το χάλυβα όπως ο ψευδάργυρος το αλουμίνιο και το χρώμιο, προσφέρονται ως θυσιαζόμενες επικαλύψεις του χάλυβα. Στην περίπτωση που η επικάλυψη αυτή καταστραφεί, σχηματίζεται ένα γαλβανικό ζεύγος στο οποίο η επικάλυψη λειτουργεί ως άνοδος, προστατεύοντας τον χάλυβα.

β. Οι μη μεταλλικές επικαλύψεις του χάλυβα οπλισμού συνίστανται στη χρήση εποξειδικής πούδρας προσκολλημένης στην επιφάνεια του χάλυβα. Το εποξειδικό αυτό επίχρισμα απομονώνει τον χάλυβα από την επαφή με το οξυγόνο, την υγρασία και τα χλωριόντα και αναστέλλει τη διέλευση οποιουδήποτε ηλεκτροχημικά παραγόμενου ρεύματος. Η μέθοδος αυτή επιτυγχάνεται με την ομοιόμορφη ηλεκτροστατική εφαρμογή πολύ λεπτής εποξειδικής πούδρας πάνω στην καθαρή επιφάνεια του θερμαινόμενου χάλυβα και είναι πολύ διαδεδομένη στο εξωτερικό από τη δεκαετία του 1970. Η ακεραιότητα της επικάλυψης κατά την εφαρμογή ελέγχεται συνεχώς ηλεκτρονικά ενώ διενεργείται και έλεγχος αντοχής σε ρηγμάτωση κατά τη δοκιμή κάμψης σύμφωνα με το ASTM A775.

15.3 Αναστολείς διάβρωσης:

Οι αναστολείς διάβρωσης είναι χημικά πρόσθετα σκυροδέματος τα οποία είτε επιμηκύνουν το χρόνο έναρξης της διάβρωσης, είτε επιβραδύνουν σημαντικά το ρυθμό ανάπτυξης της διάβρωσης ενός μετάλλου, είτε και τα δύο. Διάφορα χημικά έχουν κατά καιρούς μελετηθεί ως

προς την αποτελεσματικότητά τους ως αναστολείς διάβρωσης του χάλυβα σκυροδέματος (όπως: χρωμικά, φωσφορικά, υποφωσφοριώδη, αλκάλια, νιτρικά, χλωριούχα, και αμίνες). Μερικά από αυτά είναι αποτελεσματικά ενώ άλλα παρουσιάζουν αντιφατικά αποτελέσματα σε εργαστηριακές δοκιμές. Κάποια που εμφανίζονται με καλή συμπεριφορά ως αναστολείς διάβρωσης προκαλούν δυσμενείς επιπτώσεις στο σκυρόδεμα (π.χ μείωση αντοχής), γι' αυτό και όλοι οι αναστολείς πρέπει να δοκιμάζονται στο σκυρόδεμα πριν τη χρήση τους.
Έχει καταγραφεί ότι χημικά όπως το νιτρώδες ασβέστιο [$Ca(NO_2)_2$] και οι αλκανολαμίνες είναι αποτελεσματικά ως αναστολείς διάβρωσης. Αντίθετα η χρήση υλικών που στεγανοποιούν το σκυρόδεμα όπως η σιλικόνη, έχει διαπιστωθεί ότι δεν είναι αποτελεσματική για το σκοπό της αναστολής της διάβρωσης. Η μελέτη των χημικών προσθέτων είναι συνεχής τόσο στην πρόληψη της διάβρωσης των νέων κατασκευών όσο και στην επισκευή και αποκατάσταση των υφιστάμενων.

15.4 Καθοδική προστασία:

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, ως διάβρωση ορίζεται η ηλεκτροχημική διαδικασία που περιλαμβάνει τη μεταφορά φορτίου (ηλεκτρόνια) και τη σταδιακή απώλεια της λειτουργικότητας του χάλυβα σκυροδέματος. Απουσία μιας εξωτερικής ηλεκτρικής πηγής, η εν λόγω ηλεκτροχημική διαδικασία απαιτεί δύο αντιδράσεις: μία αντίδραση που παράγει ηλεκτρόνια (ανοδική αντίδραση), όπου λαμβάνει χώρα η οξείδωση του χάλυβα παράγοντας ιόντα σιδήρου και μία αντίδραση που καταναλώνει ηλεκτρόνια (καθοδική αντίδραση), όπου λαμβάνει χώρα η αναγωγή οξυγόνου παράγοντας ιόντα υδροξυλίου. Η διάβρωση και ο σχηματισμός σκουριάς εμφανίζονται στην άνοδο.
Η καθοδική προστασία είναι μία ευρέως διαδεδομένη και αποτελεσματική μέθοδος ελέγχου της διάβρωσης του χάλυβα. Η μέθοδος αυτή αυξάνει το δυναμικό ενός μετάλλου εφαρμόζοντας ηλεκτρικό ρεύμα από εξωτερική πηγή, έτσι ώστε να εξουδετερωθεί το φυσικά παραγόμενο ρεύμα κατά την ανοδική αντίδραση. Με τον τρόπο αυτό, εμποδίζεται η μεταφορά ηλεκτρονίων από την άνοδο προς την κάθοδο και αναστέλλεται η διαδικασία διάβρωσης του οπλισμού.
Αν και η καθοδική προστασία χρησιμοποιείται για πάνω από 25 χρόνια στην αποκατάσταση υφιστάμενων κατασκευών από σκυρόδεμα που έχει προσβληθεί από θαλάσσια άλατα, η εφαρμογή της στις νέες κατασκευές είναι σχετικά πρόσφατη.
Στην περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου, μόνον το αποφλοιωμένο και αποκολλημένο σκυρόδεμα χρειάζεται να επισκευασθεί. Το υγιές σκυρόδεμα, ακόμη και αν περιέχει μεγάλη συγκέντρωση χλωριόντων, δεν απαιτεί επέμβαση.

15.5 Απομάκρυνση χλωριόντων από το σκυρόδεμα:

Η μέθοδος βασίζεται στην εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος στο σκυρόδεμα με σκοπό την απομάκρυνση των χλωριόντων από τον οπλισμό. Η απομάκρυνση επιτυγχάνεται με τη χρήση μίας ανόδου (π.χ. μεταλλικό πλέγμα) και ενός ηλεκτρολύτη (π.χ. ρητίνη) πάνω στο σκυρόδεμα και τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ της ανόδου και του οπλισμού (κάθοδος). Αν και η μέθοδος αυτή προσομοιάζει την καθοδική προστασία πρέπει να σημειωθεί ότι εφαρμόζεται μόνον ως επεμβατική και όχι ως μόνιμη προστασία. Επίσης το ρεύμα που απαιτείται είναι υπερπολλαπλάσιο από το αντίστοιχο της καθοδικής (max 40-50V). Στο ηλεκτροχημικό κύκλωμα που δημιουργείται, τα χλωριόντα που έχουν αρνητικό φορτίο έλκονται από την άνοδο και δεσμεύονται από τον ηλεκτρολύτη. Παρόλα αυτά δεν απομακρύνονται στο σύνολό τους και ένα τμήμα τους παραμένει στο σκυρόδεμα.

Την τελευταία εικοσαετία έχουν αναπτυχθεί ιδιαίτερες τεχνικές εφαρμογής της μεθόδου αυτής. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου παρατηρείται αυξημένη απομάκρυνση χλωριόντων στην

αρχή αλλά στη συνέχεια ο ρυθμός ελαττώνεται ανάλογα της συγκέντρωσης των χλωριόντων και της συνολικής ποσότητας του ρεύματος που έχει διέλθει. Η ηλεκτροχημική απομάκρυνση των χλωριόντων μπορεί να επιτευχθεί και σε κατασκευές που βρίσκονται σε λειτουργία (γέφυρες, χώροι στάθμευσης).

Ένα από τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η εφαρμογή υψηλού δυναμικού που εκτός από το κόστος μπορεί να αναπτύξει και μεγάλες θερμοκρασίες στην κατασκευή με ενδεχόμενη εμφάνιση ρηγματώσεων. Μελέτες επίσης έχουν δείξει ότι η ιδανική κατασκευή για να δεχθεί επιτυχώς μια τέτοια προστασία, είναι εκείνη στην οποία τα χλωριόντα δεν έχουν διεισδύσει πέραν του οπλισμού και η διάβρωση δεν έχει προκαλέσει εκτεταμένες αποκολλήσεις και αποφλοιώσεις στο σκυρόδεμα.

15.6 Επαναλκαλοποίηση του σκυροδέματος:

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, η ενανθράκωση προκαλεί την απώλεια της αλκαλικότητας του σκυροδέματος, οδηγώντας στη δημιουργία του μηχανισμού διάβρωσης του χάλυβα. Η μέθοδος της επαναλκαλοποίησης είναι παρόμοια με τη μέθοδο της ηλεκτροχημικής απομάκρυνσης των χλωριόντων που αναφέρθηκε παραπάνω. Η κυρίαρχη διαφορά τους είναι ότι στην επαναλκαλοποίηση, το ηλεκτροχημικό σύστημα που δημιουργείται παραμένει υγρό με τη χρήση ενός αλκαλικού ηλεκτρολύτη. Μέσω της ηλεκτρικής όσμωσης και της μετακίνησης των ιόντων, ο ηλεκτρολύτης διεισδύει στο ενανθρακωμένο σκυρόδεμα αυξάνοντας το P.H του και επαναφέροντας σταδιακά τη χαμένη αλκαλικότητα. Η μέθοδος εφαρμόζεται για μία περίοδο τριών έως επτά ημερών και το ηλεκτρικό φορτίο είναι της τάξης 75 – 200 A·h/m2 . Η σχετικά απλή αυτή μέθοδος μετριάζει κατά πολύ το μηχανισμό διάβρωσης χωρίς να χρειάζεται η αφαίρεση και αντικατάσταση του σκυροδέματος και χρησιμοποιείται ως τεχνική συντήρησης κατασκευών από σκυρόδεμα με ιστορική σημασία.

16. Εμφάνιση ρωγμών από διάβρωση οπλισμού. Βασικές έννοιες.

16.1 Γενικότερα αίτια ρηγμάτωσης του σκληρυμένου σκυροδέματος

- Ρωγμές στο σκληρυμένο[1] σκυρόδεμα εμφανίζονται όταν οι εφελκυστικές τάσεις που προκύπτουν από οποιοδήποτε συνδυασμό εντατικών ή αυτεντατικών μεγεθών (τάσεις ή παραμορφώσεις), υπερβαίνουν (τη δεδομένη χρονική στιγμή) την εφελκυστική αντοχή είτε την εφελκυστική παραμόρφωση ρηγμάτωσης του σκυροδέματος.

- Οι ρωγμές αυτές ενδέχεται να προκύψουν λόγω δράσεων των παρακάτω παραγόντων (με αναμενόμενη χρονική εμφάνιση):

    - Πρώιμη παρεμποδιζόμενη θερμοκρασιακή συστολοδιαστολή – σε συνδυασμό και με ελλιπή περίοδο συντήρησης και προστασίας (σε βάθος δεκαπενθημέρου από τη λήξη συντήρησης και προστασίας),

[1] Δεν εξετάζονται στην παρούσα οι ρωγμές στο νωπό (πλαστικό) σκυρόδεμα, οι οποίες, εφόσον δεν επισκευασθούν, θα παραμείνουν και θα οδηγήσουν σταδιακά σε διάβρωση του οπλισμού και άρα επέκταση αυτών λόγω περαιτέρω μηχανισμών διάβρωσης.

