

## ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ-ΜΕΤΡΑ ΕΠΕΜΒΑΣΗΣ

### ΚΟΥΡΝΕΤΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

#### Περίληψη

*Ένα φαινόμενο που συναντά πολλές φορές ο πολιτικός μηχανικός είναι η διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος, φαινόμενο το οποίο απαντάται πολύ συχνά στη χώρα μας εξαιτίας των κλιματολογικών συνθηκών. Η διάβρωση αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα που προκαλεί φθορές και διάφορα άλλα προβλήματα σε κατασκευές, κυρίως σε παραθαλάσσιες περιοχές, όπου έχουμε υψηλό βαθμό προσβολής από χημικές ουσίες. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη των αιτιών, η εξέταση της προέλευσης των προβλημάτων (αν τα αίτια είναι φυσικά ή προέρχονται από εξωγενείς παράγοντες), και τέλος η διερεύνηση του θέματος της αντιμετώπισης των προβλημάτων, καθώς τίθεται το ερώτημα για το αν μπορούμε να ενισχύσουμε την κατασκευή ή να την ανακατασκευάσουμε.*

#### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Διάβρωση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο πραγματοποιούνται χημικές αντιδράσεις, οι οποίες αλλάζουν τη χημική σύσταση του οπλισμού του σκυροδέματος, με αποτελέσματα δόλου ασήμαντα για να τα αγνοήσουμε. Παρατηρείται σημαντική μείωση της αντοχής καθώς και της λειτουργικότητάς της κατασκευής. Επιπλέον και από αισθητικής απόψεως έχουμε αρνητικές επιπτώσεις. Όλα αυτά καθιστούν απαραίτητη την προσοχή του πολιτικού μηχανικού. Οι παράγοντες που την επηρεάζουν είναι πολλοί, είτε φυσικοί (κλιματολογικές συνθήκες περιβάλλοντος, τοπογραφία), είτε εξωγενείς (κακός σχεδιασμός). Κύριες αιτίες είναι η ενανθράκωση και η διείδυση χλωριόντων, διαδικασίες που δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, καθώς η πρώτη προκαλεί ραγδαία επιτάχυνση στη δεύτερη. Μεγάλες επιπτώσεις συναντώνται στα λιμενικά έργα, αλλά και σε κατοικίες σε παραθαλάσσιες περιοχές, αφού η παρουσία του άλατος οξύνει το πρόβλημα. Πρακτικά είναι αδύνατο να παράγουμε σκυρόδεμα που να αποτρέπει πλήρως τη διάβρωση του οπλισμού, συνεπώς είναι μία πραγματικότητα με την οποία μαθαίνουμε να ζούμε και να αντιμετωπίζουμε [1].

#### 1.ΑΙΤΙΑ

Το βασικό πρόβλημα του οπλισμένου σκυροδέματος από απόψεως ανθεκτικότητας σε διάρκεια είναι η διάβρωση των οπλισμών. Αυτό συμβαίνει διότι σε αντίθεση με άλλες χώρες, στην Ελλάδα είναι εξαιρετικά σπάνιο το ενδεχόμενο σταδιακής αποσύνθεσης του σκυροδέματος λόγω εναλλαγών πήξεως-τήξεως του νερού των πόρων, ή λόγω προσβολής (πυριτικών) αδρανών από την αλκαλικότητα του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Οι ράβδοι οπλισμού προστατεύονται από τη διάβρωση μέσω ενός πολύ λεπτού επιφανειακού στρώματος ένυδρου οξειδίου του σιδήρου, που δημιουργείται λόγω της υψηλής αλκαλικότητας του σκυροδέματος που τις περιβάλλει. Η αλκαλικότητα αυτή χαρακτηρίζεται από μία τιμή του pH γύρω στο 12.5, που αντιστοιχεί στην υπό συνθήκη θερμοκρασία συγκέντρωση ισορροπίας του υδροξειδίου του ασβεστίου  $\text{Ca(OH)}_2$ , στο νερό των πόρων. Όταν το pH όμως πέσει σε τιμές κάτω από 9.0, τότε λέμε ότι ο χάλυβας του οπλισμού αποπαθητικοποιήθηκε, κι έχουμε τη διάβρωση του οπλισμού. Στην πτώση αυτή οδηγούν δύο αλληλένδετες διαδικασίες, η ενανθράκωση και η επίδραση χλωριόντων [1].

#### 1.1.ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ

Η μείωση του pH του σκυροδέματος σε τιμές κάτω του 9.0 οφείλεται στην αντίδραση του  $\text{Ca(OH)}_2$  του νερού των πόρων (και γενικότερα του στερεού ιστού του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού) με το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) της ατμόσφαιρας, που σταδιακά διαχέεται προς το εσωτερικό του σκυροδέματος μέσω της αέριας φάσης των πόρων. Η

διαδικασία αυτή, που έχει σαν αποτέλεσμα τη μετατροπή του  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  σε ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{CaCO}_3$ ), ονομάζεται ενανθράκωση του σκυροδέματος [1].

