

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΣΚΕΥΗ-ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΣ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

ΜΥΣΤΗΛΙΑΔΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ

Περίληψη

Το θαλάσσιο περιβάλλον αποτελεί ένα από τα πιο απειλητικά για το οπλισμένο σκυρόδεμα περιβάλλοντα. Έτσι, το πρόβλημα της επισκευής τέτοιων κατασκευών προκαλεί το ενδιαφέρον ειδικά καθώς οι καταγραφές περιπτώσεων αστοχίας κατασκευών καθαρά λόγω επίδρασης θαλάσσιου περιβάλλοντος αυξάνονται γοργά. Πόσο μάλλον σε χώρες όπως η Ελλάδα, που όχι μόνο περιβρέχεται από θάλασσα αλλά το πρόβλημα εντείνεται και από τη σημαντική σεισμικότητα. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια σύντομη επισκόπηση της επιρροής του θαλάσσιου περιβάλλοντος στις κατασκευές και συγκεντρώνει κάποιους βασικούς σύγχρονους τρόπους αποτίμησης και επισκευής τους.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ευαισθησία της πλειοψηφίας του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος σε δομικές ζημιές εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα του σχεδιασμού, τη λεπτομερειακή ανάλυση και την ποιοτική και πιστή στο σχεδιασμό κατασκευή. Επιπλέον δυσχέρειες συναντώνται, βέβαια, σε επιθετικά περιβάλλοντα είτε προς τη φύση των υλικών είτε από την άποψη σχεδιασμού, κατά τον οποίο μπορεί να μην συνυπολογίστηκαν επαρκώς τυχηματικά φορτία όπως ανακυκλιζόμενες φορτίσεις, φορτία κρούσης, περιπτώσεις, δηλαδή, συνδεδεμένες εν προκειμένω και με το θαλάσσιο περιβάλλον. Είναι σημαντικό, επομένως, κατά το σχεδιασμό των επισκευών και παλαιότερων δομών να υιοθετείται μια συνολική στρατηγική, παρόμοια με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού, καθώς και να προηγείται αναλυτική γνώση του τρόπου σχεδιασμού και λειτουργίας των μελών τους αλλά και των μηχανισμών που επέφεραν τη φθορά της εκάστοτε κατασκευής. Περνώντας στο στάδιο της επισκευής, έχει ιδιαίτερη σημασία να υιοθετούνται στοχευμένες μέθοδοι, κατάλληλες για την εκάστοτε περίπτωση, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή αποτελεσματικότητα στα επιτρεπτά και συμφέροντα επίπεδα κόστους. Οι κατασκευές σε επαφή με τη θάλασσα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, τόσο λόγω της πολλαπλότητας των παραγόντων που επιδρούν σε αυτές, όσο και λόγω τις πρακτικής δυσκολίας επέμβασης, σε αρκετές περιπτώσεις. Επίσης, οι κατασκευές αυτές είναι κατά κύριο λόγο τέτοιου μεγέθους, κόστους αλλά και λειτουργίας που η καταστροφή και ανακατασκευή τους είναι μάλλον απαγορευτική. Το ίδιο το θαλάσσιο περιβάλλον είναι αρκετά επιβλαβές, εντούτοις κι άλλοι παράγοντες επηρεάζουν την πρόωρη φθορά λόγω διάβρωσης, όπως: κακή ποιότητα κατασκευής, ως αποτέλεσμα της κακής εργασίας(πχ. ελλιπής συμπύκνωση), ανεπαρκή πρότυπα που βασίζονται σε επιτακτικά μέτρα και κακός σχεδιασμός, ως αποτέλεσμα της ανεπαρκούς πληροφόρησης αναφορικά με τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη διαδικασία υποβάθμισης.

2. ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ-ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ Ο.Σ.

Η ανταπόκριση της κατασκευής στους περιβαλλοντικούς παράγοντες μπορεί να προσδιοριστεί σύμφωνα με:

- Συνθήκες θερμοκρασίας $T(x,y,z,t)$.
- Συνθήκες υγρασίας $RH(x,y,z,t)$, TOW (Time of wetness-διάρκεια έκθεσης στην υγρασία).
- Συνθήκες χλωριόντων . $Cl(x,y,z,t)$.
- Βάθος Ενανθράκωσης $CO_2(x,y,z,t)$. [1]

Παραθαλάσσιο περιβάλλον, σύμφωνα με τον ΕΚΩΣ 2000, ορίζεται μια ζώνη βάθους μέχρι και ένα χιλιόμετρο από την ακτή.* Το θαλάσσιο περιβάλλον χαρακτηρίζεται από: (1)

Χημική σύσταση του θαλασσινού νερού, (2) Θερμοκρασία στο θαλασσινό νερό, (3) Ύψη κυμάτων, (4) Υδροστατική πίεση, (5) Παλιρροιακές δράσεις, (6) Στάθμη νερού (7) Ομίχλη και ψεκάσμος (8) Ρεύματα.[1]

* Σύμφωνα με πιο συντηρητικές προσεγγίσεις, θεωρείται ζώνη βάθους 1,11-3,22 χλμ. [4] ή και 10 χλμ.(αποδίδοντας αυτό το μεγάλο εύρος στο αερόφερτο αλατούχο νέφος) .[1] λόγω και των τοπικών γεωμορφολογικών και περιβαλλοντικών συνθηκών.