- Ανακατανομή δράσεων ή παρεμποδισμού λόγω συστολής ξήρανσης, ενδογενούς ξήρανσης και ερπυσμού του σκυροδέματος (σε βάθος διετίας από τη λήξη συντήρησης και προστασίας),
- Δράση χημικών παραγόντων στη μάζα λόγω κακής σύνθεσης και/ή έκθεσης σε χημικά, όπως η αλκαλοπυριτική αντίδραση, η δράση θειικών, η καθυστερημένη δημιουργία ετρινγκίτη (DEF) (σε βάθος πενταετίας και πλέον από τη λήξη συντήρησης και προστασίας),
- Κακή εκτέλεση είτε επίβλεψη του έργου, όπως κακή συμπύκνωση, ελλιπής συντήρηση / προστασία, εντατικά μεγέθη κατά τη φάση της κατασκευής όπως η καθίζηση υποστηριγμάτων ή τύπων, υπερφόρτιση στη φάση κατασκευής, πρώιμο ξεκαλούπωμα, κρούσεις, (κατά την κατασκευή),
- Εντατικά μεγέθη όπως κάμψη ή καμπτοδιάτμηση λειτουργίας, είτε τοπική υπερφόρτιση, όπως, π.χ., σημειακές εδράσεις, γραμμικά συγκεντρωμένα φορτία τοιχοποιίας κλπ. (σε βάθος λειτουργίας),
- Μακροχρόνια διαφορική ή μη θερμοκρασιακή συστολοδιαστολή λειτουργίας (σε βάθος λειτουργίας),
- Καθιζήσεις (σε βάθος λειτουργίας, ανάλογα με τις συνθήκες θεμελίωσης και τη μεταβολή τους στο χρόνο),
- Σεισμική απόκριση σε συχνούς σεισμούς λειτουργίας (σε βάθος λειτουργίας),
- Κόπωση λόγω επαναλαμβανόμενων δράσεων (σε βάθος λειτουργίας),
- Κακές λεπτομέρειες όπλισης (μάτιση οπλισμών χωρίς εγκάρσια όπλιση, ελλιπής αγκύρωση, μεγάλο πάχος επικάλυψης χωρίς επιδερμική όπλιση)
- Έκθεση σε κύκλους ψύξης απόψυξης είτε επιφανειακής τριβής απότριψης (λόγω ελλιπούς συντήρησης και προστασίας αλλά και σε βάθος λειτουργίας),
- Διάβρωση του σκυροδέματος και/είτε των οπλισμών (σε βάθος ακόμη και δεκαετίας όταν π.χ. η επικάλυψη οπλισμού και/ή η ποιότητα του σκυροδέματος είναι ανεπαρκείς).

16.2 Ρηγμάτωση του σκυροδέματος ειδικά λόγω διάβρωσης του οπλισμού του

- Ειδικότερα για την περίπτωση αυτή, οι ρωγμές λόγω διάβρωσης οπλισμού, θα προκύψουν από σταδιακή διάβρωσή του μετά την αποπαθητικοποίηση του περιβάλλοντος σκυροδέματος. Πολύ πριν από οποιαδήποτε απώλεια μάζης οπλισμού (και άρα ελλείμματος στατικής λειτουργίας), καθώς τα προϊόντα του οξειδούμενου οπλισμού έχουν πολλαπλάσιο όγκο σε σχέση με τον αρχικό, προκύπτουν εφελκυστικές τάσεις στο εσωτερικό της μάζας του στοιχείου στην περιοχή της επικάλυψης, οι οποίες συνεπάγονται την εμφάνιση ρωγμών στην επιφάνεια, κατά μήκος του διαβρωνόμενου οπλισμού (και όχι κάθετα σε αυτόν, όπως είναι οι συνήθεις εφελκυστικές ρωγμές λόγω έντασης).

- Πρόκειται για ρωγμές που εμφανίζονται, ανάλογα με το διαβρωτικό περιβάλλον (έκθεση σε ενανθράκωση και σε χλωριόντα θαλάσσης ή από π.χ. αντιπαγωτικά άλατα) ανάλογα τη σύνθεση του σκυροδέματος και ανάλογα την επικάλυψη του οπλισμού καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου. Το χρονικό διάστημα που ενδέχεται να εμφανισθούν πλέον καθορίζεται από τον ορθό σχεδιασμό για περιβαλλοντική έκθεση κατά EN206 (2013) και Ευρωκώδικα 2 (EN 1992-1-1, 2004), ενώ, σε υφιστάμενες κατασκευές, είναι πολύ κάτω της 50ετίας και μπορεί να είναι ακόμη και κάτω από τα δέκα έτη. Επιπλέον, σε κάθε γενιά

κατασκευής μπορεί να προκύψει και νωρίτερα από επιτάχυνση της διαδικασίας διάβρωσης, λόγω μη επισκευής της ρηγμάτωσης από οποιονδήποτε από τους προηγούμενους παράγοντες. Σε αυτήν την περίπτωση ανάλογα με την έκθεση σε χλωριόντα, επιταχύνεται η διείσδυση των ρύπων και άρα και ο χρόνος της επερχόμενης διάβρωσης, σε επίπεδα κάτω από την προβλεπόμενη ελάχιστη διάρκεια ζωής σχεδιασμού.

17. Πηγές

17.1 ACI 222R-01. Protection of Metals in Concrete Against Corrosion. American Concrete Institute. 2010.

17.2 ACI 222.3R. Guide to Design and construction Practices to Mitigate Corrosion of Reinforcement in Concrete Structures. 2011.

17.3 ACI 224.1R. Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures.2007.

17.4 ACI 440.1R-06 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars.

17.5 Σπανός Χ., Σπιθάκης Μ., Τρέζος Κ., Μέθοδοι για την επιτόπου αποτίμηση των χαρακτηριστικών των υλικών, Εκδόσεις ΤΕΕ, 2001.

17.6 Bungey J. H., Millard, S.G., Testing of Concrete in Structures, Blackie Academic & Professional, 1996.

17.7 ACI 228.2R-13 Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures, ACI Committee 228, Farmington Hills, MI, 2013.

17.8 ASTM C876, Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.

17.9 ASTM D5385, Standard Test Method for Hydrostatic Pressure Resistance of Waterproofing Membranes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000

17.10 EN 14629, Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of chloride content in hardened concrete, CEN, Brussels, 2007.

17.11 EN 14630, Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method, CEN, Brussels, 2006.

17.12 EN 206, Concrete – Specification, Performance, Production and Conformity, CEN, Brussels, 2013.

17.13 EN 1992-1-1, Ευρωκώδικας 2. Σχεδιασμός κατασκευών από σκυρόδεμα – Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια, CEN, Brussels, 2004.

17.14 ASCE 11-99, Guideline for Structural Condition Assessment of Existing Buildings, ASCE, 2000.

17.15 Y. Zhou, B. Gencturk, K. Willam, and A. Attar, “Carbonation-Induced and Chloride-Induced Corrosion in Reinforced Concrete Structures,” J. Mater. Civ. Eng., 2014.

17.16 Papatzani, S., “Basis of Design for the Assessment of Existing Concrete Structures , Repair and Maintenance decision,” Imperial College, London, 2002. DOI: 10.13140/RG.2.1.4533.6088/1.

17.17 The Institution of Structural Engineers, Appraisal of Existing Structures, Third edit. IstructE Ltd, 2010.

17.18 Buenfeld, N. R. and N. M. Hassanein, “The Modelling of Microstructure and its Potential for Studying Transport Properties and Durability,” H. Jennings, J. Kropp, and K. Scrivener, Eds. Dordrecht: Springer Netherlands, 1996, σελ. 415–431.

17.19 Papadakis, V. G., C. G. Vayenas, and M. N. Fardis, “Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation,” ACI Mater. J., 88, 4, σελ. 363–373, 1991.

17.20 Τάσιος, Θ.Π, Κ. Αλιγιζάκη “Ανθεκτικότητα Ωπλισμένου Σκυροδέματος” (1993)

17.21 http://www.duromac-cp.de/en-korrosion.htm

17.22 Richardson, M. G. (2003). Fundamentals of Durable Reinforced Concrete. CRC Press.

17.23 Τριανταφύλλου Α. Χ., Δομικά Υλικά , Αυτοέκδοση, 2013.

17.24 Daily S., Kendell K., “Cathodic Protection for New Concrete”, Concrete International, 21, 6, 1999, σελ. 63-68.

17.25 www.epoxyinterestgroup.org

17.26 ASTM A775 Standard Specification for Epoxy-Coated Steel Reinforcing Bars, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016,.

17.27 Bentz, E.C., “Probabilistic Modeling of Service Life for Structures Subject to Chlorides,” ACI Materials Journal, 100, 5, 2003, σελ. 391-397

17.28 Ehlen, M.A.; Thomas, M.D.A.; and Bentz, E.C., “Life-365 Service Life Prediction Model™ Version 2.0,” Concrete International, 31, 5, 2009, σελ. 41-46.

Life365, http://www.life-365.org/

17.29 ΚΤΣ 2016. Κανονισμός τεχνολογίας σκυροδέματος. ΥΠΗΜΕΔΙ, 2016.

17.30 Whiting, D., and Tayabji, S. Relationship of Consolidation to Performance of Concrete Pavements. FHWA/RD-87/095. Federal Highway Administration, Washington, D.C. 1987.

17.31 ΤΟ1, Σκυροδέτηση με χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος, ΣΠΜΕ, 2011, *www.spme.gr*.

17.32 ΤΟ2, Σκυροδέτηση με υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος, ΣΠΜΕ, 2011.

17.33 ΤΟ3, Σκυροδέτηση σε συνήθεις καιρικές συνθήκες, ΣΠΜΕ, 2012.

17.34 ASCE, Guideline for Condition Assessment of the Building Envelope, ASCE/SEI 30-14, 2014.

17.35 Applied Petrography Group (2010) SR2 A code of practice for the petrographic examination of concrete. The Geological Society of London

17.36 Concrete Society TR 32 (2014) – Analysis of hardened concrete A guide to tests procedures and interpretation of results (2nd Edition). ISBN: 978-1-904482-82-6

17.37 Sfikas I.P. and Ingham J. Service life design of concrete structures using probabilistic modelling tools: statistical analysis of input parameters. Proceedings of the 6th International Conference on Concrete Repair (Concrete Solutions 2016)/ Taylor and Francis (in press). 2016.

17.38 www.epoxyinterestgroup.org

ΣΥΛΛΟΓΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΛΛΑΔΑΣ
(ΣΠΜΕ)

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Παράρτημα

Τεχνικής Οδηγίας 7: Διάβρωση χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος

(και δόκιμες πρακτικές για να μην επέλθει διάβρωση)

Έκδοση 1η

ΑΘΗΝΑ –2016

Πίνακας Περιεχομένων

1. Γενικά
2. Ποιος είναι ο μηχανισμός διάβρωσης;
3. Πως αρχίζει η διάβρωση είτε από ενανθράκωση είτε από Cl^-;
4. Υπάρχουν οπλισμοί προστατευμένοι από διάβρωση;
5. Προστατεύεται ο οπλισμός από το περιβάλλον σκυρόδεμα;
6. Πως ταξινομούνται τα διάφορα διαβρωτικά περιβάλλοντα;
7. Ποιες είναι οι μέθοδοι αποτύπωσης του διαβρωτικού περιβάλλοντος και της βέλτιστης επιλογής επέμβασης μιας κατασκευής;
8. Ποιες μέθοδοι υπάρχουν για αξιολόγηση της διάβρωσης;
9. Ποιες μέθοδοι υπάρχουν για αξιολόγηση του σκυροδέματος;
10. Πως σχεδιάζουμε μια ανθεκτική σε διάβρωση κατασκευή;
11. Πως επηρεάζει η διάβρωση τους οπλισμούς ανά τύπο κατασκευής;
12. Ποιες κατασκευαστικές πρακτικές ακολουθούμε για μια ανθεκτική κατασκευή;
13. Ποια είναι η προστασία των κατασκευών από εξωτερικές πηγές Cl^-;
14. Πώς αξιολογείται μια κατασκευή έναντι ευαισθησίας σε διάβρωση; (αξιολόγηση και εν λειτουργία)
15. Ποια τα συνήθη μέτρα προστασίας;
16. Εμφάνιση ρωγμών από διάβρωση οπλισμού. Βασικές έννοιες

1. Γενικά

- Η διάβρωση αρχίζει όταν θραύεται ο προστατευτικός παθητικός υμένας. Αυτό συμβαίνει είτε σε όλη την επιφάνεια του χάλυβα (π.χ. πτώση pH) από μια γενική αλλαγή των θερμοδυναμικών συνθηκών, είτε τοπικά από κάποια χημική προσβολή (π.χ. επίθεση Cl^-) ή μηχανική θραύση (π.χ. ρωγμές στο σκυρόδεμα επικάλυψης).

- Τύποι διάβρωσης:

α) διάβρωση λόγω Cl-: Η πιο διαδεδομένη διάβρωση. Η πηγή Cl- μπορεί να είναι είτε εσωτερική: από τα ίδια τα υλικά ανάμιξης, περιλαμβανομένων των χημικών προσθέτων, είτε εξωτερική, όπως το θαλάσσιο περιβάλλον ή λοιπές περιοχές με υψηλά ποσοστά αλάτων (π.χ. αποξηραμένες λίμνες αλάτων), τα βιομηχανικά απόβλητα ή άλλοι ρύποι, και τα αντιπαγετικά άλατα.