Η ύπαρξη του  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  μαζί με αυτή άλλων υδροξειδίων που υπάρχουν σε μικρότερες ποσότητες εξασφαλίζουν στους οπλισμούς ένα προστατευτικό, έντονα αλκαλικό περιβάλλον ( $\text{pH} \approx 12,5$ ). Όπως αναφέραμε παραπάνω, σ' αυτό το περιβάλλον ένα λεπτό στρώμα οξειδίων και υπεροξειδίων προστατεύει το χάλυβα από τη διάβρωση. Το στρώμα αυτό δε σταματά τη διάβρωση, αλλά περιορίζει σημαντικά τους ρυθμούς εξέλιξής της. Η μετατροπή όμως του  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  σε ασβεστόλιθο με τη βοήθεια του ανθρακικού οξέος, που προκύπτει από την ένωση του  $\text{CaO}$  με  $\text{H}_2\text{O}$ , μειώνει σταδιακά την αλκαλικότητα στο περιβάλλον του οπλισμού, μέχρι να τη ρίξει σε επίπεδα που η παθητική προστασία που παρέχει το επικαλυπτικό στρώμα αναιρείται. Το pH που σηματοδοτεί αυτή τη μετάβαση είναι γύρω στο 9, ενώ ένα πλήρως ενανθρακωμένο σκυρόδεμα έχει  $\text{pH} \approx 8$ .

Η ενανθράκωση δεν αποτελεί πρόβλημα για το σκυρόδεμα καθαυτό. Απεναντίας, η μετατροπή του υδροξειδίου του ασβεστίου σε ασβεστόλιθο δίνει ένα πιο πυκνό υλικό (χαμηλό πορώδες) με μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή. Το πρόβλημα έχει να κάνει με την προστασία του οπλισμού, καθώς αποτελεί την κερκόπορτα για τη διάβρωσή του. Μπορούμε να την κατατάξουμε στις χημικές διεργασίες φθοράς και απαξίωσης του οπλισμού σκυροδέματος σε αντιδιαστολή με άλλες π.χ. μηχανικές, φυσικές, βιολογικές. Σε περιοχές μάλιστα όπου υπάρχουν και χλωριούχες ενώσεις όπως σε παραθαλάσσιες περιοχές, η συνεργιστική δράση ενανθράκωσης και χλωριόντων μπορεί να είναι καταλυτική.

Η ενανθράκωση είναι το φαινόμενο εκείνο που περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο μας έκανε να συνειδητοποιήσουμε ότι το οπλισμένο σκυρόδεμα γερνάει και απαξιώνεται. Τα ποσά που ήδη δαπανώνται για τη δομική αποκατάσταση μεγάλων τεχνικών έργων – όπως γέφυρες – προκαλούν δέος. Στο άμεσο μέλλον θα εκτοξευτούν σε δυσθεώρητα ύψη για πολλά χρόνια. Η τάση αυτή θα κοπάσει όταν αρχίζουν να αποδίδουν τα μέτρα που μόλις τώρα αρχίζουν να λαμβάνονται για την καλύτερη προστασία των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα [2].

## 1.2.ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ

Το επιφανειακό στρώμα ένυδρου οξειδίου που προστατεύει τις ράβδους οπλισμού, μπορεί να διατηρηθεί τοπικά από χλωριόντα, εάν η συγκέντρωση των τελευταίων υπερβαίνει το 0.4-0.6% του βάρους του τσιμέντου. Είναι δυνατόν ακόμη και να διαλυθεί, λόγω μείωσης της αλκαλικότητας του σκυροδέματος γύρω από τη ράβδο σε τιμές του pH κάτω του 9. Τα χλωριόντα που αυτά μπορεί να προέρχονται είτε από το εσωτερικό του σκυροδέματος, εάν έχουν χρησιμοποιηθεί συλλεκτά αδρανή από παραλίες ή θαλασσινό νερό (συνηθισμένες πρακτικές στη νησιωτική Ελλάδα), ή πρόσμικτα βελτιωτικά του σκυροδέματος που περιέχουν χλωριούχα άλατα, είτε από το φυσικό περιβάλλον. Η δεύτερη περίπτωση είναι πολύ συνηθισμένη σε παραθαλάσσιες περιοχές της Ελλάδας, όπου μέχρι σε μεγάλη απόσταση από την ακτή ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει χλωριούχα άλατα, ιδίως αν οι επικρατούντες άνεμοι κατευθύνονται από τη θάλασσα προς την ξηρά [1].

## 2.ΜΟΡΦΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

### 2.1.ΓΕΝΙΚΗ Η ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Η επιφάνεια του μετάλλου καλύπτεται σχεδόν ομοιόμορφα από τα προϊόντα της διάβρωσης. Συμβαίνει όταν η αλκαλικότητα του σκυροδέματος έχει χαθεί σε ευρεία περιοχή. Το προστατευτικό στρώμα καταστρέφεται και αρχίζει η διάβρωση. Αιτίες μείωσης του pH σε ευρεία περιοχή του σκυροδέματος είναι:

- Απόπλυση του  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  από το σκυρόδεμα λόγω επίδρασης μαλακού νερού
- Ενανθράκωση του σκυροδέματος

- Επίδραση ανθρακικών ή θεικών αλάτων (έχει παρατηρηθεί χωρίς όμως να έχει ακόμα τεκμηριωθεί πλήρως)