Το θαλάσσιο περιβάλλον επιδρά με πολύπλοκους μηχανισμούς στο σκυρόδεμα, διότι συνδυάζει πολλές φυσικές και χημικές αντιδράσεις:

- Υδροφθορά
- Επίδραση παγετού τήξεως
- Επίδραση CO₂ ατμόσφαιρας
- Επίδραση αλάτων νερού (κυρίως θεικών και χλωριούχων αλλά και ιδιαίτερα του μαγνησίου)
- Επίδραση αλκαλίων (νατρίου και καλίου)
- Σχηματισμός βιολογικής μεμβράνης στην επιφάνεια του σκυροδέματος.[5]

Προτείνεται η διαίρεση του θαλάσσιου περιβάλλοντος σε τέσσερις διαφορετικές ζώνες, ανάλογα με τη θέση της στάθμης του νερού:

Ζώνη υπό το νερό. Η ζώνη η οποία είναι μονίμως κάτω από τη στάθμη του νερού (κατώτερη παλιρροιακή). Σε αυτή, το σκυρόδεμα θεωρείται προστατευμένο λόγω της συνεχούς διαβροχής, η οποία προσφέρει ομοιόμορφο περιβάλλον όσον αφορά τη θερμοκρασία και την περιεκτικότητα σε υγρασία (αποφυγή παγετού και μηχανικής δράσης λόγω μεταβολής του όγκου σκυροδέματος από εναλλασσόμενη διαβροχή-ξηρανση)

Παλιρροιακή ζώνη. Η ζώνη μεταξύ χαμηλής και υψηλής παλίρροιας, όπου το σκυρόδεμα υποβάλλεται σε περιοδική ύγρανση και ξήρανση (με κύκλο περίπου δώδεκα ώρες).

Ζώνη παφλασμού. Η ζώνη πάνω από το επίπεδο της παλίρροιας η οποία επηρεάζεται από τα κύματα, πράγμα που σημαίνει ότι το σκυρόδεμα υποβάλλεται σε τυχαία ύγρανση και ξήρανση, λόγω των κυματικών δράσεων. Στις δύο τελευταίες εμφανίζεται η μεγαλύτερη φθορά, καθώς συνδυάζονται: μηχανική φθορά από πρόσκρουση κυμάτων, παγετός, χημική επίδραση αλάτων, ενανθράκωση λόγω ατμοσφαιρικού CO₂

Ζώνη έκθεσης. Η ζώνη πάνω από τη ζώνη εκκίνησης, όπου το σκυρόδεμα υπόκειται σε υγρό και αλατούχο θαλάσσιο αέρα.[1,6]

3. ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Η Αμερικανική Ένωση Μηχανικών Διάβρωσης (NACE) ορίζει τη διάβρωση ως «την επιδείνωση ενός υλικού, συνήθως μέταλλου, που προκύπτει από την αντίδραση με το περιβάλλον του.» Η βασική αιτία της διάβρωσης είναι η αστάθεια των μετάλλων στην εκλεπτυσμένη μορφή τους. Τα μέταλλα τείνουν να επανέλθουν στη φυσική τους κατάσταση, μέσω των διαδικασιών της διάβρωσης. Κοινό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση του σιδήρου. Όταν νερό της βροχής έρχεται σε επαφή με το σίδηρο, σχηματίζει σκουριά. Αυτή η σκουριά, ή οξείδιο του σιδήρου, είναι η αρχική κατάσταση του σιδήρου, σε σιδηρομετάλλευμα.

Κατηγορίες χημικής διάβρωσης:

Διάβρωση αποπλύσεως: Προκαλείται από μαλακό νερό, υδροχλωρικό οξύ, ανθρακικό οξύ. Αφαίρεση τμήματος ή όλου του τσιμεντοπολτού. Δεν εμφανίζεται σε πυκνό σκυρόδεμα.

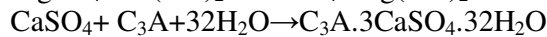
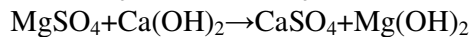
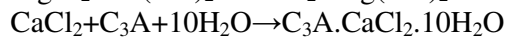
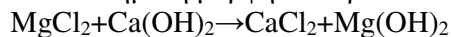
Διάβρωση αντιδράσεων ανταλλαγής μάζας: Προκαλείται από οξέα άλατα, φαινόλες κ.α. Τα προϊόντα είτε είναι ευδιάλυτα οπότε αποπλένονται είτε παραμένουν στο σκυρόδεμα χαλαρώνοντας τη συνάφεια αδρανών και τσιμεντοπολτού.

Διάβρωση λόγω διογκώσεως: προκαλείται από θειικά άλατα κυρίως. Τα προϊόντα είναι σταθερά αλλά μεγάλου όγκου. Έτσι προκαλείται ρηγμάτωση λόγω των τάσεων από τις διογκώσεις εντός του σκυροδέματος.[5]

▪ Σκυρόδεμα

Η διείδυση των χλωριόντων δεν επηρεάζεται μόνο από τις περιβαλλοντικές δράσεις, αλλά και από την εκτέλεση της κατασκευής, την αναλογία του κονιάματος και τις πιθανές επιφανειακές επεξεργασίες, π.χ. υδρόφοβες επεξεργασίες[1]. Το σκυρόδεμα είναι ένα χαρακτηριστικά πορώδες υλικό. Παρά τις όσες βελτιώσεις στη διαμόρφωση και την κατασκευή, μικροπόροι και μικροκενά θα υπάρχουν στην επιφάνεια του. Αυτά τα ελαττώματα θα ενθαρρύνουν τη μεταφορά των επιθετικών παραγόντων στο σώμα του σκυροδέματος, δεδομένου ότι οι ρωγμές, το βάθος και η ποιότητα του επικαλύπτοντος σκυροδέματος είναι οι τρεις παράγοντες που επηρεάζουν τη διείδυση αυτών των παραγόντων[6]. Αυτό σημαίνει ότι, πριν από την αξιολόγηση της διείδυσης χλωριόντων και της υγρασίας, σε μια κατασκευή από σκυρόδεμα, πρέπει να εκτιμώνται τα χαρακτηριστικά του κονιάματος που χρησιμοποιήθηκε και η επιρροή πιθανής επιφανειακής επεξεργασίας[1]. Οι επιφανειακές επιστρώσεις επί του σκυροδέματος διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διακύμανση της αντοχής του ίδιου και του ενσωματωμένου σε αυτό χάλυβα.[6] Το σκληρυμένο σκυρόδεμα, σε γενικές γραμμές, δεν προσβάλλεται από τα χλωριόντα ασβέστιου, κάλιου και νάτριου που υπάρχουν στο νερό της θάλασσας και στα παράκτια περιβάλλοντα. Προσβάλλεται, ωστόσο, από χλωριούχο μαγνήσιο, θειούχα άλατα και το διαλυμένο διοξείδιο του άνθρακα.