Τα ιόντα χλωρίου και τα ιόντα σιδήρου αντιδρούν και δημιουργούν ένα διαλυτό σύνολο που διαχέεται μακριά από την άνοδο. Μόλις αυτό το σύνολο, βρει μια περιοχή με υψηλό pH διασπάται και κατακάθεται ένα αδιάλυτο υδροξείδιο σιδήρου και απελευθερώνει τα Cl^- που απομακρύνουν και άλλον σίδηρο από τη χαλύβδινη ράβδο. Στο χώρο προσελκύονται και άλλα Cl^- και η συγκέντρωσή τους αυξάνεται. Το αρχικό υδροξείδιο έχει χαμηλή οξείδωση και αντιδρά περαιτέρω με οξυγόνο και σχηματίζει οξείδια. Τα υδροξείδια έχουν μεγαλύτερο ειδικό όγκο από τον χάλυβα από τον οποίο προήλθαν. Αυτή η αύξηση όγκου οδηγεί σε εσωτερικές τάσεις μέσα στο σκυρόδεμα και έτσι προκαλείται ρηγμάτωση στο περιβάλλον της ράβδου και αποκόλληση του σκυροδέματος επικάλυψης (και διαλυτότητα τσιμεντόπαστας)

Η συνήθης οριακή τιμή Cl^- λαμβάνεται ως 0,4% κ.β. τσιμέντου (EN 206/2013) αν και στη βιβλιογραφία αναφέρονται και άλλες τιμές (δες π.χ. Sfikas and Ingham, 2016).

β) Διάβρωση λόγω ενανθράκωσης: Για pH ≤ 9 έχουμε αποπαθητικοποίηση του οπλισμού δηλαδή καταστροφή του προστατευτικού υμένα. Υψηλές συγκεντρώσεις CO_2 στην ατμόσφαιρα επιταχύνουν την ενανθράκωση (π.χ. σε βιομηχανικές ή έντονα αστικές περιοχές) όπως επίσης και περιβάλλοντα με εναλλαγή υγρών και ξηρών κύκλων υγρασίας και υψηλή θερμοκρασία. Τιμές σχετικής υγρασίας RH:60% είναι γενικά κρίσιμες.
Άλλοι παράγοντες είναι π.χ.:
β_1) το μικρό πάχος επικάλυψης
β_2) η παρουσία ρωγμών
β_3) το υψηλό πορώδες

- Η ταχύτητα διάβρωσης του οπλισμού που είναι ενσωματωμένος στο σκυρόδεμα επηρεάζεται από περιβαλλοντικούς παράγοντες. Οξυγόνο και υγρασία πρέπει να είναι παρόντα για να συμβεί ηλεκτροχημική διάβρωση. Οπλισμένο σκυρόδεμα με σημαντικά ποσοστά χλωριόντων είναι ευάλωτο σε διάβρωση ειδικά όταν υπόκειται σε κύκλους ύγρανσης – ξήρανσης. Αυτή η συνθήκη συνήθως συμβαίνει σε γέφυρες αυτοκινητοδρόμων ή σε χώρους στάθμευσης αυτοκινήτων που εκτίθενται σε αντιπαγετικά άλατα και σε κατασκευές σε παραθαλάσσιο περιβάλλον. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα και το επίπεδο της διάβρωσης είναι η ανομοιογένεια στο σκυρόδεμα και στον οπλισμό, το pH του νερού των πόρων του σκυροδέματος, η ενανθράκωση της τσιμεντόπαστας, οι ρωγμές στο σκυρόδεμα, ρεύμα διασποράς (stray currents) από γειτονικές πηγές ρεύματος (π.χ. σιδηροδρομικές γραμμές) και η γαλβανική

δράση εξαιτίας της επαφής μεταξύ ανόμοιων μετάλλων. Τα χαρακτηριστικά του σχεδιασμού και οι κατασκευαστικές τεχνικές μπορεί επίσης να παίξουν σημαντικό ρόλο στη διάβρωση του ενσωματωμένου χάλυβα. Οι αναλογίες υλικών στη σύνθεση του σκυροδέματος, το πάχος επικάλυψης του οπλισμού, τα μέτρα ελέγχου ρηγμάτωσης και η εφαρμογή των μέτρων που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για προστασία από την διάβρωση είναι μερικοί από τους παράγοντες που βοηθούν στον έλεγχο της έναρξης και της ταχύτητας της διάβρωσης.

2. Ποιος ο μηχανισμός διάβρωσης;

- Η διάβρωση του χάλυβα στο σκυρόδεμα είναι μια ηλεκτροχημική διεργασία που μεταφέρει ηλεκτρόνια από ένα στοιχείο σε ένα άλλο. Από τη μία, η παραγωγή e^- (άνοδος, οξείδωση σιδήρου, δημιουργία ιόντων σιδήρου) και από την άλλη, η κατανάλωση e^- (κάθοδος, μείωση οξυγόνου για την παραγωγή $(OH)^-$). Η ανοδική αντίδραση δημιουργεί οξείδωση σιδήρου ή διάλυση του σιδήρου και η καθοδική αντίδραση παράγει υδροξύλια. Το ποια από αυτές τις αντιδράσεις θα συμβεί σε κάθε ένα στοιχείο (σημείο) του οπλισμού εξαρτάται από την διαθεσιμότητα του οξυγόνου και από την τιμή του pH στο νερό των πόρων της τσιμεντόπαστας, στην περιοχή γύρω από το χάλυβα.

- Στο υγιές σκυρόδεμα που έχει pH: 13,0 δημιουργούνται στην άνοδο οξείδια και υδροξείδια του σιδήρου που επικάθονται πάνω στον οπλισμό σαν στερεές φάσεις και αναπτύσσουν ένα προστατευτικό φιλμ (παθητικό στρώμα – passive layer). Αν όμως μειωθεί το pH π.χ. από ενανθράκωση, αυτά τα οξείδια δεν σχηματίζουν προστατευτικό στρώμα και μπορεί να αρχίσει η ενεργός διάλυση.

- Το παθητικό φιλμ οξειδίων μπορεί να είναι ικανού πάχους και να εμποδίζει την ενεργή διάβρωση, δημιουργώντας ένα φραγμό στην αντίδραση των προϊόντων δηλαδή του Fe και του O_2. Στην πράξη το προστατευτικό φιλμ δε σταματάει τη διάβρωση, απλά μειώνει την ταχύτητα διάβρωσης. Έτσι, η ταχύτητα αυτή αρχίζει από 0,1μm/έτος, αλλά χωρίς προστατευτικό φιλμ η ταχύτητα πολλαπλασιάζεται περίπου κατά 3 τάξεις μεγέθους εν σχέσει προς την αρχική.

3. Πώς αρχίζει η διάβρωση;

- **Εισαγωγή χλωριόντων στο σκυρόδεμα κατά τη φάση της ανάμιξής του** - Η χρήση του χλωριούχου ασβεστίου ($CaCl_2$) ως επιταχυντή πήξης για το σκυρόδεμα ταυτοποιείται ως η πλέον συνήθης και εκ προθέσεως χορηγούμενη πηγή χλωριόντων ειδικά σε παλαιότερες κατασκευές. Έχοντας, πλέον, γνώση του ρόλου των χλωριόντων στην προώθηση της διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού στο σκυρόδεμα, η χρήση προσμίκτων περιέχοντα χλωριόντα σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος αντενδείκνυται και συχνά απαγορεύεται. Όταν εισέρχονται χλωριόντα στο νωπό ανάμιγμα σκυροδέματος (είτε εκ προθέσεως είτε όχι) μπορεί να λάβει χώρα ταχεία διάβρωση στα πρώιμα στάδια μετά την παραγωγή του, όταν το σκυρόδεμα είναι ακόμα νωπό, σε πλαστική μορφή και η αλκαλικότητα του διαλύματος στους πόρους του δεν έχει ακόμα αναπτυχθεί επαρκώς. Όταν το σκυρόδεμα περάσει στη φάση σκλήρυνσής του και το pH έχει αυξηθεί, παρατηρείται μία μείωση του ρυθμού διάβρωσης, εξαρτώμενη από τη συγκέντρωση των χλωριόντων.

  Η προσθήκη χλωριόντων στο ανάμιγμα σκυροδέματος έχει τρεις πρόσθετες επιπτώσεις στο (δευτερογενή) ρυθμό διάβρωσης. Πρώτον, έχει παρατηρηθεί ότι η επιταχυντική δράση

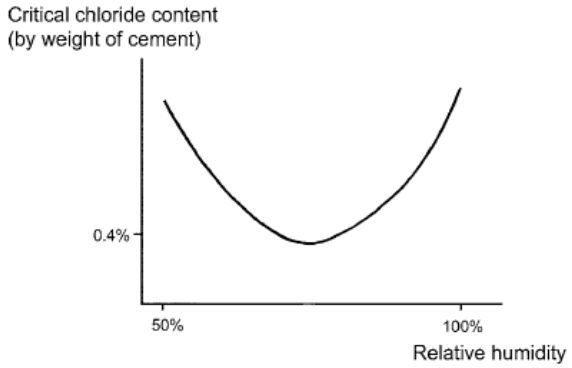
των χλωριόντων στη διάβρωση (κατά τα πρώιμα στάδια μετά την παραγωγή του σκυροδέματος) έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας πιο αδρής κατανομής του μεγέθους των τριχοειδών πόρων για τον ίδιο λόγο νερό προς τσιμέντο, κάτι που επιτρέπει την ταχύτερη διείσδυση πρόσθετων χλωριόντων, ταχύτερους ρυθμούς ενανθράκωσης, και τη μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης του σκυροδέματος. Δεύτερον, τα χλωριόντα αυξάνουν τη συγκέντρωση ιόντων στο διάλυμα των πόρων και, επομένως, την ηλεκτρική του αγωγιμότητα. Και οι δύο αυτοί παράγοντες οδηγούν σε αύξηση του ρυθμού διάβρωσης. Τρίτον, τα χλωριόντα μεταβάλλουν το pH του υδατικού διαλύματος των πόρων: το χλωριούχο νάτριο (NaCl) και το χλωριούχο κάλιο (KCl) αυξάνουν το pH, ενώ το χλωριούχο ασβέστιο ($CaCl_2$), σε μεγάλες συγκεντρώσεις, μειώνει το pH. Η μεταβολή του pH επηρεάζει τόσο τη δυναμική των χλωριόντων να δεσμεύονται χημικά από συστατικά του τσιμέντου όσο και το ελάχιστο όριο της συγκέντρωσης χλωριόντων (κατώφλι) ικανό για την έναρξη της διάβρωσης.

- **Διάχυση χλωριόντων στη μάζα του (σκληρυμένου) σκυροδέματος** - Διάχυση χλωριόντων εντός της μάζας του (σκληρυμένου) σκυροδέματος μπορεί να συμβεί ακόμα και σε υγιή στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος διαμέσου του συστήματος των πόρων του. Επομένως, δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη ρωγμών στο σκυρόδεμα για τη μεταφορά χλωριόντων στο χαλύβδινο οπλισμό. Ο ρυθμός της διάχυσης χλωριόντων εξαρτάται από πλείστες παραμέτρους, όπως το λόγο νερό προς τσιμέντο, τον τύπο του τσιμέντου, το είδος του δεσμευμένου με το χλώριο κατιόντος, τη θερμοκρασία και το βαθμό ωρίμανσης του σκυροδέματος. Επιπλέον, υπάρχουν ενδείξεις ότι τα διαχεόμενα στο σκυρόδεμα χλωριόντα αντιδρούν χημικώς με τον τσιμεντοπολτό παράγοντας προϊόντα τα οποία μειώνουν το πορώδες του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού (δηλ. επιφέρουν το αντίθετο αποτέλεσμα ως προς το πορώδες, σε σύγκριση με τα χλωριόντα τα οποία εισέρχονται στο σκυρόδεμα κατά τη φάση της ανάμιξής του).