## 2.2.ΤΟΠΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

### I) Διάβρωση κατά βελονισμό (pitting)

Οφείλεται αποκλειστικά στην επίδραση χλωριόντων που μπορούν να βρεθούν στο σκυρόδεμα είτε εξαρχής είτε να διεισδύσουν από το περιβάλλον αργότερα. Η διείσδυση γίνεται μέσω πόρων εξ ολοκλήρου ή μερικώς γεμάτων με νερό. Ιδιαίτερα επικίνδυνη είναι η εναλλασσόμενη διαβροχή και ξήρανση της επιφάνειας του σκυροδέματος από νερό το οποίο περιέχει χλωριούχα άλατα. Από τα χλωριόντα που υπάρχουν στο σκυρόδεμα, μια ποσότητα δεσμεύεται χημικά από τον τσιμεντοπολτό, ενώ τα υπόλοιπα χλωριόντα παραμένουν ελεύθερα. Η διάβρωση του χάλυβα προκαλείται από τα ελεύθερα χλωριόντα. Το τσιμέντο μπορεί να δεσμεύσει ποσότητα χλωριόντων μέχρι 0.4-0.6% του βάρους του τσιμέντου. Σχηματίζεται έτσι άλας Friedell [ $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ] το οποίο είναι αβλαβές για τον οπλισμό. Με την παρουσία θεικών αλάτων ή μετά από ενανθράκωση του σκυροδέματος, το άλας Friedell διασπάται ελευθερώνοντας τα χλωριόντα. Έτσι μετά την ενανθράκωση, ο κίνδυνος διαβρώσεων των σιδηροπλισμών αυξάνεται, ακόμα και αν το σκυρόδεμα περιέχει μικρές ποσότητες χλωριόντων.

### II) Μικρορρηγματώδης διάβρωση (crevice)

Είναι ανάλογη με τη διάβρωση κατά βελονισμό. Η διαφορά είναι ότι αρχίζει σε μικρορρηγμές και μικροκοιλότητες στην επιφάνεια του χάλυβα και όχι σε «υγιή» επιφάνεια.

### III) Διάβρωση μεταξύ των κόκκων (intergranular)

Εμφανίζεται μέσα στο μέταλλο και όχι στην επιφάνεια του. Συμβαίνει κυρίως σε κράματα και υπάρχει διαφορά δυναμικού. Με μικρές ποσότητες άνθρακα (μικρότερη από 0.05%) η διάβρωση αυτή αποφεύγεται.

## 2.3.ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΛΟΓΩ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

### I) Γαλβανική δράση (galvanic)

Είναι ηλεκτροχημική δράση η οποία αναπτύσσεται όταν δύο διαφορετικά μέταλλα έρχονται σε επαφή μεταξύ τους. Κάθε μέταλλο έχει το δικό του κανονικό δυναμικό. Όταν δύο μέταλλα έρχονται σε επαφή μεταξύ τους παρουσία μικρής ποσότητας υγρασίας σχηματίζουν ένα μικρό ηλεκτροστοιχείο διάβρωσης. Κίνδυνος διάβρωσης υπάρχει όταν η διαφορά δυναμικού των δύο μετάλλων είναι μεγαλύτερη από 50 mV. Η διάβρωση γίνεται ιδιαίτερα επικίνδυνη με την παρουσία χλωριούχων ή θεικών αλάτων.

### II) Ηλεκτρολυτική διάβρωση (electrolytic)

Είναι αποτέλεσμα άμεσης εφαρμογής ρεύματος στην κατασκευή από κάποια εξωτερική πηγή. Μπορεί να περιοριστεί με:

- Σκυρόδεμα πολύ καλής ποιότητας χωρίς χλωριόντα
- Ηλεκτρική μόνωση (π.χ. διάφραγμα πολυαιθυλενίου) μεταξύ της πηγής του ηλεκτρικού ρεύματος και της κατασκευής.

## 2.4.ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΥΠΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΑΣΗ (STRESS-CORROSION)

Εμφανίζεται σε χάλυβες υψηλής αντοχής υπό τάσεις μεγαλύτερες από 0.8fpy. Δε δημιουργείται σκουριά και δεν παρατηρείται απώλεια της διατομής λόγω διάβρωσης. Ο μηχανισμός είναι πολύπλοκος και δεν έχει αποσαφηνισθεί πλήρως. Οφείλεται στον συνδυασμό διαβρωτικού περιβάλλοντος και στην ανάπτυξη πρόσθετης διαφοράς δυναμικού. Η διάβρωση του χάλυβα υπό μηχανική τάση μπορεί να συνοδεύεται από ψαθυροποίηση του χάλυβα λόγω εκλύσεως υδρογόνου. Τα χλωριόντα επιταχύνουν πολύ τη διάβρωση όλων σχεδόν των χαλύβων εκτός από τους χάλυβες οι οποίοι περιέχουν μεγάλες ποσότητες νικελίου [4].

Η ομοιόμορφη και η τοπική διάβρωση είναι οι πιο συνηθισμένες μορφές που συναντά ο πολιτικός μηχανικός στην πράξη. Επιπλέον εντοπίζονται εύκολα, καθώς είναι εύκολα ορατές. Η βασική διαφορά τους είναι πως η ομοιόμορφη διάβρωση παρουσιάζεται ομοιόμορφα κατά μήκος της ράβδου οπλισμού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: ομοιόμορφη διάβρωση

Αντίθετα, η τοπική διάβρωση παρουσιάζεται σε συγκεκριμένες θέσεις. Στην Εικόνα 2 βλέπουμε πλάκα, η οποία έχει υποστεί τοπική διάβρωση που προήλθε από συγκέντρωση υδάτων ακριβώς πάνω από εκείνο το σημείο, καθώς λόγω προβλήματος στο σωλήνα υδρορροής συγκεντρώθηκε νερό σε σημείο όπου το σκυρόδεμα παρουσίαζε μικρή καμπή.