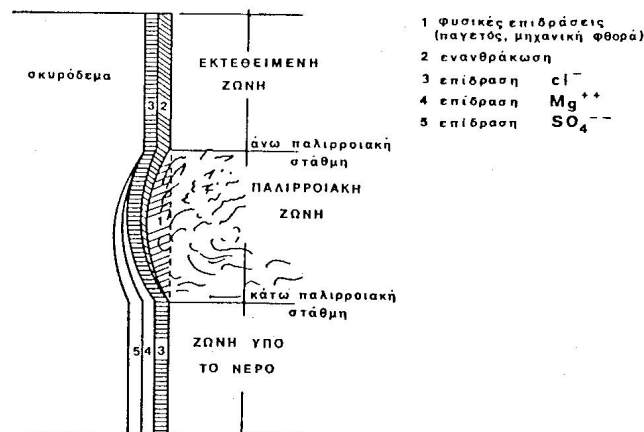
Απλοποιημένη μορφή αντιδράσεων που λαμβάνουν μέρος:



Όπου CaCl_2 , CaSO_4 ευδιάλυτα, οπότε πραγματοποιείται απόπλυση

$\text{Mg}(\text{OH})_2$ δρα ως στεγανωτικό επίχρισμα

$\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ (ετρινγκίτης) διογκώνεται [5]



Σχήμα 1: Διάβρωση κατά ζώνες [5]

▪ Χάλυβας

Η πλειοψηφία των προβλημάτων της αντοχής δομών, εντός του θαλάσσιου περιβάλλοντος, προέρχεται από τη διάβρωση του οπλισμού. Το σκυρόδεμα δημιουργεί ένα περιβάλλον υψηλής αλκαλικότητας ($\text{pH} \approx 12,5$) που προστατεύει το χάλυβα από τη διάβρωση, επιτρέποντας το σχηματισμό ενός λεπτού στρώματος οξειδίου του σιδήρου στην επιφάνειά τους (παθητικοποίηση χάλυβα). Η διάβρωση μπορεί να αρχίσει όταν καταστραφεί αυτό το προστατευτικό στρώμα.[9] Το περιβάλλον αυτό μπορεί να καταστραφεί από ενανθράκωση ή από επίθεση χλωριόντων (συγκέντρωση πάνω από μια κρίσιμη τιμή)[9]. Έτσι, επέρχεται

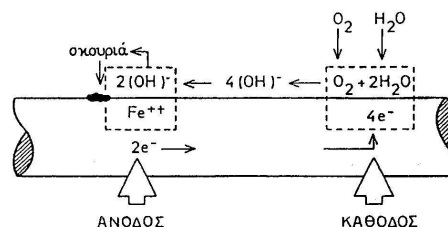
μείωση του pH, σε τιμές κάτω του 9. Σε θαλάσσιο περιβάλλον, παράκτιες περιοχές και εκεί που γίνεται χρήση αλάτων τήξης χιονιού, η διείσδυση χλωριόντων είναι ο κύριος μηχανισμός έναρξης και συντήρησης της διάβρωσης του οπλισμού.

Μόλις το αλκαλικό περιβάλλον στο εσωτερικό του σκυροδέματος καταστραφεί και διαβρωτικοί παράγοντες, όπως το οξυγόνο και η υγρασία είναι διαθέσιμοι, ξεκινά η διάβρωση του χάλυβα. Τα προϊόντα της διάβρωσης είναι ογκώδη, 8 έως 10 φορές μεγαλύτερου όγκου σε σχέση με το βασικό μέταλλο. Έτσι για να συνεχιστεί η παραγωγή τους ασκούνται τάσεις εφελκυσμού στο γύρω σκυροδέμα. Η ένταση που ασκείται τείνει να προκαλέσει ρωγμές και, τελικά, θρυμματισμό του σκυροδέματος μακριά από την ενίσχυση. Η διάβρωση του χάλυβα μειώνει, κατά συνέπεια, την αντοχή και το ωφέλιμο φορτίο μειώνοντας την περιοχή του χάλυβα, καθώς και δημιουργώντας ρωγμές στο κάλυμμα σκυροδέματος.[3]

Ο τρόπος με τον οποίο διαβρώνεται ο χάλυβας ποικίλει σημαντικά ανάλογα με την αιτία διάβρωσης. Διακρίνονται οι εξής μορφές διάβρωσης:

- Γενική ή ομοιόμορφη: όταν η αλκαλικότητα του σκυροδέματος έχει χαθεί σε ευρεία περιοχή (από απόπλυση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ενανθράκωση ή επίδραση θεικών και ανθρακικών αλάτων)
- Τοπική
 - i) Διάβρωση κατά βελονισμό: οφείλεται αποκλειστικά στην επίδραση χλωριόντων
 - ii) Μικρορηγματώδης: φαινόμενο ανάλογο με το παραπάνω με τη διαφορά ότι αρχίζει σε μικροκοιλότητες και μικρορωγμές, δηλαδή ατέλειες στην επιφάνεια του χάλυβα
 - iii) Μεταξύ κόκκων: η μορφή αυτή εμφανίζεται στο εσωτερικό του χάλυβα και είναι υπεύθυνη για τη διαφορά δυναμικού μεταξύ γειτονικών περιοχών του σιδήρου. Αποφεύγεται με χρήση χάλυβα περιεκτικότητας άνθρακα μικρότερης από 0,05%
- Λόγω διαφοράς δυναμικού
 - i) Γαλβανική: αναπτύσσεται σε περιοχές όπου ο χάλυβας έρχεται σε επαφή με άλλα μέταλλα και γίνεται ιδιαίτερα επικίνδυνη παρουσία χλωριούχων ή θεικών αλάτων (ήτοι και στο θαλάσσιο περιβάλλον)
 - ii) Ηλεκτρολυτική: αποτέλεσμα άμεσης εφαρμογής ρεύματος από εξωτερική πηγή, στην περιοχή εξόδου του ρεύματος.
- Διάβρωση υπό μηχανική τάση: αφορά τους προεντεταμένους χάλυβες. Δεν παρατηρείται απώλεια διατομής λόγω διάβρωσης. Οφείλεται στον συνδυασμό διαβρωτικού περιβάλλοντος και ανάπτυξης πρόσθετης διαφοράς δυναμικού εντός του χάλυβα, υπό μηχανική τάση.