- **Δέσμευση χλωριόντων και ελάχιστο όριο συγκέντρωσης χλωριόντων ικανό για την έναρξη της διάβρωσης** - Στη διάβρωση του χάλυβα εντός του σκυροδέματος δεν συνεισφέρουν όλα τα χλωριόντα. Κάποια από αυτά αντιδρούν χημικώς με συστατικά του τσιμέντου, όπως τα αργιλικά άλατα ασβεστίου, σχηματίζοντας χλωροαργιλικά ασβέστια και με αυτόν τον τρόπο αφαιρούνται από το διάλυμα των πόρων. Καθώς το σκυρόδεμα ενανθρακώνεται, τα χλωριόντα απελευθερώνονται και εμπλέκονται εκ νέου στο μηχανισμό διάβρωσης. Επίσης, έρευνες έχουν δείξει ότι κάποια χλωριόντα παγιδεύονται με φυσικό (μηχανικό) τρόπο, είτε μέσω απορρόφησης είτε μέσα σε αλληλοσυνδεόμενους πόρους. Το ποσοστό των ελεύθερων χλωριόντων στο διάλυμα των πόρων που είναι ικανά να προκαλέσουν αποπαθητικοποίηση του χάλυβα είναι συνάρτηση ενός πλήθους παραμέτρων, όπως: η περιεκτικότητα του τσιμέντου (ή γενικότερα, της συνδετικής κονίας) σε αργιλικό τριασβέστιο (C_3A) και αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο (C_4AF), το pH και ο τρόπος εισαγωγής των χλωριόντων στο σκυρόδεμα (εισερχόμενα κατά την ανάμιξη ή διαχεόμενα στο σκληρυμένο σκυρόδεμα). Το ελάχιστο όριο της συγκέντρωσης χλωριόντων ικανό για την έναρξη της διάβρωσης [1] εξαρτάται επίσης, από τις προαναφερθείσες παραμέτρους, με τη διαφορά ότι αυτές έχουν ορισμένες φορές, αντιθετική δράση. Για παράδειγμα, όσο μεγαλύτερο το pH του σκυροδέματος, τόσο περισσότερα χλωριόντα μπορεί να «ανεχθεί» ο χάλυβας δίχως να υφίσταται διάβρωση κατά βελονισμό. Την ίδια στιγμή όμως, η ποσότητα των χλωριόντων στο διάλυμα των πόρων για μία συγκεκριμένη συνολική περιεκτικότητα σε χλωριόντα αυξάνεται με την αύξηση του pH. Άλλες παράμετροι που επηρεάζουν το ελάχιστο όριο της συγκέντρωσης χλωριόντων ικανό για την έναρξη της διάβρωσης, είναι η συγκέντρωση των ιόντων υδροξυλίου αλλά και ο λόγος της συγκέντρωσης των χλωριόντων προς τη συγκέντρωση

[1] Συγκεντρώσεις μικρότερες από την ελάχιστη δεν οδηγούν σε σημαντική διάβρωση.

των ιόντων υδροξυλίου[1], ο λόγος νερού προς τσιμέντο (ή, γενικότερα, συνδετική κονία), η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και το ηλεκτρικό δυναμικό του χαλύβδινου οπλισμού.



Σχήμα 3.1. Τυπική κρίσιμη περιεκτικότητα σε χλωριόντα για καλής ποιότητας μη ενανθρακωμένο σκυρόδεμα, συναρτήσει της σχετικής υγρασίας. Για υποδεέστερης ποιότητας σκυρόδεμα ή ενανθρακωμένο σκυρόδεμα η καμπύλη μετατοπίζεται προς τα επάνω.

- **Έναρξη διάβρωσης λόγω ενανθράκωσης** - Η ικανότητα αερίων να διεισδύουν στο σκυρόδεμα είναι μεγαλύτερη υπό χαμηλές σχετικές υγρασίες περιβάλλοντος. Όμως, καθώς η ενανθράκωση ως χημική αντίδραση λαμβάνει χώρα στο διάλυμα των πόρων, ευνοείται από υψηλά επίπεδα υγρασίας στο σκυρόδεμα. Κατά συνέπεια, το πιο επιθετικό περιβάλλον για το σκυρόδεμα από πλευράς κινδύνου μείωσης του pH του είναι εκείνο στο οποίο σημειώνονται εναλλαγές του επιπέδου υγρασίας υπό υψηλές θερμοκρασίες. Υπό σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες, μία σχετική υγρασία της τάξης του 60% αποτελεί τον πλέον ευνοϊκό για την ενανθράκωση παράγοντα (Σχήμα 3.1). Υπάρχουν τρεις άλλες παράμετροι οι οποίες επισπεύδουν την έναρξη της διάβρωσης του (ενσωματωμένου στο σκυρόδεμα) χάλυβα, λόγω ενανθράκωσης: το μικρό πάχος επικάλυψης, η ύπαρξη ρηγματώσεων και το υψηλό πορώδες του σκυροδέματος, το οποίο σχετίζεται με χαμηλές περιεκτικότητες σε τσιμέντο και σε υψηλούς λόγους νερό προς τσιμέντο.

- **Συνδυαστική δράση ενανθράκωσης και χλωριόντων** - Η ενανθράκωση επιταχύνει σε μεγάλο βαθμό τη δράση των χλωριόντων: Το $Ca(OH)_2$ του τσιμεντοπολτού αντιδρά με τα χλωριόντα και τα δεσμεύει, περιορίζοντας έτσι την ποσότητα που διαχέεται προς τον οπλισμό κάτω του 0.4% περίπου που θεωρείται ότι απαιτείται για την καταστροφή του προστατευτικού φιλμ. Με την αντίδραση όμως του $Ca(OH)_2$ κατά την ενανθράκωση τα δεσμευμένα χλωριόντα απελευθερώνονται προσβάλλοντας έτσι το χάλυβα.

- **Ρυθμός διάβρωσης μετά την έναρξή του** –Η απώλεια υγρασίας από το σκυρόδεμα προϋποθέτει τη μεταφορά υδρατμών από το εσωτερικό του στοιχείου προς την εξωτερική του επιφάνεια και την επακόλουθη εξάτμισή του. Η ύγρανση ξηρού σκυροδέματος πραγματοποιείται μέσω τριχοειδούς αναρρόφησης, μία σημαντικά ταχύτερη διαδικασία σε σύγκριση με εκείνη που ευθύνεται για την απώλεια υγρασίας από τη μάζα του. Επομένως, στην πράξη, το στοιχεία σκυροδέματος σπανίως βρίσκονται σε απολύτως ξηρά κατάσταση, εκτός από μία λεπτή στρώση στην επιφάνειά τους. Κάτω από τη στρώση αυτή, συνήθως, τα τοιχώματα των τριχοειδών πόρων καλύπτονται από ένα υμένιο υγρασίας και οι στενώσεις των πόρων είναι κορεσμένοι. Επειδή η διάχυση του διαλυμένου στο νερό οξυγόνου είναι περίπου κατά τέσσερις τάξεις μεγέθους βραδύτερη από εκείνη του οξυγόνου σε αέρια μορφή, η διάχυση του διαλυμένου στο νερό οξυγόνου διαμέσω

[1] Η μέγιστη ανεκτή τιμή του λόγου αυτού (έτσι ώστε ο χαλύβδινος οπλισμός να παραμένει παθητικοποιημένος) είναι ίση με 0.29 για pH 12.6 και 0.30 για pH 13.3.

των στενώσεων των πόρων καθίσταται ο ρυθμιστής της ταχύτητας με την οποία εξελίσσεται η διάβρωση υπό συνήθεις τιμές της σχετικής υγρασίας.

Εργαστηριακές μελέτες καταδεικνύουν ότι υπάρχει ένα κρίσιμο εύρος τιμών της σχετικής υγρασίας στο σκυρόδεμα (μεταξύ 70% και 85%) κάτω από το οποίο δεν μπορεί να λάβει χώρα ενεργός διάβρωση του χάλυβα. Παρόμοια, υψηλή ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος μπορεί να αναχαιτίσει τη ροή ιόντων εντός της μάζας του (κάτι πολύ σημαντικό σε περιπτώσεις διάβρωσης με απομακρυσμένες ανοδικές και καθοδικές περιοχές (μακροκελλία) – macrocell corrosion).

Πλήρως εμβυθισμένες κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος σε θαλασσινό νερό προστατεύονται έναντι διάβρωσης εξαιτίας της απουσίας ελεύθερου οξυγόνου. Επομένως, παρά τη διαρκή έκθεσή τους σε περιβάλλον με υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων, οι υποβρύχιες κατασκευές είναι πιθανό να μη παρουσιάζουν σημαντική διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού τους. Τμήματα κατασκευών στη ζώνη διαβροχής (splash zone), ωστόσο, υπόκεινται σε ιδιαιτέρως επιθετικές δράσεις, καθώς είναι περιοδικώς διαβρεχόμενες με νερό υψηλής συγκέντρωσης σε άλατα και γειτνιάζουν με υπερκείμενες (μη διαβρεχόμενες) περιοχές της κατασκευής, δημιουργώντας έτσι ευνοϊκές συνθήκες για τη δημιουργία μακροκελλίων.

4. Υπάρχουν οπλισμοί προστατευμένοι από τη διάβρωση;

- Όταν στο σκυρόδεμα δημιουργηθούν συνθήκες υψηλής αλκαλικότητας (υψηλό pH περί του 13) δημιουργείται ένα στρώμα προστασίας του χάλυβα οπλισμού έναντι διάβρωσης. Η παραπάνω προστατευτική στρώση καταστρέφεται είτε με την ενανθράκωση του σκυροδέματος είτε με την παρουσία χλωριόντων, διεργασίες οι οποίες τελικά προκαλούν την οξείδωση των ράβδων οπλισμού.

  Υπό συγκεκριμένες συνθήκες οι συνήθεις ράβδοι σκυροδέματος είναι ευάλωτες σε οξείδωση και για τον λόγο αυτό εφαρμόζονται μέθοδοι οι οποίες στοχεύουν κυρίως στην διαμόρφωση κατάλληλων συνθηκών στο περιβάλλον των ράβδων ώστε να καθυστερήσουν το φαινόμενο.

  Πλέον των ανωτέρω, υπάρχουν και ειδικές κατηγορίες ράβδων οπλισμού που παρουσιάζουν υψηλή αντοχή έναντι διάβρωσης, έτσι όπως περιγράφονται στο κυρίως κείμενο της Οδηγίας αυτής, στο αντίστοιχο Κεφάλαιο.

4.1 Ανοξείδωτες Ράβδοι - (stainless steel bars)

Χαρακτηριστικό των ανοξείδωτων χαλύβων είναι ότι μπορούν να διαμορφωθούν και να συγκολληθούν στο εργοτάξιο, ενώ είναι ιδιαίτερα ανθεκτικοί σε χάραξη.

Γενικά ο ανοξείδωτος χάλυβας χρησιμοποιείται μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις (π.χ. σε συνδέσεις αρμών) λόγω του μεγάλου κόστους.

4.2 Ράβδοι με εποξεική επικάλυψη (epoxy coated bars)

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η επικάλυψη είναι ιδιαίτερα ευάλωτη και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή κατά την **αποθήκευση**, τη **μεταφορά** και την **τοποθέτηση**.

Για την **αποθήκευση** των επικαλυμμένων ράβδων πρέπει να χρησιμοποιούνται ειδικά διαμορφωμένοι χώροι και να στοιβάζονται σε ξύλινες επιφάνειες.

Κατά τη **μεταφορά** θα πρέπει οι ράβδοι να μη αναπτύσσουν μεγάλα βέλη κάμψης τα οποία μπορούν να καταστρέψουν την επικάλυψη. Δεν θα πρέπει οι ράβδοι να δένονται με σύρματα, καλώδια, άλλες ράβδους ή αλυσίδες.

Κατά την **τοποθέτηση** οι ράβδοι δεν θα πρέπει να σύρονται ενώ συνιστάται να χρησιμοποιείται και επικαλυμμένο σύρμα για το δέσιμο. Τυχόν κοπές των ράβδων θα γίνονται με χρήση τροχού και όχι με φλόγιστρο.

Κατά τη συμπύκνωση η κεφαλή του δονητή μάζας θα πρέπει να είναι επικαλυμμένη με πλαστικό και γενικά θα πρέπει να ελαχιστοποιείται η κίνηση πάνω από τις τοποθετημένες ράβδους.

4.3 Ράβδοι από ινοπλισμένα πολυμερή ΙΟΠ (Fiber Reinforced Polymer - FRP)

Οι ράβδοι από ΙΟΠ αντιμετωπίζονται όπως και οι επικαλυμμένες ράβδοι όσον αφορά την αποθήκευση, την μεταφορά και την τοποθέτηση.

Η κάμψη των ράβδων από πολυμερή οπλισμένων με ίνες θα πρέπει να γίνεται στο εργοστάσιο πριν την πήξη του υλικού. Το γεγονός αυτό δημιουργεί σοβαρή κατασκευαστική δυσκολία αφού δεν μπορούν να γίνουν εργασίες διαμόρφωσης στο εργοτάξιο.