Εικόνα 2: τοπική διάβρωση

### **3.Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ**

Όταν το μέτωπο της ενανθράκωσης φθάσει στην περιοχή του οπλισμού, η συνεπαγόμενη μείωση της αλκαλικότητας αδρανοποιεί την παθητική προστασία που προσφέρουν στους

οπλισμούς τα επιφανειακά, σταθερά στρώματα από τα υδροξείδια του σιδήρου και του ασβεστίου. Πλέον ο δρόμος είναι ανοικτός για την έναρξη της διαδικασίας διάβρωσης.

Η διάβρωση του σιδήρου είναι μια ηλεκτροχημική διαδικασία, γιατί εμπεριέχει ροή ηλεκτρονίων και ιόντων. Το ρόλο της ανόδου και της καθόδου μπορούν να παίξουν ξεχωριστές περιοχές του ίδιου οπλισμού που έχουν διαφορετικά ενεργειακά επίπεδα για να εξασφαλιστεί και η απαραίτητη διαφορά δυναμικού. Το ρόλο του ηλεκτρολύτη παίζει το περιβάλλον υγρό μπετόν. Ο ηλεκτρολύτης μεταφέρει στην κάθοδο τα κατιόντα που παράγονται στην άνοδο. Η διάβρωση επιταχύνεται όταν οι πόροι του μπετόν δεν περιέχουν μόνο καθαρό νερό αλλά και άλατα, κυρίως χλωριούχα. Το ρόλο της μεταλλικής σύνδεσης που μεταφέρει τα ηλεκτρόνια παίζει ο ίδιος οπλισμός.



Εικόνα 3:στοιχείο που έχει υποστεί διάβρωση [2]

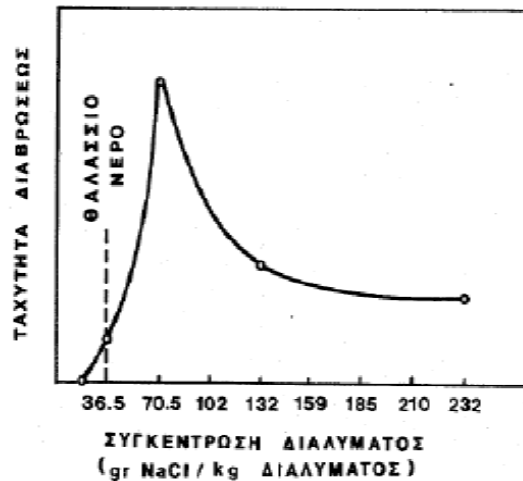
#### 4.ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

Η ταχύτητα διάβρωσης του χάλυβα αυξάνεται, τόσο εντός όσο και εκτός σκυροδέματος, με:

- Την αύξηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας.
- Την μείωση του pH.
- Την αύξηση της παρουσίας αλάτων.
- Την επαφή του χάλυβα με το έδαφος ή το νερό.
- Την επαφή του χάλυβα με διαφορετικά υλικά ή περιβάλλοντα.

Οι συχνές μεταβολές των πιο πάνω παραγόντων επηρεάζουν περαιτέρω την ταχύτητα της διάβρωσης. Άλλοι παράγοντες που την επηρεάζουν όμως είναι και οι εξής:

- Η ύπαρξη ενεργών "κέντρων" στην επιφάνεια του χάλυβα (όπως για παράδειγμα οξείες αιχμές ή πληγές, κάμψεις με μικρή ακτίνα καμπυλότητας).
- Η επαφή χαλύβων διαφορετικού είδους και διαφορετικού ηλεκτροχημικού δυναμικού.
- Η επαφή χαλύβων διαφορετικού βαθμού διάβρωσης.
- Η ψυχρή κατεργασία (ολκή, έλαση).
- Το αυξημένο πορώδες του σκυροδέματος [5].

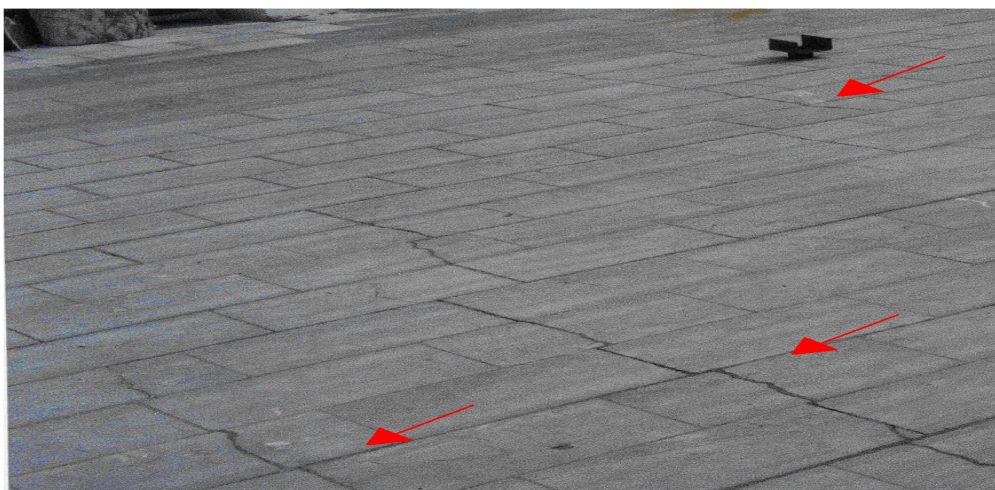


Σχήμα 1: Μεταβολή της ταχύτητας διάβρωσης σε σχέση με τη συγκέντρωση του Χλωριούχου Νατρίου [4].