Παρατηρείται ότι τα χλωριόντα επιταχύνουν πολύ τη διάβρωση όλων των χάλυβων, εκτός από αυτούς που περιέχουν μεγάλες ποσότητες νικελίου[5].



Σχήμα 2: Βασικός μηχανισμός διάβρωσης χάλυβα [5]

Κάτω από την επιφάνεια του νερού, πολύ λίγο οξυγόνο είναι διαθέσιμο να σχηματίσει μια κάθοδο, αλλά στη ζώνη παφλασμού και στην παλιρροϊκή ζώνη, άφθονο οξυγόνο και υγρασία (σε αέρια μορφή) είναι διαθέσιμη. Έτσι, αυτές οι περιοχές γίνονται κάθοδοι, ενώ οι περιοχές

με τη διείσδυσή των ιόντων χλωρίου γίνονται άνοδοι, με αποτέλεσμα τη διάβρωση του οπλισμού.

Συγκεντρωτικά, λοιπόν, οι συνέπειες από την διάβρωση του σιδηροοπλισμού είναι γνωστές και σχετίζονται με: την μείωση της ενεργού διατομής του, την σταδιακή απώλεια της συνάφειάς του με το σκυρόδεμα, την σχετική αύξηση του όγκου από 3 μέχρι 8 φορές της μάζας που διαβρώνεται, τις μικρορηγματώσεις στο σκυρόδεμα, την εκτίναξη της επικάλυψης και φυσικά την μείωση της διατομής του σκυροδέματος. Σε πρόσφατες μελέτες διάβρωσης του σιδηρού οπλισμού (Apostolopoulos et all 2008; Apostolopoulos 2009) καταγράφηκε σημαντική υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων αντοχής και ολκιμότητας διαβρωμένων ράβδων σιδηροοπλισμού S220 (StI), S400 (St III), S500s Tempcore και B500c (StIV).[10]

4. ΤΡΟΠΟΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ - ΕΛΕΓΧΟΙ ΒΑΘΜΟΥ ΕΠΙΡΡΟΗΣ

Η ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος (ή η αγωγιμότητα) θα μπορούσε να έχει πρακτική σημασία για την εκτίμηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος. Επιπλέον, όταν η παθητικότητα έχει χαθεί, η έρευνα δείχνει ότι ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ταχύτητα διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού είναι η αντίσταση του γύρω σκυροδέματος[8].

Είναι σημαντικό να είναι δυνατός ο προσδιορισμός των κριτήριων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθορίσουν το τέλος της λειτουργικής ζωής των δομών, στο θαλάσσιο περιβάλλον. Τα πιο κοινά από αυτά τα κριτήρια είναι ο χρόνος παθητικοποίησης του χάλυβα, οι ρωγμές του καλύπτοντος σκυροδέματος και το σημείο στο οποίο η εναπομένουσα φέρουσα ικανότητα της δομής θεωρείται ανεπαρκής. Για τις δομές που είναι ήδη διαβρωμένες, το κριτήριο της παθητικοποίησης του χάλυβα έχει μικρή αξία. Τα πλάτη των ρωγμών και η φέρουσα ικανότητα, συνεπώς, συχνά χρησιμοποιείται για να καθορίσει το τέλος της λειτουργικής ζωής των εν λόγω δομών.[3]

- Μετρήσεις στο πεδίο:

Οπτική επιθεώρηση: ρωγμές (μέτρηση μήκους και πλάτους[2]), αποχρωματισμός, αποφλοίωση του επενδυτικού στρώματος

Μη καταστρεπτικές μέθοδοι: παλμική ταχύτητα (τρια σημεία), ημικυβελικό δυναμικό (ανά διαστήματα των 100mm), αντίσταση πόλωσης, αντίσταση σκυροδέματος, ρεύμα μεταξύ χάλυβα οπλισμού (10sec)

- Εργαστηριακές μετρήσεις:

Έλεγχος ενανθράκωσης: μέθοδος φαινολοφθαλεινης[8] Σε θραύσμα σκυροδέματος ψεκάζεται διάλυμα με φαινολοφθαλεινη 1%. Εάν η επιφάνεια επιχρωματιστεί σε απόχρωση ελαφρού μοβ μαρτυρά την παρουσία $\text{Ca}(\text{OH})_2$, οπότε δεν έχει γίνει ενανθράκωση. Αντίθετα ένδειξη ενανθράκωσης είναι η μη αλλαγή χρώματος.[2]

Έλεγχος συγκέντρωσης χλωριόντων: ποτενσιομετρική ογκομέτρηση[8]

Σε φρέσκο θραύσμα σκυροδέματος ψεκάζεται διάλυμα με AgNO_3 1%. Έχει παρατηρηθεί ότι σε περιοχές που έχουν προσβληθεί τα χλωριόντα κυμαινόνταν σε 0,12 με 0,28 (wt.per cement) ενώ σε μη μολυσμένες στα 0,06 με 0,12.[2]