5. Προστατεύεται ο οπλισμός από το περιβάλλον σκυρόδεμα;

---

6. Πώς ταξινομούνται τα διάφορα διαβρωτικά περιβάλλοντα;

---

7. Ποιες είναι οι μέθοδοι ταυτοποίησης του διαβρωτικού περιβάλλοντος και της βέλτιστης επιλογής επέμβασης μιας κατασκευής;

7.1 Αρχική επιλογή μιας τεχνικά εφικτής και οικονομικά αποδεκτής λύσης επέμβασης

7.1.3 Λεπτομερής αποτύπωση της κατάστασης του δομήματος

Μεταξύ των διαφόρων μεθόδων περιλαμβάνονται και οι παρακάτω:

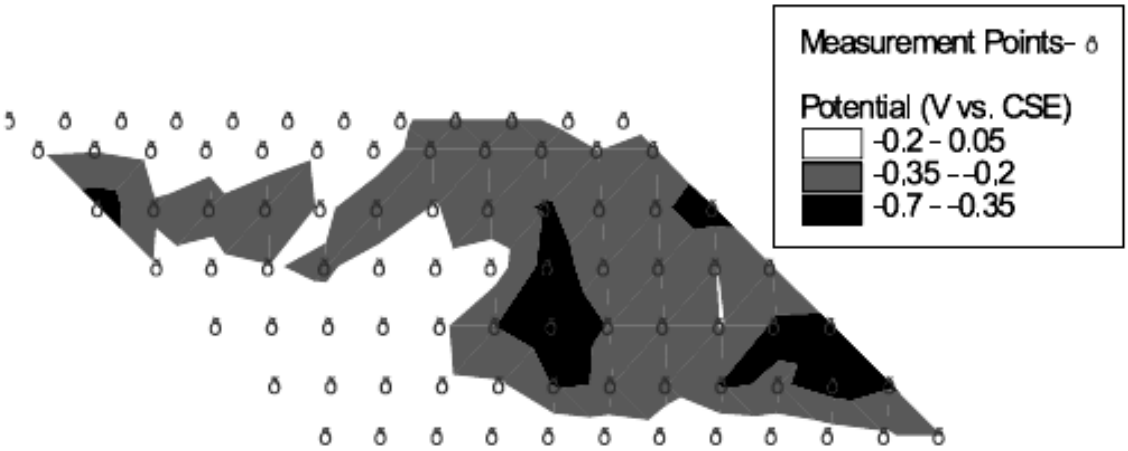
<u>α) Μέθοδοι αποτίμησης του βαθμού διάβρωσης του οπλισμού</u>

- Οπτική εξέταση
- Αποτύπωση αποφλοιώσεων
- Μέτρηση της επικάλυψης του οπλισμού με υπερήχους, ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους ή ραντάρ.
- Ανάλυση περιεχομένων χλωριόντων (κατά EN 14629)
- Δοκιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας
- Δοκιμή διαφοράς δυναμικού και χαρτογράφηση ισοϋψών καμπυλών του δυναμικού στο φορέα (ASTM C876) (Εικ. 7.1 και 7.3)
- Μέτρηση του βάθους ενανθράκωσης (EN 14630) (Εικ. 7.2)
- Ηλεκτροχημικές μέθοδοι μέτρησης του ρυθμού διάβρωσης υπό διαφορική (perturbative) φόρτιση (μέτρηση της αντίστασης γραμμικής πόλωσης, μέτρηση της παροδικής απόκρισης υπό γαλβανοστατικό παλμό Galvanostatic pulse transient response measurement)

- Μέτρηση της απώλειας διατομής του οπλισμού

Εικ. 7.1 Πυρηνοληψία και δοκιμή διαφοράς δυναμικού μεταξύ σκυροδέματος και του εκτεθειμένου οπλισμού.

Εικ. 7.2 Δοκιμή ενανθράκωσης σε πυρήνα στο πεδίο και ένδειξη έναρξης επιφανειακής διάβρωσης του οπλισμού (διάμετρος πυρήνα Φ100, επικάλυψη οπλισμού 60mm, ηλικία σκυροδέματος ~ 35 έτη).



Εικ. 7.3 Χαρτογράφηση ισοϋψών καμπυλών του δυναμικού σε κατάστρωμα γέφυρας (Sharp S., Nondestructive Evaluation of Epoxy-Coated Reinforcing Bars In Concrete Using Bi-Electrode Half-Cell Potential Techniques, Rep. VTRC 06-R24, Virginia Transportation Research Council, 2006.)

<u>β) Μέθοδοι αποτίμησης του σκυροδέματος</u>

- Οπτική εξέταση
- Πυρηνοληψία και μέτρηση της θλιπτικής αντοχής πυρήνα στο εργαστήριο
- Έμμεση μέτρηση της θλιπτικής αντοχής στο πεδίο (π.χ. κρουσίμετρο, εξολκέας)[1]
- Δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων
- Μέτρηση περιεχόμενης υγρασίας (εργαστηριακά ή στο πεδίο)
- Δοκιμή υδατοπερατότητας
- Δοκιμή υδαταπορρόφησης

[1] Καλό είναι να γίνεται σε συνδυασμό με πυρηνοληψία για βαθμονόμηση.

- Πετρογραφική ανάλυση
- Δοκιμή ηλεκτρικής αντίστασης της επιφάνειας του σκυροδέματος
- Εργαστηριακή μέτρηση της περιεκτικότητας χλωριόντων μέσα στη μάζα

8. Ποιες μέθοδοι υπάρχουν για αξιολόγηση της διάβρωσης;

Οι λεπτομέρειες των μεθόδων για την αξιολόγηση της διάβρωσης που αναφέρονται παρακάτω αφορούν κυρίως κατασκευές από σκυρόδεμα με μη προεντεταμένους οπλισμούς, αν και γίνεται επίσης μια πιο περιορισμένη αναφορά στο προεντεταμένο σκυρόδεμα.

8.1 Οπλισμένο σκυρόδεμα (μη προεντεταμένο)

2) Διερεύνηση διαχωρισμού/ αποφλοιώσεων (delamination):
Η απλούστερη μέθοδος είναι η ακουστική μέθοδος (μέθοδος: ASTM C4580) που περιλαμβάνει χτυπήματα επί της επιφανείας με κοινό σφυρί και συγκριτική αξιολόγηση της ηχητικής απόκρισης με το γειτονικό σκυρόδεμα και απαιτεί εμπειρία του χρήστη, αλλά και ήσυχο περιβάλλον. Πιο εξελιγμένη μορφή αυτής της μεθόδου αποτελεί η μέθοδος κρούσης-ηχούς (impact-echo, pulse-echo) (μέθοδος: ASTM C1383), κατά την οποία καταγράφονται τα κύματα που διατρέχουν το σκυρόδεμα μετά από κρούση αυτού με ειδικό σφυρί συγκεκριμένων προδιαγραφών. Η καταγραφή πραγματοποιείται με ειδικό επιταχυνσιόμετρο. Άλλη μέθοδο προσδιορισμού αποτελεί και η περισσότερο γνωστή και διαδεδομένη μέθοδος των υπερήχων (ultrasonic pulse velocity, UPV) (μέθοδοι: ASTM C597, EN 12504-4) που καταγράφει μέσω ειδικών κρυστάλλων υπερήχων (πομπού-δέκτη) το χρόνο διέλευσης των εκπεμπόμενων υπερήχων διαμέσου του σκυροδέματος και συγκριτική αποτίμηση με γειτονικές «υγιείς» περιοχές του σκυροδέματος. Άλλες μέθοδοι περιλαμβάνουν την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο του γεωραντάρ (ground penetrating radar, GPR) (μέθοδος: ASTM D6087), που είναι ανάλογη των ακουστικών μεθόδων με τη διαφορά ότι εξετάζει ηλεκτρομαγνητικά αντί τασικά κύματα (stress waves), ή τη θερμική μέθοδο της υπέρυθρης θερμογραφίας (infrared thermography) (μέθοδος: ASTM D4788) που βοηθά στον εντοπισμό αποφλοιώσεων μέσω της παρατήρησης της επιρροής των θερμοκρασιακών διαφορών μεταξύ αποφλοιωμένου και υγιούς σκυροδέματος.

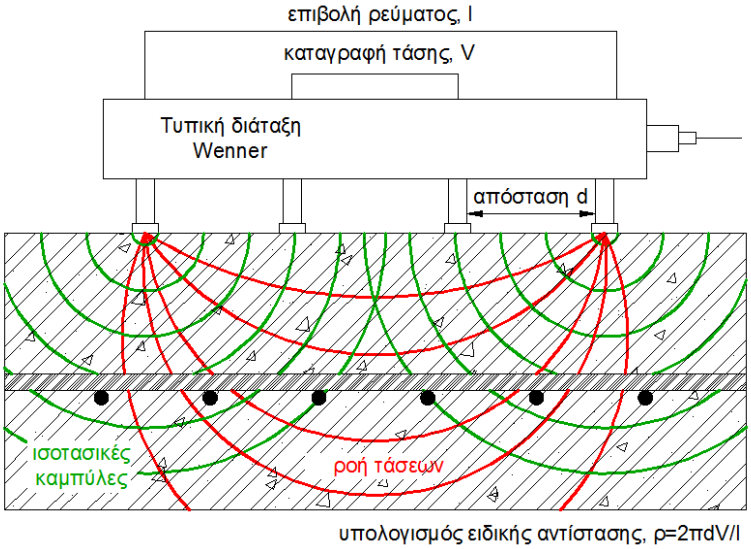
3) Μετρήσεις του πάχους επικάλυψης (cover depth):
Τα όργανα μετρήσεων που συνήθως χρησιμοποιούνται βασίζονται σε μαγνητικές μεθόδους και είναι γνωστά ως παχόμετρα. Εναλλακτικώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος του γεωραντάρ (ground penetrating radar, GPR) (μέθοδος: ASTM D6087). Για τη βαθμονόμηση των παραπάνω οργάνων απαιτείται, κατά προτίμηση, τοπική αποκάλυψη του οπλισμού για τη μέτρηση του πραγματικού πάχους και τη συσχέτιση αυτού με τις ενδείξεις του οργάνου, αλλά και διακρίβωση της διαμέτρου των οπλισμών, εάν αυτή δεν είναι ήδη γνωστή από τα κατασκευαστικά σχέδια ή είναι αμφίβολη (δηλαδή όπου δεν είναι σαφές αν τα διαθέσιμα σχέδια τηρήθηκαν πιστά). Πάντως, πρέπει να σημειωθεί ότι οι έμμεσες μέθοδοι προσδιορισμού, αν και σχετικά ακριβείς, επηρεάζονται από την πυκνότητα του οπλισμού, το βάθος εγκιβωτισμού του στο σκυρόδεμα εν σχέσει προς τη διεισδυτική ικανότητα του οργάνου, αλλά και από τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος (π.χ. υγρασία, πορώδες, μαγνητικές ιδιότητες αδρανών, κ.λπ.). Όλα τα παραπάνω θα πρέπει να αποτελούν παραμέτρους που θα εκτιμώνται και θα καταγράφονται, με σκοπό την καλύτερη αξιολόγηση οποιωνδήποτε μετρήσεων της επικάλυψης.

4) Ανάλυση περιεκτικότητας σε χλωριόντα (chloride-ion concentration):
Η δειγματοληψία συνίσταται στη συλλογή σκόνης σκυροδέματος σε διάφορα βάθη από την επιφάνεια έως και πέραν της στάθμης του οπλισμού, με κατάλληλη προσοχή ώστε να μην

αναμιγνύεται σκόνη από διαφορετικά βάθη και πραγματοποιείται με χρήση τρυπανιού. Εναλλακτικά, μπορούν να ληφθούν πυρήνες σκυροδέματος (συνήθως) μικρής διαμέτρου, οι οποίοι στη συνέχεια θρυμματίζονται στο εργαστήριο κατά βάθος, με περισσότερο ελεγχόμενες μεθόδους. Η συλλεχθείσα σκόνη υποβάλλεται σε χημική ανάλυση (μέθοδοι: AASHTO T260, ASTM C1152, ASTM C1218, BS 1881-124) για τον προσδιορισμό των υδατοδιαλυτών και χημικώς διαλυτών χλωριόντων. Σημειώνεται ότι σε κάποιες από τις μεθόδους μετράται η συνολική περιεκτικότητα σε χλωριόντα, περιλαμβανομένων δηλαδή των ιόντων χλωρίου που προϋπήρχαν στα συστατικά του σκυροδέματος, καθώς αυτά αποδεσμεύονται χημικώς κατά τη διενέργεια των σχετικών χημικών αντιδράσεων και τα οποία υπό πραγματικές συνθήκες δε συμβάλλουν απαραιτήτως στη διάβρωση των οπλισμών (επομένως η μέτρηση μπορεί να είναι παραπλανητική και περισσότερο συντηρητική). Πέραν των εργαστηριακών μεθόδων, έχουν πάντως αναπτυχθεί και μέθοδοι επιτόπου προσδιορισμού της περιεκτικότητας των χλωριόντων, οι οποίες πάντως ενέχουν μεγαλύτερη πιθανότητα σφάλματος, απαιτούν διορθωτικούς συντελεστές και γενικώς δε συνίστανται χωρίς κατάλληλη βαθμονόμηση.