## 5.ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ

Τα προϊόντα που παράγονται από τις αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την ενανθράκωση αντιδρούν μεταξύ τους και παράγουν υδροξείδια του σιδήρου, δηλαδή σκουριά. Η σκουριά εναποτίθεται στη ράβδο στις περιοχές των καθόδων και επειδή είναι διαπερατή τόσο από το νερό όσο και από τα αέρια, η διαδικασία οξείδωσης συνεχίζεται. Νέα προϊόντα σκουριάς παράγονται με περαιτέρω αντιδράσεις με το διαλυμένο οξυγόνο. Ο όγκος των παραγόμενων προϊόντων σκουριάς διαρκώς αυξάνει κι οι συνοδευτικές αυξανόμενες εσωτερικές τάσεις προκαλούν ρηγματώσεις, αποτινάξεις και αποκολλήσεις ολόκληρων κομματιών από σκυρόδεμα.[2]

Οι ρηγματώσεις αποτελούν έναν ακόμη αρωγό της διάβρωσης, καθώς το νερό βρίσκει δίοδο ώστε να έρθει σε επαφή με τον οπλισμό. Για παράδειγμα, βλέπουμε στην Εικόνα 4, ρωγμές που προκλήθηκαν στην ταράτσα κατοικίας, από τις οποίες πραγματοποιούνται υδρορροές. Έτσι το νερό περνά κάτω από τις πλάκες, και σε συνδυασμό με τις μεταβολές θερμοκρασίας, με την πάροδο του χρόνου οδηγηθήκαμε στη ρηγματώση της ταράτσας και των πλακών που έχουν τοποθετηθεί πάνω της. Μέρα με τη μέρα λοιπόν ο οπλισμός που έρχεται σε επαφή με την υγρασία οξειδώνεται και διογκώνει τις ρωγμές. Με αυτόν τον τρόπο, προκαλείται η διάβρωση του οπλισμού στο κάτω μέρος της πλάκας που φαίνεται στην Εικόνα 5 [3].



Εικόνα 4: Ρωγμές σε ταράτσα κατοικίας



Εικόνα 5: διαβρωμένη πλάκα

## 6. ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΑ ΜΕΤΡΑ

Προληπτικά μέτρα που λαμβάνονται είναι τα εξής:

1. Το περιβάλλον. Περιβάλλοντα στα οποία υπάρχει αυξημένη περιεκτικότητα του αέρα σε  $\text{CO}_2$  επιταχύνουν τις διαδικασίες ενανθράκωσης. Τέτοια περιβάλλοντα είναι τα βιομηχανικά και τα αστικά. Στις αγροτικές περιοχές η ενανθράκωση εξελίσσεται με βραδύτερους ρυθμούς. Σε επίπεδο μικροπεριβάλλοντος, ιδιαίτερα επιβαρυνμένα είναι τα πάρκινγκ αυτοκινήτων λόγω των αυξημένων εκπομπών σε  $\text{CO}_2$ . Για τον ίδιο λόγο, στα αστικά περιβάλλοντα οι χαμηλότεροι όροφοι είναι πάντα πιο επιβαρυνμένοι από τους υψηλότερους.

2. Το πάχος και η ποιότητα επικάλυψης των οπλισμών. Προφανώς μεγάλες επικαλύψεις προσφέρουν μακρόχρονη προστασία. Όσον αφορά την ποιότητα της επικάλυψης, αυτή βελτιώνεται:

Α) με τη μείωση του πορώδους, το οποίο πρέπει να μένει σε επίπεδα μικρότερα του 0,50.

Β) με την αύξηση της ποσότητας του τσιμέντου, καθώς έτσι αυξάνεται η ποσότητα του προστατευτικού  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Γ) με καλή συμπύκνωση και ωρίμανση: μείωση κακοτεχνιών, φωλιών αδρανών, ρωγμών.

3. Σχετική υγρασία του σκυροδέματος (Σ.Υ.). Μια Σ.Υ. της τάξης του 50-60% θεωρείται η ως πιο επιβαρυντική για την εξέλιξη της ενανθράκωσης. Όταν έχουμε Σ.Υ.  $\approx 40\%$  η διαδικασία επιβραδύνεται, γιατί δεν μπορεί να υπάρξει διάλυση του  $\text{CO}_2$  στο νερό και σχηματισμός  $\text{H}_2\text{CO}_3$ . Σε επίπεδα Σ.Υ.  $\approx 20\%$  η ενανθράκωση πρακτικά μηδενίζεται. Στο άλλο άκρο, όταν η σχετική υγρασία του μπετόν προσεγγίζει το 85-90%, το  $\text{CO}_2$  δεν μπορεί να διεισδύσει επειδή οι πόροι του μπετόν είναι γεμάτοι με νερό.

4. Ύπαρξη ρωγμών. Έλεγχος του αριθμού και του εύρους τους τόσο στο νωπό όσο και στο σκληρυμένο σκυρόδεμα οδηγεί σε καλύτερο έλεγχο της ενανθράκωσης. Έλεγχος της ρηγμάτωσης μπορεί να γίνει με μέτρα όπως: χρήση συνθετικών ινών, προσεγμένη συντήρηση, χάραξη αρμών διαστολής, επαρκή οπλισμό.