Περίθλαση ακτίνων X: με στόχο: Cu, 40 kV-80 mA, slit: $1\pm-1\pm-0.15$ mm

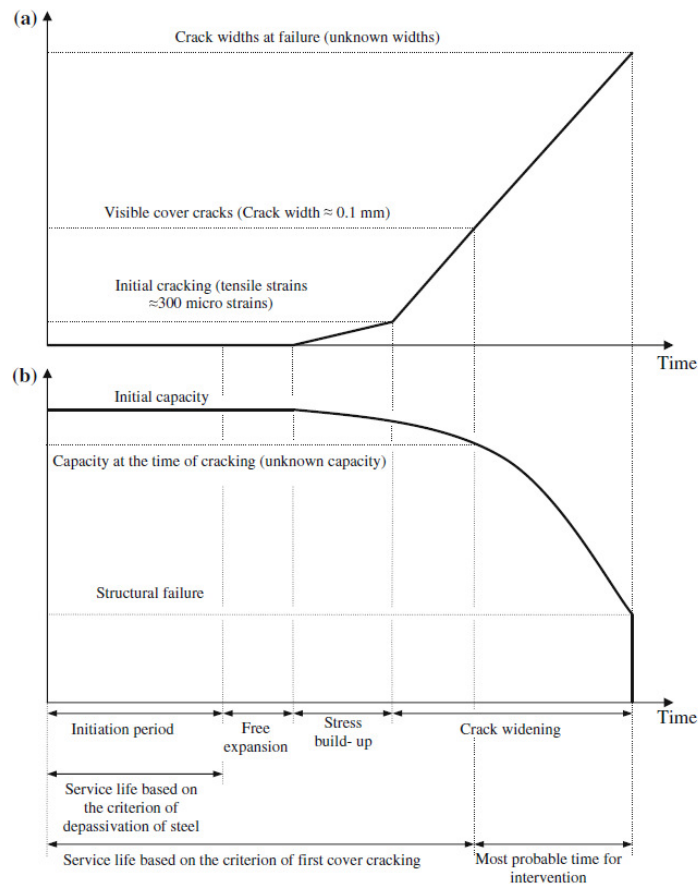
Καμπτική δοκιμή: εφαρμογή καθαρής κάμψης, με δυο συγκεντρωμένα φορτία (απόσταση στηρίξεων: 900 mm, απόσταση φορτίων: 200mm)[8]

Πρακτικά, επιπλέον, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω έλεγχοι:

- Προσδιορισμός αντοχής με χρήση σφυριού Schmidt και από δείγματα πυρήνα
- Μικροσκοπικές εξετάσεις της ραγισμένης επιφάνειας και της διεπιφάνειας οπλισμού μήτρας σκυροδέματος (παρουσία ετρινγκιτη μαρτυρά διάβρωση)
- Μέτρηση ηλεκτρικού δυναμικού (μέθοδος που απαιτεί αρκετά εξειδικευμένη γνώση για την κατανόηση των αποτελεσμάτων, καθώς και εμπειρία εφαρμογής)[2].

1) Γενικά, οι τεχνικές μη ηλεκτροχημικού ελέγχου εντοπίζουν τη διάβρωση του χάλυβα σε προχωρημένο στάδιο. Επομένως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερο σαν εκτιμήτριες του μεγέθους επέμβασης και όχι για την αποτίμηση της κατασκευής.

2) Οι τεχνικές ηλεκτροχημικής παρατήρησης είναι πολύ ευαίσθητες και στην περίπτωση μετρήσεων μακροκυψελικού ρεύματος παρέχουν άμεση απόδειξη της διαβρωτικής δραστηριότητας. Οι έρευνες δυναμικού χρησιμοποιούνται ευρέως για επί τόπου αποτίμηση. Ωστόσο, λόγω των περιπλοκών της συμπεριφοράς του συστήματος, δεν μπορεί να χρησιμοποιούνται ως καθοριστικές μελέτες της διαβρωτικής φάσης του χάλυβα.



Σχήμα3: Λειτουργική ζωή των υπό διάβρωση κατασκευών ΟΣ-α) πλάτη ρωγμών, b) φέρουσα ικανότητα

Σημείωση: Αποδεικνύεται ότι το επίπεδο διάβρωσης του χάλυβα που προκαλεί τις πρώτες ρωγμές του σκυροδέματος έχει ελάχιστη επίδραση στην φέρουσα ικανότητα της κατασκευής. Έτσι, στο τέλος της διάρκειας ζωής μιας υπό διάβρωση κατασκευής με βάση το κριτήριο της απομένουσας φέρουσας ικανότητας της δομής του εκτείνεται πολύ πέρα από τη διάρκεια λειτουργικής ζωής με βάση το κριτήριο του πλάτους των ρωγμών.[3]

5.ΠΡΟΤΙΝΟΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΜΒΑΣΗΣ

Επιβάλλεται συχνά η επισκευή των διαβρωμένων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, ώστε αυτές να διατηρήσουν ή να αποκαταστήσουν τη λειτουργικότητά τους. Η αποτελεσματικότητα της παρέμβασης μπορεί να αξιολογηθεί με βάση είτε το πλάτος ρωγμής διάβρωσης, ή της απομένουσας φέρουσας ικανότητας. Είναι ενδιαφέρον ότι και τα δύο κριτήρια είναι στενά συνδεδεμένα με το επίπεδο διάβρωσης του χάλυβα. Συνεπώς, είναι

επίσης σημαντικό να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα των επισκευών να επεκτείνουν τη διάρκεια ζωής των διαβρωμένων δομών με βάση την ικανότητά τους να ελέγξουν την περαιτέρω διάβρωση του χάλυβα.[3]

Θεμελιώδη βήματα προπαρασκευής, ανεξαρτήτως του επιλεγόμενου υλικού αποτελούν τα εξής:

- Αφαίρεση επιφανειακού σκυροδέματος μέχρι να φτάσουμε στο υγείες[2]. Το περίγραμμα από το εξορυχθέν τμήμα δεν πρέπει να σβήνει αλλά να δημιουργεί σκαλοπάτι και συνθήκες πακτώσεως των μετέπειτα υλικών σφράγισης
 - Αντικατάσταση των υπό διάβρωση ράβδων, εάν απαιτείται στατικά[12].
 - Προετοιμασία της επιφάνειας χάλυβα με αμμοβολή ή υδροβολή, προς απομάκρυνση αποσθρωμένου κονιάματος, απολεπιζόμενης σκουριάς κλπ
 - Επάλειψη της καθαρής επιφάνειας σκυροδέματος και του οπλισμού είτε με κατάλληλο αντιδιαβρωτικό αστάρι δεσμών είτε με πλούσιο τσιμεντοπολτό
- Συστατικά Υλικά

Τα υλικά επισκευής πρέπει να πληρούν τις εξής προϋποθέσεις:

Καλή πρόσφυση με το υπόστρωμα

Συμβατότητα με συρρίκνωση και κινήσεις ύγρανσης-ξήρανσης του υποστρώματος, καθώς και μηδενικής ή έστω μειωμένης συρρίκνωσης ξήρανσης προς αποφυγή εμφάνισης περιμετρικών ρηγματώσεων, στην περιοχή της επέμβασης.

Μικρή διαπερατότητα από νερό, οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα και επιθετικά ιόντα όπως χλωριόντα, θειικά κλπ

Ικανότητα παθητικοποίησης του χάλυβα

Μακροπρόθεσμη αντοχή[2]

Το σκυρόδεμα για υποβρύχιες επισκευές πρέπει να αναμειγνύεται προσεκτικά και να χρησιμοποιούνται πρόσθετα, τα οποία δεν ξεπλένονται, διατηρούν τη συνοχή του σκυροδέματος και μαζεύουν το νερό των πόρων[13].

Προτεινόμενα Υλικά:

Τσιμεντοκονίαμα με πρόσμικτα όπως Styrene Buta diene Rubber (SBR)

Εποξειδικές ρητίνες με κατάλληλο φύλλερ

Πολυεστερικές ρητίνες και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα[2]

Το μόνο συμβατικό αντιοξειδωτικό που μπορεί να εφαρμοσθεί είναι το βάσεως κόνεως ψευδαργύρου και αυτό μόνο με την προϋπόθεση ότι έχει αποκαλυφθεί περιμετρικά ο οπλισμός και έχει αφαιρεθεί πλήρως η σκουριά.[12]

Συγκεκριμένες προϋποθέσεις για τα υλικά δίνονται στην [7]

Αναστολείς Διάβρωσης: έχουν σκοπό τόσο να καθυστερούν την έναρξη, όσο και να περιορίζουν το ρυθμό εξέλιξης της διάβρωσης του χάλυβα. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα σε μορφή σκόνης σε κονιάματα προστασίας του χαλύβδινου οπλισμού ή σαν αμιγώς υγρά διαλύματα, τα οποία διεισδύουν στο σκυρόδεμα χωρίς την καθάρσή του, με απλή επίχριση και προστατεύουν τον οπλισμό δημιουργώντας μια προστατευτική στρώση στην επιφάνεια του χάλυβα[14].

Μανδύες από πολυμερικά φύλλα, όπως PVC, τα οποία τυλίγονται γύρω από την κολώνα και έχουν πάχος 30 – 60mm. Τα φύλλα αυτά αποτελούν ένα προστατευτικό στρώμα ανάμεσα στις κολώνες και στο νερό, δημιουργούν αναερόβιες συνθήκες με αποτέλεσμα να καταστρέφονται μικροοργανισμοί που ζουν στη θάλασσα. Η συγκόλληση των φύλλων PVC στο σκυρόδεμα γίνεται με κονιάματα από τσιμέντο ή πολυμερικά κονιάματα, συνήθως εποξειδικά. Τα συστήματα αυτά είναι άοπλα και χρησιμοποιείται οπλισμός όταν το πάχος του κονιάματος είναι αρκετό ώστε να χωρέσει αυτός[13].

Πειράματα έδειξαν ότι οι αντοχές για τα ρευστοκονιάματα που βρίσκονται κάτω από το νερό είναι παραπλήσιες με αυτές που αντιστοιχούν σε αυτά πάνω από το νερό, όταν οι αντοχές των εποξειδικών ρητινών είναι περίπου 10% και των πολυεστερικών περίπου 35%

μικρότερες από αυτές που αντιστοιχούν σε υγρές συνθήκες. Ακόμα τα πειράματα έδειξαν ότι οι εποξειδικές ρητίνες παρουσίασαν μεγαλύτερα φαινόμενα ερπυσμού από τις πολυεστερικές.[13]

- Επεμβάσεις
 - Σκυρόδεμα

Γέμισμα ρωγμών: Ρωγμές λιγότερο από 0,6 χιλιοστά σφραγίζονται με εποξειδική ρητίνη τύπου γέλης. Η εποξειδική ένωση που έχει επιλεγεί πρέπει να αποκτά υψηλή αντοχή σε σύντομο χρονικό διάστημα, χωρίς αισθητή συρρίκνωση. Σε περίπτωση που υπάρχουν σημαντικές κινήσεις, όπως η συστολή-διαστολή, πρέπει να χρησιμοποιείται ως σφραγιστικό ελαστομερές, όπως πολυθειούχο ή πολυουρεθάνη. Αν υπάρχουν μεγαλύτερες ρωγμές στο καθαρισμένο σκυρόδεμα, σφραγίζονται είτε με εποξειδική ρητίνη ή με ρητίνη με τσιμεντοειδές κονίαμα.[2]

Αντικατάσταση σκυροδέματος: Το αποσαθρωμένο σκυρόδεμα μπορεί να αντικατασταθεί είτε από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είτε από υγρό τσιμεντοειδές υλικό. Η σύνθεση του υλικού πρέπει να είναι όσο το δυνατόν παρόμοια με αυτή του αρχικού σκυροδέματος, αλλά και μικρού λόγου Ν/Τ. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι σκυρόδεμα λεπτής διαβάθμισης αδρανών, που πληροί αυτή την προϋπόθεση και δεν απαιτεί ξυλότυπο.