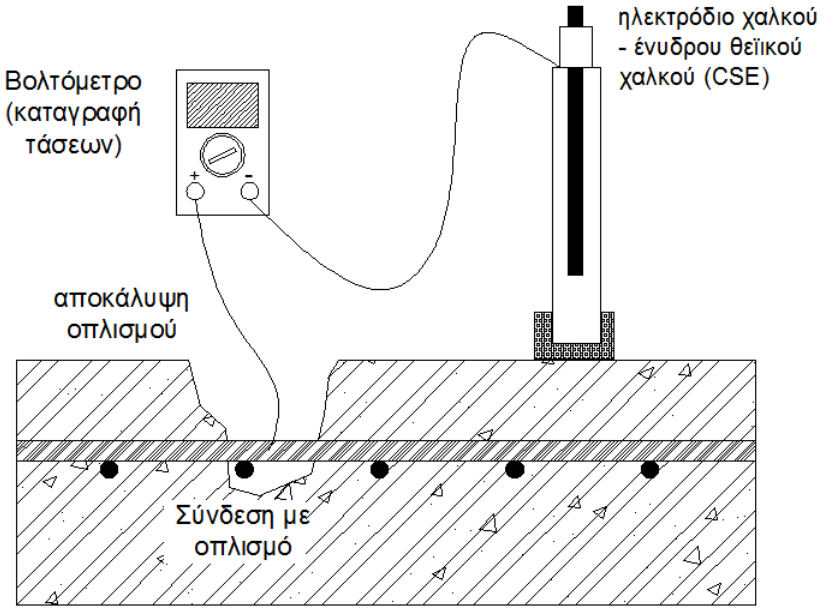
6*) Δοκιμή ηλεκτρικής συνέχειας (electrical continuity):*
Η διεξαγωγή της μεθόδου συνίσταται στην αποκάλυψη του χάλυβα οπλισμού και τη μέτρηση της αντίστασης συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος, της τάσης συνεχούς ρεύματος ή του δυναμικού εν σχέσει προς ένα δυναμικό αναφοράς. Πρέπει να σημειωθεί ότι καθεμία εκ των παραπάνω μεθόδων περιέχει κάποια πιθανότητα σφάλματος και ερμηνεύεται με διαφορετικό τρόπο. Για το λόγο αυτό, απαιτεί ιδιαίτερη εμπειρία του εκτιμητή.

7) Μετρήσεις υγρασίας και ειδικής αντίστασης (humidity, resistivity):
Η υγρασία του σκυροδέματος σχετίζεται με πολλούς μηχανισμούς υποβάθμισης, όπως η διάβρωση του οπλισμού, η αλκαλοπυριτική αντίδραση, η ψύξη/ απόψυξη και η προσβολή με θειικά, ενώ η ειδική αντίσταση του σκυροδέματος σχετίζεται κυρίως με το ρυθμό διάβρωσης. Η μέτρηση της υγρασίας γίνεται με ειδικά στελέχη διαφόρων υλικών και τύπων που εμπήγονται και σφραγίζονται σε οπές επί του σκυροδέματος και επιτρέπουν τη μέτρηση της σχετικής υγρασίας στην πάροδο του χρόνου. Η μέτρηση της ειδικής αντίστασης πραγματοποιείται με διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων, με γνωστότερη εκ των οποίων τη διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων Wenner (μέθοδος: ASTM G57, Εικόνα 14.1).



Εικόνα 8.1. Τυπική διάταξη τύπου Wenner για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης

8) Χαρτογράφηση δυναμικού διάβρωσης (corrosion potential):
Η χαρτογράφηση πραγματοποιείται συνήθως με φορητό ηλεκτρόδιο χαλκού – ένυδρου θειικού χαλκού (CSE) (Εικόνα 14.2), πάνω στο οποίο προσαρμόζεται νωπός σπόγγος για τη μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης μεταξύ της επιφάνειας σκυροδέματος και του ηλεκτροδίου και η καταγραφή των μετρήσεων πραγματοποιείται με βολτόμετρο (μέθοδος: ASTM C876). Το σημείο επαφής γίνεται σε κάποια αποκαλυμμένη ράβδο οπλισμού και για τη σωστή καταγραφή απαιτείται να υπάρχει ηλεκτρική συνέχεια των οπλισμών, διαφορετικά πρέπει να προσδιορίζονται νέα σημεία επαφής. Η πυκνότητα των μετρήσεων αποφασίζεται κατά περίπτωση: για μεγαλύτερες περιοχές ελέγχου οι καταγραφές πραγματοποιούνται σε κάναβο 0,6-1,5μ, ενώ για μικρότερες περιοχές ο κάναβος είναι πυκνότερος 0,15-0,3μ.



Εικόνα 8.2. Τυπική διάταξη χαρτογράφησης δυναμικού διάβρωσης

Περιοχές με πολύ υψηλές αρνητικές τιμές δυναμικού αποτελούν ενεργές περιοχές διάβρωσης. Ενδεικτικώς, αναφέρεται ότι τιμές δυναμικού πιο θετικές από -0.20 V CSE υποδεικνύουν υψηλή πιθανότητα (>90%) να μην υπάρχει διάβρωση στην υπό έλεγχο περιοχή, ενώ τιμές πιο αρνητικές από -0.35 V CSE υποδεικνύουν υψηλή πιθανότητα (>90%) να υπάρχει διάβρωση στην υπό έλεγχο περιοχή. Στο εύρος τιμών μεταξύ των δύο παραπάνω ορίων υπάρχει αβεβαιότητα ως προς την ορθή ερμηνεία των αποτελεσμάτων και απαιτείται εμπειρία και πολυεπίπεδη διερεύνηση, με παράλληλη χρήση και άλλων μεθόδων (περιλαμβανομένων των αποκαλύψεων οπλισμών). Σημειώνεται ότι τα παραπάνω όρια είναι ενδεικτικά και όχι περιοριστικά/ κανονιστικά.

9. Ποιες μέθοδοι υπάρχουν για αξιολόγηση του σκυροδέματος;

- Για την αξιολόγηση του σκυροδέματος περιγράφεται στη συνέχεια σειρά δοκιμών.

1) Αποτίμηση της θλιπτικής αντοχής με πυρηνοληψία:
Οι πυρήνες λαμβάνονται απευθείας από την κατασκευή, αριθμούνται και φωτογραφίζονται, σημειώνοντας τη φορά εξαγωγής τους. Συνοδεύονται από περιγραφή η οποία περιλαμβάνει τη γενική τους κατάσταση καθώς και την παρουσία ρωγμών και πόρων. Αναλυτικά στοιχεία για τον προγραμματισμό της πυρηνοληψίας (μέγεθος, πλήθος δοκιμίων, θέση λήψης, περιορισμοί της μεθόδου και άλλα) δίδονται στην έκδοση του ΤΕΕ με τίτλο «Μέθοδοι για την

επιτόπου αποτίμηση των χαρακτηριστικών των υλικών». Στη συγκεκριμένη έκδοση του ΤΕΕ συνοψίζονται και σχέσεις αναγωγής της αντοχής του πυρήνα σε (συμβατική/σχεδιαστική) αντοχή του κύβου.

Δεδομένου ότι η κατάσταση του σκυροδέματος αξιολογείται και μέσω των αυξομειώσεων που παρουσιάζονται στις τιμές της θλιπτικής αντοχής, οι τεχνικές έμμεσης μέτρησής της στο πεδίο με κρουσίμετρο ή εξολκέα μπορούν να δώσουν επί τόπου μια πρώτη απάντηση για το αν το σκυρόδεμα έχει υποστεί απομείωση των χαρακτηριστικών του ή όχι. Σημειώνεται πάντως, ότι οι έμμεσες τεχνικές γενικώς αφορούν στο επιφανειακό σκυρόδεμα και όχι στο σκυρόδεμα στον πυρήνα του εξεταζόμενου στοιχείου. Επισημαίνεται και πάλι ότι για βαθμονόμηση απαιτείται πυρηνοληψία και ότι οι κρουσιμετρήσεις (για τη βαθμονόμηση) πρέπει να γίνουν στις ίδιες θέσεις από τις οποίες θα ληφθούν οι πυρήνες.

2) Δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων (ηλεκτρικής αντίστασης της επιφάνειας του σκυροδέματος – Rapid Chloride Permeability Test – RCPT – ASTM C 1202)

Πρέπει να σημειωθεί ότι μίγματα σκυροδεμάτων που περιέχουν πρόσμικτα ανόργανων αλάτων, τα οποία αυξάνουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα, υπό αυτή τη δοκιμή εμφανίζουν το σκυρόδεμα ως πιο “διαπερατό”.

Επίσης, η εν λόγω δοκιμή δίνει τιμή διαπερατότητας χλωριόντων μόνο στο χρόνο εκτέλεσής της. Δηλαδή, σκυροδέματα που έχουν υποστεί γήρανση, μπορεί να παρουσιάζουν χαμηλό πορώδες όχι όμως κατ’ ανάγκη και περιορισμένη διαπερατότητα χλωριόντων!

Παρόλο που η δοκιμή αυτή και χαίρει ευρύτερης αποδοχής, σύγχρονες μελέτες εντοπίζουν εγγενείς αδυναμίες της δοκιμής λόγω των οποίων δεν δύναται να υπολογιστεί ποσοτικά και με ακρίβεια το πορώδες και η διαπερατότητα των δοκιμίων.

Επίσης προτείνονται οι δοκιμές διείσδυσης χλωριόντων βάσει ASTM C1543 και ASTM C1556. Για περισσότερη πληροφόρηση, στη βιβλιογραφία του κυρίως κειμένου της παρούσας οδηγίας (π.χ. 17.15).

3) Διάφοροι άλλοι εργαστηριακοί έλεγχοι (NDT μέθοδοι, πετρογραφική ανάλυση, χημική ανάλυση, κ.λπ.):

Για τον προσδιορισμό της αντίστασης της επιφάνειας σκυροδέματος η οποία έχει εκτεθεί σε κύκλους ψύξης και απόψυξης παρουσία αντιπαγωτικών αλάτων (salt scaling test) ακολουθούνται οι οδηγίες της δοκιμής ASTM C 672.

4) Μέτρηση περιεχόμενης υγρασίας (εργαστηριακά ή στο πεδίο):

Τόσο η θερμοκρασία όσο και η υγρασία επηρεάζουν το ρυθμό ενανθράκωσης του σκυροδέματος. Η μέτρηση της περιεχόμενης υγρασίας εκτελείται μετρώντας το βάρος του δοκιμίου ως έχει ($B_{\varphi\upsilon\sigma\iota\kappa\acute{o}}$), ξηραίνοντάς το σε φούρνο μέγιστης θερμοκρασίας 100°C (μέχρι σταθεροποίηση βάρους, μεταβολή <0.1% μεταξύ διαδοχικών ημερήσιων μετρήσεων) και ζυγίζοντάς το ξανά ($B_{\xi\eta\rho\acute{o}}$). Η περιεχόμενη υγρασία δίδεται από τον τύπο:

$$w = \frac{B_{\varphi\upsilon\sigma\iota\kappa\acute{o}} - B_{\xi\eta\rho\acute{o}}}{B_{\xi\eta\rho\acute{o}}} x\ 100\ \ [\%]$$

5) Επί τόπου έμμεσος προσδιορισμός υγρασίας μέσω μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης (Half Cell Potential):

Η μέθοδος Wenner στηρίζεται στην αρχή ότι μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας ενός υλικού προκαλεί και μεταβολή στην ηλεκτρική αντίσταση του υλικού και, επομένως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έμμεσο προσδιορισμό της υγρασίας. Ομοίως, σύμφωνα με το ASTM C 876, τοποθετώντας ηλεκτρόδια στην επιφάνεια του σκυροδέματος και συνδέοντάς τα με πηγή ηλεκτρικού ρεύματος και με βολτόμετρο, μπορούμε μετρώντας το δυναμικό που προκύπτει από την εφαρμογή ρεύματος να υπολογίσουμε την ειδική αντίσταση του

σκυροδέματος και βάσει αυτής να εξάγουμε (έμμεσα) συμπεράσματα για την περιεχόμενη υγρασία. Η μέθοδος περιορίζεται από την παρουσία οπλισμού.

- Οι προαναφερθείσες δοκιμές αφορούν στην πειραματική αποτίμηση της φθοράς από ενανθράκωση ή διείσδυση χλωριόντων (δοκιμές και εργαστηριακοί έλεγχοι). Τις τελευταίες δεκαετίες, όμως, έχουν προταθεί και αναλυτικά μοντέλα πρόβλεψης της φθοράς του σκυροδέματος σε δημοσιευμένες ερευνητικές εργασίες. Επομένως, στο σημείο αυτό, αξίζει να γίνει μία επιγραμματική αναφορά σε αυτά τα μοντέλα προκειμένου ο αναγνώστης που ενδιαφέρεται για το εν λόγω αντικείμενο να έχει κάποιο σημείο εκκίνησης.
  1. Πρόβλεψη βάθους ενανθράκωσης με χρήση μοντέλων διάχυσης CO_2 (CO_2 diffusion models) ή μέσω ποροσιμετρίας υδραργύρου και συσχέτισης με πορώδες [17.15] ή με χρήση νευρωνικών δικτύων [17.18].
  2. Πρόβλεψη ρυθμού διείσδυσης χλωριόντων, σταθεράς διάχυσης χλωριόντων και τριχοειδής προσρόφηση υγρασίας είτε μέσω μοντέλων διάχυσης (diffusion models) είτε μέσω μοντέλων απορρόφησης [17.15].