5. Φράγματα κατά της ενανθράκωσης. Πρόκειται για βαφές, εμποτισμούς ή και λεπτά επιχρίσματα που λειτουργούν σαν φράγματα κατά της εισόδου του  $\text{CO}_2$ . Τα υλικά αυτά είναι συνήθως διαπερατά από τους υδρατμούς, γιατί το μόριο του  $\text{H}_2\text{O}$  είναι μικρότερο από αυτό του  $\text{CO}_2$ . [2]

6. Ανοξειδωτοι Χάλυβες. Με τη χρήση ανοξειδωτων χαλύβων, χωρίς ειδικές προϋποθέσεις συνεχούς συντήρησης και παρακολούθησης των κατασκευών, καλύπτονται οι απαιτήσεις προστασίας των οπλισμών από τη διάβρωση ακόμα και σε περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται εξόχως διαβρωτικά (παραθαλάσσιες περιοχές, λιμενικά έργα, κατασκευές σε χημικές βιομηχανίες και βιομηχανίες τροφίμων). Η ανθεκτικότητα σε διάβρωση των

ανοξειδωτων χαλύβων επιτυγχάνεται με την παθητικοποίηση της επιφάνειάς τους λόγω του σχηματιζόμενου λεπτού επιφανειακού στρώματος οξειδίου του χρωμίου το οποίο εμποδίζει την περαιτέρω διάβρωση (προσθήκη χρωμίου σε ποσοστά συνήθως από 16% έως 20%). Εκτός από την προσθήκη χρωμίου, και η προσθήκη νικελίου (σε ποσοστά συνήθως από 8% έως 10%) έχει ως συνέπεια τον σχηματισμό ωστενιτικών ανοξειδωτων χαλύβων. Για την περαιτέρω αύξηση της ανθεκτικότητας, ιδίως παρουσία χλωριόντων, προστίθεται μολυβδένιο (Mo) σε ποσοστά συνήθως από 2% έως 3,5%. Τέλος, η ανθεκτικότητα σε διάβρωση αυξάνεται όσο μειώνεται το πλήθος των φάσεων στη μάζα του υλικού. Ειδικότερα, στους μονοφασικούς χάλυβες (όπως είναι οι ωστενιτικοί) εξασφαλίζεται η μή δημιουργία ημιστοιχείων δυναμικού διάβρωσης (γεγονός το οποίο συμβαίνει στην περίπτωση περισσοτέρων της μιας φάσεων) και έτσι αποτρέπεται η έναρξη της διάβρωσης. Γενικώς, οι ανοξειδωτοι χάλυβες διακρίνονται σε ωστενιτικούς, φερριτικούς, μαρτενσιτικούς και duplex (συνδυασμός ωστενιτικών και φερριτικών). Οι πλέον διαδεδομένες κατηγορίες ανοξειδωτων χαλύβων που χρησιμοποιούνται ως χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος είναι οι χρωμονικελιούχοι ωστενιτικοί. Η επιλογή της κατάλληλης σύνθεσης υπαγορεύεται από τις απαιτήσεις και τα ειδικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος (το οποίο αυξάνεται όσο αυξάνονται οι αναλογίες των κραματικών στοιχείων), αλλά και της δυνατότητας παραγωγής στις απαιτούμενες διαστάσεις και διατομές [5].

## 7. ΜΕΤΡΑ ΕΠΕΜΒΑΣΗΣ

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκαλεί η διάβρωση, ακολουθείται η εξής σειρά εργασιών:

### 1. Προετοιμασία επιφανειών

Κατ' αρχήν μπορούμε να πάρουμε μια εικόνα για το βάθος της ενανθράκωσης με το κλασικό τεστ της φαινολοφθαλείνης. Η σωστή προετοιμασία σημαίνει δύο πράγματα:

α) Οι επιφάνειες που θα δεχθούν τα επισκευαστικά υλικά πρέπει να είναι καθαρές, υγιείς και συνεκτικές.

β) Ο σιδηρός οπλισμός πρέπει να είναι καθαρός, απαλλαγμένος από κάθε σκουριά. Όταν το πρόβλημα είναι η ενανθράκωση και δεν υπάρχουν χλωριόντα, οι απαιτήσεις δεν είναι τόσο αυστηρές και η ελαφριά σκουριά είναι ανεκτή. Η απομάκρυνση του ενανθρακωμένου μπετόν γίνεται προσεκτικά με σφυροκάλεμο. Οι οπλισμοί αποκαλύπτονται εάν είναι δυνατόν πανταχόθεν, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.