- Χάλυβας

Αποκοπή των διαβρωμένων τμημάτων και αντικατάστασή τους με προσθήκη ράβδων επικαλυπτούσων των κενών συγκολλούμενων, συνδεόμενων με κατάλληλα εξαρτήματα, ή παρατιθέμενων στις υπάρχουσες, με κατάλληλο μήκος αγκύρωσης[2]. Βέβαια, η συγκόλληση αν και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος, δεν παύει να είναι αμφίβολη, ειδικά για μεγάλες κατασκευές. Αυτό συμβαίνει λόγω έλλειψης αναλυτικού εργαλείου μελέτης, μεγάλης απαίτησης χρόνου, υψηλού κόστους, απαίτησης ειδικού εξοπλισμού και παροχής ηλεκτρικού ρεύματος, απαίτησης άρτια εκπαιδευμένου προσωπικού[11]

Καθοδική προστασία: Η διάβρωση του οπλισμού είναι μια ηλεκτροχημική διαδικασία και οφείλεται στα διαφορετικά ηλεκτρικά δυναμικά στην επιφάνειά του, όταν βρίσκεται σε υγρό περιβάλλον. Το σκυρόδεμα δρα σαν ηλεκτρολύτης μικρής αγωγιμότητας (η ειδική αντίσταση είναι 2 – 6 kΩ.cm για υγρό σκυρόδεμα και 10 - 200 kΩ.cm για ξηρό).

Υπάρχουν δυο τρόποι εισαγωγής της καθοδικής προστασίας στο χάλυβα:

1. με ένωση του χάλυβα με ένα μέταλλο ‘λιγότερο ευγενές’ στην ηλεκτροχημική διαδικασία - ανοδική προστασία (sacrificial anodic protection)
2. με τη χρησιμοποίηση ενός εξωτερικού ηλεκτρικού ρεύματος με επαρκή ένταση, ώστε να περιορίσει τη διάβρωση -τεχνική εφαρμοσμένου ρεύματος.

Για την ανοδική προστασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στοιχεία όπως νάτριο, μαγνήσιο, ψευδάργυρος, αλουμίνιο κ.α. Η σειρά που θα χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία είναι βασική και γίνεται από αυτά που προηγούνται (πιο ανοδικά) στα επόμενα. Όταν δυο διαφορετικά στοιχεία έρχονται σε επαφή μέσα σ’ ένα ηλεκτρολύτη, παράγεται ρεύμα σαν συνάρτηση της ηλεκτροχημικής σειράς τους. Για παράδειγμα, αν ο σίδηρος είναι σε ηλεκτρική επαφή με τον ψευδάργυρο μέσα σ’ έναν ηλεκτρολύτη, το ρεύμα θα κινηθεί από τον ψευδάργυρο στο σίδηρο επειδή ο ψευδάργυρος είναι ανοδικός του σιδήρου και ο ψευδάργυρος θα διαβρωθεί, ενώ ο σίδηρος όχι. Αυτή είναι η αρχή της παραπάνω μεθόδου. Όσον αφορά την τεχνική του εφαρμοσμένου ρεύματος, η κατασκευή που πρόκειται να προστατευτεί συνδέεται με την αρνητική τροφοδοσία (κάθοδος) και με τη θετική τροφοδοσία, μια εισαγόμενη άνοδο, η οποία επιλέγεται έτσι, ώστε να έχει μη διαβρώσιμες ιδιότητες. Στις θαλάσσιες εγκαταστάσεις χρησιμοποιείται κράμα από σίδηρο και μόλυβδο.

Η μέθοδος αυτή ξεετάζει και την επανείσοδο των ιόντων χλωρίου στο σκυρόδεμα, οπότε προσφέρει συνεχή προστασία. Για την καθοδική προστασία των κατασκευών πρέπει να συνεκτιμώνται τα εξής :

1. καταλληλότερος τύπος προστασίας, για τις δοσμένες καταστάσεις (ανοδική προστασία ή τεχνική του εφαρμοσμένου ρεύματος)
2. η καθοδική προστασίας του οπλισμού που βρίσκεται μέσα στο σκυρόδεμα εισάγει ειδικά προβλήματα, όπως ότι το νερό των πόρων στο σκυρόδεμα δρα σαν ηλεκτρολύτης.
3. το εφαρμοσμένο ρεύμα πρέπει να είναι αρκετό ώστε να καταστείλει τη διάβρωση.
4. η καθοδική προστασία μπορεί να προκαλέσει διάσπαση του υδρογόνου, βέβαια, πολύ σπάνια
5. πιθανότητα αντίδρασης αλκαλικού υλικού με διοξείδιο του πυριτίου
6. παρουσία σημαντικών ασυνεχειών στο χάλυβα οπλισμού

Απομάκρυνση χλωριούχων αλάτων: Αυτή η μέθοδος είναι μια εναλλακτική τεχνική της καθοδικής προστασίας. Η άνοδος που χρησιμοποιείται μπορεί να είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε και στην καθοδική προστασία ή ένα πλέγμα επικαλυμμένου τιτανίου. Αυτό τοποθετείται εξωτερικά του μέλους σκυροδέματος και στερεώνεται στο υλικό το οποίο διατηρείται υγρό κατά τη διάρκεια της απομάκρυνσης των χλωριούχων αλάτων. Δεν είναι εφικτό να απομακρυνθούν από το σκυρόδεμα όλα τα χλωριούχα άλατα, αλλά αν απομακρυνθούν σωστά αυτά που περιέχονται στην επικάλυψη του σκυροδέματος τότε θα έχουμε μείωση σ' ένα αποδεκτό επίπεδο. Αν υπάρχει μια μαζική εισχώρηση των χλωριούχων αλάτων στο σκυρόδεμα, τότε αυξάνεται η αντίσταση στη δίοδο του ρεύματος και η απομάκρυνση των χλωριούχων αλάτων γίνεται ιδιαίτερα δύσκολη. Η εν λόγω τεχνική δεν ασχολείται καθόλου με την επανείσοδο ιόντων χλωρίου στο σκυρόδεμα, πράγμα που μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την διάβρωση των ράβδων εκ νέου.[13]

Επανααλκαλίωση: Αυτή η μέθοδος επαναφέρει την αλκαλικότητα του σκυροδέματος που είναι σε επαφή με τις ράβδους έτσι, ώστε το pH να πλησιάσει την τιμή 10, οπότε επαναφέρει την προστατευτική επικάλυψη ιόντων στο χάλυβα. Η διαδικασία της επανααλκαλίωσης είναι η εξής: μια άνοδος, κυρίως κυτταρίνη, τοποθετείται στην επιφάνεια του σκυροδέματος η οποία διατηρείται υγρή από ένα διάλυμα ανθρακικού νατρίου το οποίο ενεργεί σαν ηλεκτρολύτης. Το αλκαλικό διάλυμα εισέρχεται μέσα στο σκυρόδεμα με ηλεκτρική ώσμωση. Η ηλεκτρόλυση της επιφάνειας των ράβδων παράγει ιόντα υδροξυλίου, και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία υψηλού αλκαλικού περιβάλλοντος γύρω από το χάλυβα.[13]

Οι μέθοδοι αντιμετώπισης του προβλήματος γνωρίζουν σημαντική αύξηση. Εδώ αναφέρονται οι πλέον γνωστές και διαδεδομένες. Η έρευνα συνεχίζεται τόσο στον τομέα των υλικών, όσο και αναφορικά με τις ίδιες τις μεθοδολογίες.

6. ΕΠΙΛΟΓΟΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Η θεμελιώδης απαίτηση για τις επισκευές σε θαλάσσιο ή παράκτιο περιβάλλον, ή ακόμα και σε περιβάλλοντα συχνής χρήσης άλατος για την τήξη των πάγων, είναι η παρεμπόδιση της διάβρωσης.
2. Τα πλεονεκτήματα των εποξειδικών κονιαμάτων, όπως η μηχανική αντοχή, η καλή προσκόλληση, η μικρή συρρίκνωση, η ευκολία εφαρμογής και κυρίως, στην περίπτωση της διάβρωσης, η καλή χημική αντίσταση και η μικρή έως μηδαμινή διαπερατότητα συχνά δικαιολογούν τη χρήση τους, παρά το μεγάλο κόστος, ιδιαίτερα για τις θαλάσσιες και παράκτιες κατασκευές.
3. Πλήρης παράθεση όλων των μεθόδων και τεχνολογιών τόσο από την πλευρά της αποτίμησης όσο και της επισκευής, απαιτεί μεγάλη έκταση, καθώς η επιστήμη αυτή συνεχώς αναπτύσσεται, στην εποχή μας.
4. Με δεδομένο το υψηλό κόστος των ανοξειδωτων χαλύβων που θα μπορούσαν να λύσουν, σε μεγάλο βαθμό το πρόβλημα, οι εναλλακτικές αυτές μέθοδοι και η έρευνα γύρω από αυτές συγκεντρώνουν εύλογα το επιστημονικό και κατασκευαστικό ενδιαφέρον.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Anders Lindvall, “Environmental actions and response – reinforced concrete structures exposed in road and marine environment”, Chalmers University of Technology SE-412 96 Göteborg
- [2] N.C.Kothari, “Problems associated with deterioration and repairs of concrete piles in marine environment”, Concrete Structures, pp. 411-432
- [3] G.Malumbela, M.Alexander, P.Moyo, “Serviceability of corrosion-affected RC beams after patch repairs and FRPs under load”, Materials&Structures (2011) 44,pp. 331–349
- [4] A.Nanni, W.L.Lista, “Concrete cracking in coastal areas: problems and solutions”, Concrete International
- [5] Θ.Π.Τάσιος, Κ.Αλιγιζάκη, «Ανθεκτικότητα Ωπλισμένου Σκυροδέματος», Αθήνα 1993
- [6] R.N.Swamy, S.Tanikawa, “A highly elastic surface coating to protect structures exposed to coastal/marine environments”, Concrete Structures, pp. 1-18
- [7] Standing committee on concrete technology, “Recommended specification for RC in marine environment”
- [8] W.J.McCarter, T.M.Chrisp, G.Starrs, A.Adamson, E.Owens, P.A.M.Basheer, S.V.Nanukuttan, N.Holmes, “A remote interrogation system for monitoring concrete performance exposed to environmental action”
- [9] Ε.Γ.Παπαδάκης, «Υπολογισμός διάρκειας ζωής οπλισμένου σκυροδέματος, λόγω διάβρωσης οπλισμού», Ημερίδα τεχνολογίας σκυροδέματος & χαλύβων, ΤΕΕ, Ιωάννινα, 4.12.2004
- [10] Χάρης Αλκ. Αποστολόπουλος, Χρήστος Ροδόπουλος, «Προβλήματα από διάβρωση του σιδηροοπλισμού των κατασκευών», περιοδικό Σκυρόδεμα και χάλυβας
- [11] M.Frangou, K.Pilakoutas, S.Dritsos, “Structural repair/strengthening of rc columns”, Construction and building materials 1995, vol. 9, No 5
- [12] Τεχνικές Λύσεις Αφού Α.Παναγόπουλοι, Επισκευές, Ενανθράκωση
- [13] Π.Λαμπροπούλου, Ζ.Τρομπουκη, «Επιθεώρηση & αποκατάσταση υποστυλωμάτων γέφυρας ο/σ σε θαλάσσιο περιβάλλον που έχουν υποστεί βλάβες λόγω διάβρωσης», 9ο Φοιτητικό Συνέδριο «Επισκευές Κατασκευών», Μάρτιος 2003
- [14] <http://grc.sika.com/el/group.html>