- Τέλος, προτείνεται και η επιταχυνόμενη μέθοδος προσομοίωσης της φθοράς του σκυροδέματος με έκθεση δοκιμίων σε θαλάμους ελεγχόμενης συγκέντρωσης CO_2 (accelerated carbonation test chamber) [17.19].

10. Πώς σχεδιάζουμε μια ανθεκτική σε διάβρωση κατασκευή;

---

11. Πώς επηρεάζει η διάβρωση τους οπλισμούς ανά τύπο κατασκευής;

---

12. Ποιες κατασκευαστικές πρακτικές ακολουθούμε για μια ανθεκτική κατασκευή;

- Ήδη στις προηγούμενες Τεχνικές Οδηγίες, αλλά και σε άλλα σημεία της παρούσας Τεχνικής Οδηγίας αναφέρονται ορθές κατασκευαστικές πρακτικές που αφορούν κυρίως:

  α) στο υλικό, στη σύνθεση, στην παραγωγή και μεταφορά του
  β) στην επεξεργασία του σκυροδέματος κατά τη διάστρωση και συμπύκνωσή του
  γ) στην προστασία του σκυροδέματος κατά τη συντήρησή του και του επαρκούς χρόνου που απαιτείται για την αφαίρεση των ξυλοτύπων

- Οι παραπάνω πρακτικές απεικονίζονται συνοπτικά και στο παρακάτω διάγραμμα: «Κατασκευαστικές πρακτικές στο σκυρόδεμα».

12.Κατασκευαστικές πρακτικές στο σκυρόδεμα

12.1 Ανάμιξη & Μεταφορά του σκυροδέματος

Προδιαγραφές

- ACI 301 -Προδιαγραφή-Structural Concrete
- ACI 304R -Ανάμιξη/Μεταφορά
- ASTM C94-'Ετοιμο σκυρόδεμα
- ASTM C494-Πρόσθετα σκυροδέματος

Τεχνικές απαιτήσεις

- Διαδικασία φόρτωσης των υλικών όταν N/T~0,30
- Χρήση υπερ-ρευστοποιητών, μειωτών νερού (HRWRA)
- Απόρριψη σκυροδέματος με χρόνο από φόρτωση > 90min (ή με προσθ. επιβραδυντικού σύμφωνα με ΚΤΣ>120min)

12.2 Διάστρωση σκυρ/τος και σιδηροπλισμός

Προδιαγραφές

- ACI 347 –Ξυλότυποι
- ACI 318-Διατάξεις για οπλισμό
- ACI 201-2R -Επικάλυψη οπλισμού
- ACI 306-R -Σκυροδέτηση σε χαμηλή θερμοκρασία
- ACI 305R -Σκυροδέτηση σε υψηλή θερμοκρασία
- ACI 304R –Κεφ.:5

Τεχνικές απαιτήσεις

- Διάστρωση με σιλό, σωλήνες, tremie pipes, προσοχή στο ύψος πτώσεως σε υψηλές κολώνες
- Χρήση υπερ-ρευστοποιητών, μειωτών νερού (HRWRA)
- Απόσταση ράβδων οπλισμού
- Πάχος στρώσεων<0,60m
- Ύψος πτώσεως<2,50m
- Προσοχή στους "ψυχρούς αρμούς"
- Προσοχή στα κενά και στις "σφηκοφωλιές" (honey-combing)
- Προσοχή στις καθυστερήσεις στην παράδοση

12.3 Συμπύκνωση Σκυροδέματος

Προδιαγραφές

- ACI 309R -Συμπύκνωση σκυροδέματος
- ACI 309.1R -Συμπεριφορά στη δόνηση
- ACI SP-96 - Αρχές δόνησης βλέπε και: Whiting et. al.(1987)

Τεχνικές απαιτήσεις

- Ορθή μελέτη σύνθεσης (ACI 211.1)
- Εργασιμότητα
- Εξοπλισμός/μέθοδοι συμπύκνωσης
- Συνιστώμενες πρακτικές
- HETEK Report:No 811997
- FFC/Ειδικές απαιτήσεις (ACI 303-Αρχιτεκτονικό σκυρόδεμα)

12.4 Επίδραση συντήρησης στη διάβρωση του οπλισμού

Προδιαγραφές

- ACI 308R -Συντήρηση σκυροδέματος
- ACI 305R -Σκυροδέτηση σε υψηλή θερμοκρασία
- ACI 306R -Σκυροδέτηση σε χαμηλή θερμοκρασία
- Υψηλή ηλεκτρική αντίσταση , αδιαπερατότητα σε νερό, χλωριόντα σε διάλυμα, οξυγόνο, CO_2
- Μείωση πορώδους και μείωση μεγέθους πόρων και βελτίωση κατανομής

Τεχνικές απαιτήσεις

- Θερμ.Αέρα>10°C
- Πλημμύρισμα, βύθιση σε νερό, υγρές λινάτσες, ψεκασμός υγρασίας/υδρατμών
- Ανεμοφράκτες, σκίαση, θερμαινόμενες κουβέρτες, θέρμανση/ψύξη νερού σκυροδέματος
- Μεμβράνες συντήρησης (Curing membranes)
- Μέτρα προστασίας

13. Ποια είναι η προστασία των κατασκευών από εξωτερικές πηγές Cl^-;

13.1 Υδατοστεγανές μεμβράνες

- Οι κύριες απαιτήσεις για ένα ιδανικό υδατοστεγανό σύστημα, αναφέρονται στο κυρίως κείμενο της Οδηγίας στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Ο αριθμός των βιομηχανικών προϊόντων που ικανοποιούν τις απαιτήσεις αυτές, καθιστά δύσκολη τη γενίκευση των υδατοστεγανών συστημάτων αν και μια χρήσιμη διάκρισή τους είναι ανάμεσα στα βιομηχανοποιημένα φύλλα και στα επαλειφόμενα υλικά. Τα βιομηχανοποιημένα φύλλα είναι συνήθως εργοστασιακής προέλευσης αλλά συχνά έχουν δυσκολία στην τοποθέτηση καθότι απαιτούνται ειδικά συγκολλητικά και είναι πολύ ευάλωτα καθώς εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα της εργασίας, ιδίως σε κρίσιμα σημεία της κατασκευής. Αν και τα επαλειφόμενα υλικά έχουν την ιδία δυσκολία στον έλεγχο της ποιότητας της εργασίας, παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευκολία στην τοποθέτηση και είναι πιο οικονομικά.
- Με δεδομένο τους διαφορετικούς τύπους και τις ποιότητες των υδατοστεγανών συστημάτων, το διαφορετικό βαθμό ποιοτικής εργασίας και το μεγάλο εύρος των εφαρμογών τους, δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι η αξιολόγηση των μεμβρανών τόσο σε εργαστηριακές όσο και σε επί τόπου του έργου συνθήκες όχι μόνον διαφέρει αλλά μερικές φορές είναι και αντιφατική.
- Στις εργαστηριακές δοκιμές, τα βιομηχανοποιημένα φύλλα έχουν γενικώς καλύτερη επίδοση από τα επαλειφόμενα υλικά εφόσον εκεί η εργασία δεν θεωρείται κρίσιμος παράγοντας. Η διαπερατότητα που συνήθως προσδιορίζεται με μετρήσεις στην ηλεκτρική αντίσταση του υλικού, έχει γενικώς υιοθετηθεί ως το πλέον σημαντικό κριτήριο. Παρόλα αυτά, ορισμένες μεμβράνες προσφέρουν σημαντική αντίσταση στη διαπερατότητα από χλωριόντα και υγρασία, ακόμη και στην περίπτωση ύπαρξης διατρήσεων/φυσαλίδων (pinholes/bubbles).
- Η επίδοση του υλικού στο έργο δεν εξαρτάται μόνον από τον τύπο του υδατοστεγανού υλικού αλλά και από την ποιότητα της εργασίας τοποθέτησης, τις καιρικές συνθήκες, τις λεπτομέρειες σχεδίασης και το περιβάλλον λειτουργίας της κατασκευής. Έχουν καταγραφεί από ικανοποιητικές έως και αποτυχημένες συμπεριφορές που οδήγησαν στην πλήρη αποξήλωση των μεμβρανών.
- Η δημιουργία φυσαλίδων (blistering), που επηρεάζει και τα βιομηχανοποιημένα φύλλα και τα επαλειφόμενα υλικά, θεωρείται το μεγαλύτερο πρόβλημα στην εφαρμογή των υδατοστεγανών μεμβρανών. Προκαλείται από τη διαστολή εγκλωβισμένων αερίων, διαλυτών ή υγρασίας μέσα στο σκυρόδεμα μετά την τοποθέτηση των μεμβρανών. Ο ρυθμός που δημιουργούνται εξαρτάται από το πορώδες και την υγρασία του σκυροδέματος καθώς και από τις καιρικές συνθήκες. Η παρουσία νερού ή υδρατμών δεν είναι αναγκαία αλλά συχνά θεωρείται παράγοντας που συμβάλλει στο φαινόμενο. Φυσαλίδες μπορούν να εμφανισθούν και ως αποτέλεσμα της αύξησης της θερμοκρασίας του σκυροδέματος ή της πτώσης της ατμοσφαιρικής πίεσης κατά τη διάρκεια ή αμέσως μετά την εφαρμογή των μεμβρανών. Η γρήγορη διόγκωση των ατμών κατά τη διάρκεια της εφαρμογής ζεστών υλικών προκαλεί μερικές φορές το σχίσιμο της μεμβράνης με τη μορφή οπών.
- Η δημιουργία φυσαλίδων μπορεί να αποφευχθεί όταν οι καιρικές συνθήκες είναι κατάλληλες κατά τη περίοδο ωρίμανσης του υλικού. Μετά την ολοκλήρωση της περιόδου αυτής, η μεμβράνη έχει αναπτύξει ικανή πρόσφυση με το σκυρόδεμα ώστε να ανταπεξέλθει στη δημιουργία φυσαλίδων. Για τη διασφάλιση της ικανής πρόσφυσης, η επιφάνεια του σκυροδέματος πρέπει να είναι καλά προετοιμασμένη, ξηρή και απαλλαγμένη από υπολείμματα υλικών επιφανειακής συντήρησης (curing compounds),

τσιμεντόπλυμα και επιβλαβείς ουσίες όπως το λάδι. Στις περιπτώσεις όπου η μεμβράνη θα επικαλυφθεί με κάποια μόνωση, ο κίνδυνος εμφάνισης φυσαλίδων μπορεί να μειωθεί με επίσπευση του χρόνου μεταξύ τοποθέτησης μεμβράνης και επικάλυψης.

13.5. Επιστρώσεις από σκυρόδεμα τροποποιημένο με latex. Η ποσότητα του latex αντιστοιχεί περίπου στο 15% κατά βάρος του τσιμέντου. Το τροποποιημένο με latex σκυρόδεμα απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στη διάστρωσή του με υψηλές θερμοκρασίες λόγω γρήγορης ξήρανσης. Ο κίνδυνος εμφάνισης ρωγμών από εξίδρωση και πλαστική συστολή είναι αυξημένος. Η παγίδευση επιπλέον αέρα είναι ένα πρόβλημα που θα πρέπει να αποφεύγεται, γιατί οδηγεί στη μείωση των αντοχών και της συνάφειας. Ορισμένες προδιαγραφές έργων περιορίζουν τον περιεχόμενο αέρα στο 6.5%. Περισσότερες πληροφορίες για το σκυρόδεμα τροποποιημένο με latex δίνονται στα ACI 548.3R και ACI 548.4R.

14. Πως αξιολογείται μια κατασκευή έναντι ευαισθησίας σε διάβρωση (αξιολόγηση και εν λειτουργία);

14.1 Ως προς τη διαδικασία αποτίμησης της διάβρωσης οπλισμού λεπτομέρειες δίνονται τόσο στο κεφάλαιο 8 της παρούσης Οδηγίας όσο και στα ACI 365.1R και ACI 222R.