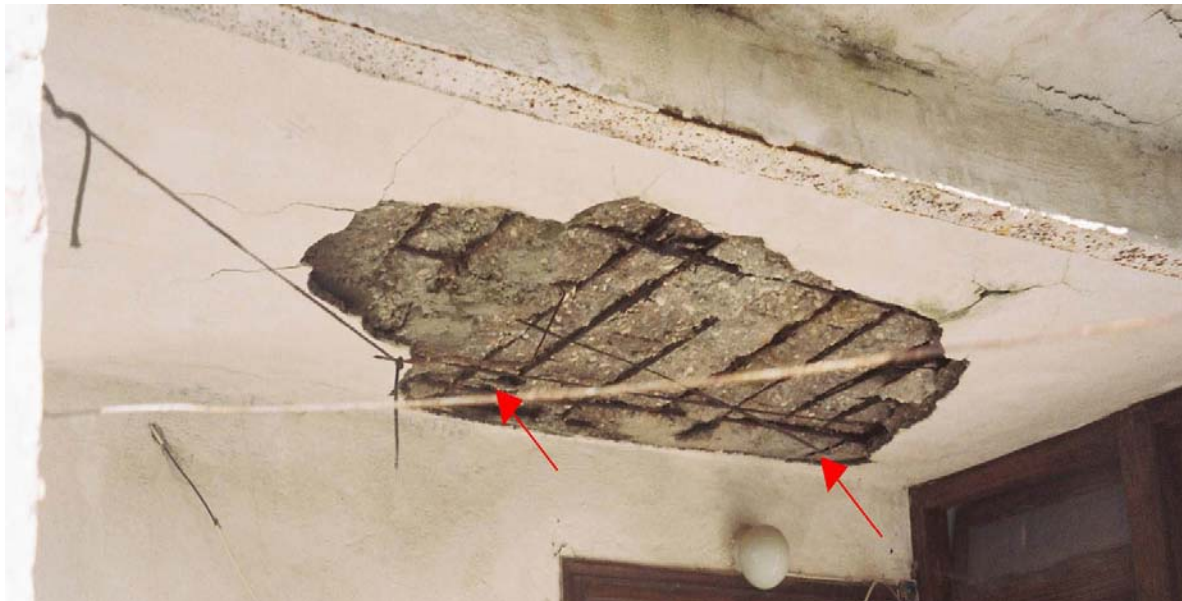
Εικόνα 6: υποστυλώματα γέφυρας που έχουν υποστεί διάβρωση [2]



Οι επιφάνειες σκάβονται κάθετα κι αν είναι δυνατόν, σε αμβλείες γωνίες για να αγκυρωθεί καλά το επισκευαστικό κονίαμα. Ελέγχεται η κατάσταση των οπλισμών. Εάν υπάρξει ανάγκη αντικατάστασης τμήματος οπλισμού, αυτή θα γίνει υπό την επίβλεψη και τις οδηγίες έμπειρου μηχανικού. Εάν η σκουριά έχει προχωρήσει πολύ, τότε ο οπλισμός επί της ουσίας έχει αχρηστευθεί, κι έτσι δεν μπορούμε να ενισχύσουμε την κατασκευή, αλλά θα πρέπει να προβούμε σε συνολική ανακατασκευή.

Οι οπλισμοί καθαρίζονται χειρωνακτικά με κατάλληλη συρματόβουρτσα. Το ζητούμενο είναι να φθάσουμε σε καθαρό μέταλλο. Δουλειές μεγάλης έκτασης θα απαιτήσουν αμμοβολή. Εάν η πλήρης αποκάλυψη του οπλισμού είναι ανέφικτη, μπορεί να γίνει μια τοπική επάλειψη με εμποτιστικούς αναστολείς διάβρωσης. Για τις εργασίες καθαρισμού απαιτούνται κατάλληλες καιρικές συνθήκες (Σ.Υ. περιβάλλοντος <70%, όχι απειλή βροχής).

2. Οι οπλισμοί προστατεύονται με επαλειφόμενα κονιάματα ενός ή δύο συστατικών που περιέχουν αναστολείς διάβρωσης. Συνήθως απαιτούνται δύο στρώσεις με διαφορά 1-3 ωρών ανάλογα με τη θερμοκρασία. Πάχος επικάλυψης: 1-2mm. Τα υλικά αυτά προσφύονται τέλεια στους οπλισμούς, στο μπετόν και στα κάθε είδους επισκευαστικά κονιάματα. Στην περίπτωση δε που έχουμε αποκόλληση ράβδου οπλισμού, όπως στην Εικόνα 7, αφού καθαρίσουμε τον παλιό οπλισμό τοποθετούμε νέα τμήματα από υγιή οπλισμό και ματίζουμε.



Εικόνα 7: οπλισμός που έχει αποκολληθεί

Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στους χρόνους εργασιμότητας σε όλα τα επισκευαστικά υλικά. Πρέπει να ετοιμάζονται ποσότητες που να μπορούν να καταναλωθούν εντός των υπαρχόντων χρονικών ορίων.

3. Ήρθε η ώρα του κυρίως επισκευαστικού υλικού. Συνήθως πρόκειται για τσιμεντοειδούς βάσης υλικά τροποποιημένα με πολυμερή και πιθανώς ενισχυμένα με προσθήκη ινών. Αυτά τα υλικά θα γεμίσουν τη διατομή και θα έρθουν πρόσωπο με το σκυρόδεμα εάν το φινίρισμά τους επιτρέπει να δεχθούν βαφή. Είναι άκρως επιθυμητό αυτά τα κονιάματα να διαθέτουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Μηδενική συρρίκνωση: Δεν θα παρουσιάσουν ρωγμές πλαστικής συρρίκνωσης και δεν θα διαχωριστούν από το συνορεύον σκυρόδεμα.
- Λείο φινίρισμα: Έτσι αποφεύγεται το κόστος και ο χρόνος που απαιτεί η εφαρμογή πρόσθετης εξομαλυντικής στρώσης πριν από τη βαφή.
- Στεγανότητα έναντι του νερού, των υδρατμών και χημικών παραγόντων.

- Μέτρο ελαστικότητας, μηχανικές αντοχές και συντελεστής θερμικής διαστολής παρόμοιο με του σκυροδέματος, έτσι ώστε το σύστημα να έχει μια ομοιογένεια.

Τα επισκευαστικά τσιμεντοειδή ανάλογα με την κοκκομετρία τους τοποθετούνται σε στρώσεις ορισμένου πάχους. Τρία πράγματα πρέπει να προσεχθούν ιδιαίτερα σ' αυτά τα κονιάματα:

α. Το νερό πρέπει να είναι το απολύτως αναγκαίο. Συνήθως δεν απαιτείται προσθήκη SBR ή ακρυλικών ρητινών.

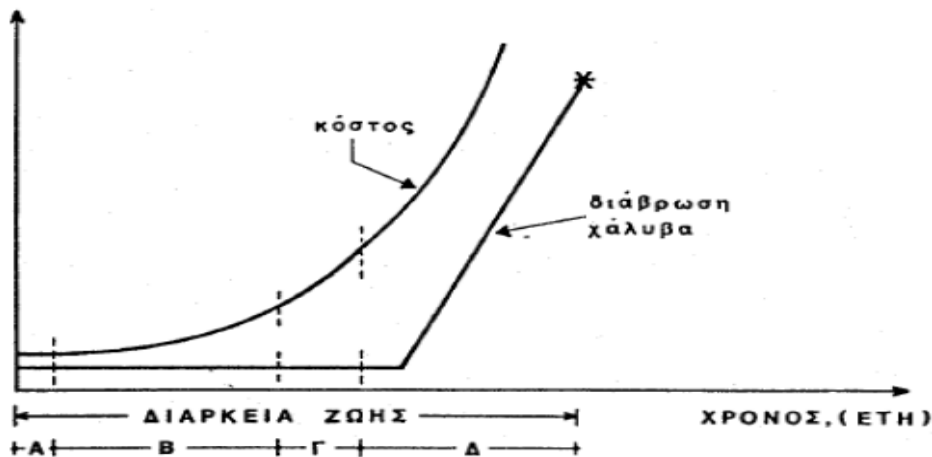
β. Το υπόστρωμα πρέπει να είναι κορεσμένο με νερό. Συνήθως δε χρειάζονται πρόσθετα μέτρα αυξημένης πρόσφυσης. Εάν παρ' ελπίδα υπάρχει επιθυμία για επιπλέον προσφυτική στρώση, ένα μίγμα SBR latex με τσιμέντο 1:1,8 δίνει άριστα αποτελέσματα.

γ. Και το κυριότερο: επιμελής συντήρηση για τουλάχιστον 3 μέρες. Συνεχές βρέξιμο με ή χωρίς λινάτσες.

4. Για να ολοκληρωθεί η επισκευή, συνήθως χρειάζεται μια στρώση προστασίας έναντι της ενανθράκωσης. Επιθυμητά χαρακτηριστικά μιας τέτοιας στρώσης είναι:

- Η πλήρης φραγή στο CO<sub>2</sub>.
- Πλήρης ατμοδιαπερατότητα. Αυτή η ισορροπία μπορεί να επιτευχθεί σχετικά εύκολα μιας και όπως προαναφέραμε το μόριο του CO<sub>2</sub> είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό των υδρατμών.
- Η δυνατότητα ενός άνογου αισθητικού αποτελέσματος.
- Η ικανότητα του συστήματος να γεφυρώνει υπάρχουσες αλλά και μελλοντικές ρωγμές.
- Καλή συμπεριφορά σε συνθήκες αλατονέφωσης (παραθαλάσσιες κατασκευές) [2].

Το κόστος όλης αυτής της διαδικασίας που είναι διόλου αμελητέο, μεταβάλλεται ανάλογα με την περίπτωση και τα υλικά που χρησιμοποιούνται. Στο Σχήμα 2, το οποίο προέκυψε από μελέτη διάφορων περιπτώσεων όπου εξετάστηκε το κόστος συντήρησης της επισκευής και ο βαθμός που είχε προχωρήσει η διάβρωση, παρατηρούμε πως όσο προχωράει ο χρόνος (άρα και η διάβρωση), τόσο αυξάνεται το κόστος [4].



Σχήμα 2: Μεταβολή του κόστους συντήρησης κατασκευής από οπλισμένο σκυροδέμα και της διάβρωσης σε σχέση με το χρόνο [4].

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Κατασκευών, Μ.Φαρδής, Πάτρα 2000.
- [2] [http://monosimacou.blogspot.com/2009/06/blog-post\\_10.html](http://monosimacou.blogspot.com/2009/06/blog-post_10.html): Ενανθράκωση μπετόν και διάβρωση οπλισμών, Χρήστος Στρογγύλης, Πολιτικός Μηχανικός – MBA – DipM
- [3] Πραγματογνωμοσύνη Ιωάννη Πιταρίδη, Πολιτικού Μηχανικού ΕΜΠ

- [4] [http://cyane.org.cy/dynamicdata/newsImages/Michalis\\_Petrou.pdf](http://cyane.org.cy/dynamicdata/newsImages/Michalis_Petrou.pdf): Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος, Διάλεξη Συλλόγου Πολιτικών Μηχανικών Κύπρου, Επαρχιακό Τμήμα Λευκωσίας – Κερύνειας, Μιχάλης Πέτρου
- [5] Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Οπλισμού Σκυροδέματος - ΚΤΧ 2008