14.2 Η διαδικασία αποτίμησης κατάστασης συνεχίζεται με την ανάλυση των μετρήσεων πεδίου κι εργαστηρίου και την επιλογή των πιθανών παρεμβάσεων βάσει του εφικτού της πραγματοποίησής τους και της επιθυμητής διάρκειας ζωής-λειτουργίας.
Επόμενο στάδιο είναι η διεξαγωγή ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής (LCCA – Life-Cycle Cost Analysis), η οποία υπολογίζει τα τελικά κόστη των εναλλακτικών τεχνικών λύσεων και προχωράει στη σύγκρισή τους συναξιολογώντας και την αντιπαραβολή μεταξύ της αναμενόμενης διάρκειας ζωής της κάθε τεχνικής λύσης και της επιθυμητής διάρκειας λειτουργίας συνολικά της κατασκευής. Ως κόστος μιας παρέμβασης θεωρείται τόσο το κόστος αρχικής υλοποίησης όσο και το κόστος συντήρησης καθ' όλη τη χρονική περίοδο που έχει αποφασιστεί. Επομένως μια ανάλυση κόστους κύκλου ζωής αποτελεί μια μελέτη που θα συμπεριλάβει τόσο το οικονομικό όσο και το χρονικό στοιχείο προτού καταλήξει στην επιλογή της βέλτιστης παρέμβασης για την αποκατάσταση της προσβληθείσας κατασκευής.

15. Ποια τα συνήθη μέτρα προστασίας;

15.2 Επικαλύψεις και Επιχρίσματα:
α. Στις ευγενείς επικαλύψεις όπως του χαλκού και του νικελίου, μέταλλα με μεγαλύτερο δυναμικό διάβρωσης από το χάλυβα, η προστασία του χάλυβα διατηρείται όσο η επικάλυψη παραμένει ακέραιη, διότι εάν ο χάλυβας εκτεθεί θα λειτουργήσει ως άνοδος και θα διαβρωθεί. Ακόμη και αν ο χάλυβας δεν εκτεθεί, υπάρχει περίπτωση η επικάλυψη να υποστεί μικρο-κυψελική διάβρωση μέσα στο σκυρόδεμα μέσω ενός μηχανισμού παρόμοιου με αυτόν της διάβρωσης του χάλυβα που δεν έχει επικάλυψη.

Έχει διαπιστωθεί ότι το νικέλιο, το κάδμιο και ο ψευδάργυρος μπορούν να καθυστερήσουν και σε ορισμένες περιπτώσεις να αποτρέψουν τη διάβρωση του χάλυβα μέσα στο σκυρόδεμα, αλλά μόνον η επικάλυψη του οπλισμού με ψευδάργυρο είναι ευρέως διαδεδομένη (γαλβανισμένοι χάλυβες). Σε εργαστηριακές δοκιμές έχει αποδειχθεί ότι η

επικάλυψη με ψευδάργυρο άλλοτε επιμηκύνει και άλλοτε συντομεύει την εμφάνιση ρωγμών από διάβρωση. Είναι γνωστό ότι σε συνθήκες υψηλής συγκέντρωσης χλωριόντων, ο ψευδάργυρος διαβρώνεται μέσα στο σκυρόδεμα μέσω του μηχανισμού της διάβρωσης βελονισμού (pitting corrosion).Έρευνες σε παραθαλάσσιο περιβάλλον και σε επιταχυνόμενες συνθήκες πεδίου έχουν δείξει ότι η επιψευδαργύρωση του χάλυβα καθυστερεί την εμφάνιση αποκολλήσεων στο σκυρόδεμα αλλά δεν τις αποτρέπει. Σε συνθήκες δε περιβάλλοντος με υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων, μόνον μικρή αύξηση του χρόνου λειτουργίας εξασφαλίζεται.

Οι μεταλλικές επικαλύψεις εφαρμόζονται στο χάλυβα είτε με ψεκασμό τηγμένου μετάλλου, είτε με εμβάπτιση σε τηγμένο μέταλλο, είτε με επιμετάλλωση σε διάταξη ηλεκτρόλυσης.

β. Η μεγαλύτερη δυσκολία στη χρήση εποξεικών χαλύβων είναι η αποφυγή φθοράς στην επικάλυψη κατά τη μεταφορά και την τοποθέτηση του οπλισμού. Φθορές μπορεί να συμβούν από ακατάλληλη αποθήκευση, από βίαιη τοποθέτηση, από χτυπήματα με εργαλεία και από την επαφή με τους δονητές μάζας του σκυροδέματος. Επίσης η κάμψη εποξειδικών χαλύβων σε χαμηλές θερμοκρασίες επιφέρει ρωγμές στην επικάλυψη. Κατά τη φάση όπλισης της κατασκευής, πρέπει να αποφεύγεται η επαφή μεταξύ εποξειδικών και μη χαλύβων (πρέπει να τονιστεί ότι στις προδιαγραφές, απαιτείται η χρήση ξεχωριστών μηχανών κάμψης για εποξεικούς και συμβατικούς χάλυβες στο εργοτάξιο). Τα σύρματα που χρησιμοποιούνται για τα δεσίματα των εποξεικών οπλισμών πρέπει και αυτά να έχουν εποξεική επικάλυψη. Μικρές φθορές που παρατηρούνται επί τόπου του έργου πρέπει να αποκαθίστανται με τη χρήση εποξεικού υγρού δύο συστατικών (touch-up). Από έρευνες επιταχυνόμενης διάβρωσης έχει διαπιστωθεί ότι τα μικρά κοψίματα στην επικάλυψη δεν επιφέρουν ταχεία διάβρωση στον εκτεθειμένο χάλυβα, επίσης εξαιτίας της εποξεικής επικάλυψης έχει παρατηρηθεί μειωμένη αντοχή συνάφειας και συμπεριφορά στον ερπυσμό, σε σχέση με τους συμβατικούς (χωρίς επικάλυψη) χάλυβες οπλισμού. Σε κάθε περίπτωση η χρήση χαλύβων οπλισμού με εποξεική επικάλυψη θα πρέπει να προβλέπεται από τη μελέτη του έργου. Σχετικές οδηγίες σχεδιασμού δίνονται στο ACI 318.

15.4 *Καθοδική προστασία:*

- Η καθοδική προστασία μπορεί να εφαρμοσθεί σε ένα μέταλλο με τα παρακάτω συστήματα:

α. Σύστημα εφαρμοζόμενου ρεύματος:
Στο σύστημα αυτό, το σκυρόδεμα διατρέχεται από ένα συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα χαμηλής τάσης, χρησιμοποιώντας ως άνοδο ένα αγώγιμο υλικό, το οποίο καταναλώνεται με ελεγχόμενο ρυθμό και ως κάθοδο τον χάλυβα. Το ρεύμα αυτό, που παράγεται από εξωτερική πηγή, μεταβάλλει το ηλεκτρικό δυναμικό του χάλυβα σε αρνητικές τιμές με αποτέλεσμα την αναστολή της διαδικασίας διάβρωσης. Το σύστημα παρουσιάζει το πλεονέκτημα της ρύθμισης του εφαρμοζόμενου ρεύματος σε διάφορες τιμές αλλά όμως και το μειονέκτημα της τυχόν βλάβης της εξωτερικής πηγής παροχής ρεύματος, γεγονός που απαιτεί τακτικούς ελέγχους και συντήρηση. Το σύστημα αυτό δεν εφαρμόζεται εύκολα στην περίπτωση των προεντεταμένων χαλύβων, λόγω του κινδύνου ψαθυροποίησης από την έκλυση υδρογόνου.

β. Σύστημα γαλβανικής ανόδου:
Το σύστημα αυτό βασίζεται στην αρχή της ανόμοιας διάβρωσης και στη σχετική θέση που βρίσκονται τα διάφορα μέταλλα στην ηλεκτροχημική (γαλβανική) σειρά. Τα πιο δραστικά και

λιγότερο ευγενή μέταλλα (όπως: K, Na, Mg) προστατεύουν και θυσιάζονται για τα λιγότερο δραστικά και περισσότερο ευγενή (όπως: Cu, Ag, Au).

Με τον τρόπο αυτό, ο χάλυβας του σκυροδέματος συνδέεται με ένα λιγότερο ευγενές μέταλλο (με μικρότερο δυναμικό διάβρωσης) που χρησιμεύει ως θυσιαζόμενη άνοδος, προστατεύοντας τον χάλυβα από τη διάβρωση. Οι πλέον συνηθισμένες θυσιαζόμενες άνοδοι αποτελούνται από κράματα ψευδαργύρου, αλουμινίου και μαγνησίου.

Όπως και στο σύστημα του εφαρμοζόμενου ρεύματος, ένα ηλεκτρικό ρεύμα διατρέχει το σκυρόδεμα από την άνοδο προς τον χάλυβα (κάθοδος). Στην περίπτωση αυτή όμως το ρεύμα δεν δημιουργείται από κάποια εξωτερική πηγή, αλλά από τη φυσική διαφορά δυναμικού μεταξύ της ανόδου και του χάλυβα. Στο σύστημα αυτό, ο αριθμός των ανόδων είναι μεγάλος, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η προστασία σε όλο τον οπλισμό της κατασκευής. Επειδή οι άνοδοι έχουν μικρή διάρκεια ζωής, θα πρέπει να αντικαθίστανται τακτικά. Η χρήση συστημάτων γαλβανικής ανόδου έχει εφαρμογή σε παράκτιες κατασκευές που είτε είναι βυθισμένες είτε εκτίθενται σε ψεκασμό από θαλασσινό νερό, καθώς και σε υπόγειες κατασκευές μέσα στο νερό.

- Τα συστήματα καθοδικής προστασίας για το οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελούνται γενικά από το υλικό διανομής του ρεύματος (άνοδος), το μετρητικό εξοπλισμό (π.χ ηλεκτρόδια αναφοράς), τις ηλεκτρικές συνδέσεις του χάλυβα με τις ανόδους και, τέλος, μία εξωτερική πηγή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος για τα συστήματα εφαρμοζόμενου ρεύματος. Τα συστατικά της κατασκευής είναι ο οπλισμός της (κάθοδος) και το σκυρόδεμα, που με τους πόρους του δρα ως αγώγιμος ηλεκτρολύτης.

- Η διεθνής εμπειρία και η τεχνολογία έχουν οδηγήσει σε πλήθος αποδοτικών και ανθεκτικών συστημάτων καθοδικής προστασίας για συγκεκριμένες εφαρμογές.

  Ο σχεδιασμός και η επιλογή του πλέον κατάλληλου συστήματος καθοδικής προστασίας εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως:
  - Οι διαστάσεις και η θέση της κατασκευής
  - Η διάταξη και η θέση του οπλισμού
  - Τα αποτελέσματα των επιτόπου μετρήσεων και ελέγχων (συγκέντρωση χλωριόντων, επικάλυψη σκυροδέματος, θέσεις αποκόλλησης σκυροδέματος, κλπ)
  - Τη διαθεσιμότητα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος
  - Το ιστορικό επισκευών και συντήρησης της κατασκευής και άλλα.

  Η καθοδική προστασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτοτελώς ή σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους ελέγχου της διάβρωσης.

16. Εμφάνιση ρωγμών από διάβρωση οπλισμού. Βασικές έννοιες.

16.2 Ρηγμάτωση του σκυροδέματος ειδικά λόγω διάβρωσης του οπλισμού του

- Η συνήθης εμφάνιση των ρωγμών λόγω διάβρωσης οπλισμού είναι σε παραθαλάσσιες κατασκευές, σε εκτεθειμένες πλάκες με μικρή επικάλυψη (και/ή απουσία αποστατήρων) και/ή όπου δεν έχει τοποθετηθεί οπλισμός διανομής κάτω, με αποτέλεσμα να προρηγματώνονται εγκάρσια του οπλισμού (Εικ. 16.1α).

- Επίσης, είναι συχνή και στη βάση εκτεθειμένων υποστυλωμάτων σε επαφή με το έδαφος (όπου η παρουσία επιφανειακής υγρασίας επιταχύνει το φαινόμενο) (Εικ. 16.1β). Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να τονισθεί ότι μία άλλη ενδεχόμενη αιτία παρόμοιας μορφής διαμήκους ρηγμάτωσης κατά τη διεύθυνση του οπλισμού, είναι λόγω αστοχίας σε συνάφεια σε περιοχές του μέλους όπου είναι έντονη η τέμνουσα δύναμη, είτε υπάρχουν ελλιπείς επικαλύψεις (ματίσεις) και αγκυρώσεις και η οποία αιτία θα πρέπει να αποκλεισθεί από τον Πολιτικό Μηχανικό κατά την αυτοψία, με βάση την οπτική αναγνώριση (παλαιότητα της ρωγμής) και το αν έχει προηγηθεί υπερφόρτιση της κατασκευής (π.χ. σεισμός).

α)

β)

Εικ. 16.1 Διάβρωση κατά τη διεύθυνση του οπλισμού μελών εκτεθειμένων σε περιβαλλοντική έκθεση και μικρή επικάλυψη: α) Πλάκες με και χωρίς παρουσία εγκάρσιου οπλισμού διανομής και β) Υποστύλωμα στη βάση.

ISBN: 978-960-99996-7-0

ΣΠΜΕ

ΣΥΛΛΟΓΟΣ
ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΛΛΑΔΑΣ