

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΕ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ – ΔΙΑΒΡΩΣΗ, ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΚΑΙ
ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ**



ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ: ΑΡΜΕΝΙΑΚΟΥ ΕΥΔΟΚΙΑ, Α.Μ.:5391

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. ΜΠΑΡΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2015

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε από τη σπουδάστρια Αρμενιάκου Ευδοκία. Βασικός της στόχος είναι η παρουσίαση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Ειδικότερα θα αναλυθεί η παραγωγή του οπλισμένου σκυροδέματος. Στη συνέχεια θα μελετηθούν η διαδικασία της ενανθράκωσης και της επίδρασης των χλωριόντων, όπως και οι παράμετροι που τις επηρεάζουν. Επιπλέον θα μελετηθούν διεξοδικά τα φαινόμενα της διάβρωσης και της πυρκαγιάς, όπως και οι επιρροές των φαινομένων αυτών στα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα. Τέλος θα παρουσιαστούν τα μέτρα προστασίας που μπορούν να παρθούν είτε εκ των προτέρων, είτε σε υφιστάμενες κατασκευές που έχουν ήδη προσβληθεί από διάβρωση ή πυρκαγιά. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον εποπτεύοντα καθηγητή Δρ. Δημήτριο Μπάρο για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του και τους γονείς μου για τη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί το φαινόμενο, έργα από οπλισμένο σκυρόδεμα που έχουν κατασκευαστεί πριν από αρκετές δεκαετίες να φτάνουν στο τέλος της χρήσιμης ζωής τους, όχι για το λόγο ότι κρίνονται ως λειτουργικά ανεπαρκή, ούτε επειδή κάποια εξωτερική μηχανική δράση προκάλεσε την αστοχία τους, αλλά εξαιτίας της φυσικής γήρανσής τους. Οπότε το πρόβλημα που καλείται ένας πολιτικός μηχανικός να λύσει, είναι το θέμα της ανθεκτικότητας του οπλισμένου σκυροδέματος σε διάρκεια, πρόβλημα που οφείλεται κυρίως στους μηχανισμούς διάβρωσης. Πρόκειται για ένα πολύπλοκο και συχνά μη προβλέψιμο φαινόμενο καθώς οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση των υλικών (σκυροδέματος, χάλυβα κλπ.) είναι πολλοί.

Ένα ακόμη φαινόμενο που μπορεί να επηρεάσει όχι αυτό καθαυτό το οπλισμένο σκυρόδεμα αλλά τη στατική επάρκεια μιας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα, είναι η πυρκαγιά. Για την ειδική δράση της πυρκαγιάς δεν υπάρχουν σαφείς μέθοδοι υπολογισμού και έτσι το φαινόμενο αντιμετωπίζεται κυρίως εμπειρικά.

Στην παρούσα εργασία θα αναλυθούν διεξοδικά τα παραπάνω φαινόμενα. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά παρουσιάζεται ο τρόπος παρασκευής του οπλισμένου σκυροδέματος. Στη συνέχεια θα αναλυθεί πως η ενανθράκωση και η δράση των χλωριόντων ευνοούν το φαινόμενο της διάβρωσης. Επιπλέον θα δούμε πως προκαλείται η διάβρωση των οπλισμών (σημασία και οικονομικές επιπτώσεις, παράμετροι και παράγοντες επίδρασης, μορφές διάβρωσης, ατμοσφαιρική διάβρωση). Θα γίνει επίσης εκτίμηση της επίδρασης της πυρκαγιάς σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος (ιδιότητες υλικών, συμπεριφορά δομικών στοιχείων, αιτίες βλαβών στο φέροντα οργανισμό, είδη ζημιών). Στη συνέχεια θα γίνει μια προσπάθεια να προταθούν μέτρα που θα πρέπει να λαμβάνονται εκ των προτέρων αλλά και εκ των υστέρων για την αντιμετώπιση των παραπάνω φαινομένων, καταλήγοντας στο τέλος σε γενικά συμπεράσματα.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδάστριας:

Η κάτωθι υπογεγραμμένη σπουδάστρια έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κείμενου, έχω δε αναφέρει στη Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομα του και την πηγή προέλευσης.

Η σπουδάστρια:

EYΔOKIA ARMENIAKOY

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	1
1.1 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	1
1.1.1 Υλικά – Παρασκευή.....	1
1.1.1.1 Τσιμέντο.....	2
1.1.1.2 Αδρανή υλικά.....	2
1.1.1.3 Νερό πρόσμειξης.....	3
1.1.1.4 Βελτιωτικά – Πρόσμικτα.....	4
1.2 ΧΑΛΥΒΑΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	4
1.2.1 Παραγωγή χαλύβων οπλισμένου σκυροδέματος.....	4
1.2.2 Ποιότητες του χάλυβα.....	5
1.3 ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	6
1.3.1 Ιδιότητες σκυροδέματος.....	7
1.3.2 Ιδιότητες οπλισμού.....	7
1.3.3 Σύντομη αναφορά στη λειτουργία του οπλισμού.....	7
1.3.4 Συνάφεια οπλισμένου σκυροδέματος.....	8
Βιβλιογραφικές Αναφορές 1 ^{ου} Κεφαλαίου.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	10
2.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΚΑΙ ΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ.....	10
2.1.1 Ενανθράκωση.....	10
2.1.1.1 Παράμετροι που επηρεάζουν την ενανθράκωση.....	11
2.1.1.2 Η δράση και οι πηγές των χλωριόντων.....	11
2.1.1.2.1 Παράμετροι που επηρεάζουν τη διάβρωση του χάλυβα από χλωριόντα.....	12
2.2 Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟΥΣ ΠΟΡΟΥΣ.....	13
2.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ.....	13
Βιβλιογραφικές Αναφορές 2 ^{ου} Κεφαλαίου.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΔΙΑΒΡΩΣΗ.....	19
3.1 ΣΗΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	19
3.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ.....	20
3.3 ΜΟΡΦΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	21
3.4 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ.....	24
3.4.1 Διάβρωση χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος.....	26
Βιβλιογραφικές Αναφορές 3 ^{ου} Κεφαλαίου.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ.....	30
4.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.....	30
4.2 ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.....	30
4.2.1 Εκτίμηση των μέγιστων τιμών θερμοκρασίας με βάση το χρώμα του υλικού.....	30
4.2.2 Συμπεριφορά του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες.....	31
4.2.3 Επίδραση της πυρκαγιάς στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος.....	31
4.3 Ο ΧΑΛΥΒΑΣ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.....	34
4.3.1 Επίδραση της πυρκαγιάς στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα.....	34
4.3.2 Επιρροή της πυρκαγιάς στη συνάφεια χάλυβα – σκυροδέματος.....	36

4.4	ΒΛΑΒΕΣ ΜΕΛΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ.....	37
4.4.1	Αναλυτική αναφορά στη συμπεριφορά δομικών στοιχείων σε υψηλές θερμοκρασίες.....	38
	Βιβλιογραφικές Αναφορές 4 ^{ου} Κεφαλαίου.....	42
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ.....	43
5.1	ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΕΚ ΤΩΝ ΠΡΟΤΕΡΩΝ.....	43
5.1.1	Από το φαινόμενο της διάβρωσης.....	43
5.1.2	Από το φαινόμενο της πυρκαγιάς.....	44
5.2	ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΕ ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ.....	46
5.3	ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ.....	46
5.3.1	Προστατευτικές επενδύσεις.....	47
5.3.2	Αναστολείς διάβρωσης.....	50
5.3.3	Καθοδική προστασία.....	51
	Βιβλιογραφικές Αναφορές 5 ^{ου} Κεφαλαίου.....	54
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1.1 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.

Το σκυρόδεμα είναι το υλικό που παρουσιάζει την ευρύτερη χρήση από όλα τα άλλα δομικά υλικά τόσο στη χώρα μας όσο και διεθνώς. Αυτό οφείλεται κυρίως στον συνδυασμό ιδιοτήτων και κόστους του, πιο ειδικότερα:

- Στην εξαιρετική συμπεριφορά του υλικού στο νερό.
- Στη μεγάλη ανθεκτικότητά του τόσο σε χρονική διάρκεια όσο και σε περιβαλλοντικές επιδράσεις.
- Στο χαμηλό κόστος του, στη σχετικά χαμηλή ενέργεια που απαιτείται για την παρασκευή του, αλλά και στην μεγάλη και άμεση διαθεσιμότητα των συστατικών του.

Το σκυρόδεμα (beton) είναι ένα τεχνητό δομικό υλικό, που παρασκευάζεται από τσιμέντο, αδρανή (αμμοχάλικα) και νερό. Το μείγμα του νωπού σκυροδέματος σκληραίνει και μεταβάλλεται σε στερεό σώμα με υψηλές αντοχές.

Λόγω των υψηλών αντοχών του, το σκυρόδεμα είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται σε αρκετά μεγάλο εύρος διαφορετικών ποιοτήτων για το σύνολο σχεδόν των κατασκευαστικών έργων. Η σπουδαιότητα των ιδιοτήτων του σκυροδέματος στην ασφάλεια ενός δομικού έργου είναι διαφορετική και εξαρτάται από το είδος της κατασκευής, το περιβάλλον που αυτή θα εκτεθεί και την ειδική χρήση που αυτή θα έχει. Έτσι άλλες απαιτήσεις υπάρχουν για το σκυρόδεμα από το οποίο θα κατασκευαστεί ένα φράγμα, άλλες για μια οικοδομή και άλλες για μια γέφυρα. Οι διάφορες ιδιότητες του σκυροδέματος εξαρτώνται από την ποιότητα των πρώτων υλών, από την μεθοδολογία παρασκευής του αλλά και από τις αντοχές του που μεταβάλλονται σημαντικά.

Πρωταρχικής σημασίας για την μετέπειτα συμπεριφορά, της ανθεκτικότητας και τις ιδιότητες του σκυροδέματος είναι η ποιότητα της βασικής του πρώτης ύλης, του τσιμέντου. Είναι προφανές ότι υπάρχουν και άλλοι, πέραν του τσιμέντου, παράγοντες που διαφοροποιούν τα σκυροδέματα μεταξύ τους.

Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητές του, το σκυρόδεμα παρουσιάζει πολύ υψηλή αντοχή στη θλίψη, αλλά τα αντίστοιχα όρια στον εφελκυσμό είναι χαμηλά. Ο συνδυασμός του χάλυβα με το σκυρόδεμα θεραπεύει ακριβώς αυτή την αδυναμία του υλικού και ονομάζεται οπλισμένο σκυρόδεμα. Προκειμένου να ανταποκριθούν οι κατασκευές στις όλο και αυξανόμενες απαιτήσεις, δημιουργούνται συνεχώς νέοι τύποι ειδικών τσιμέντων, ενισχυμένης σύστασης χάλυβες και ειδικά πρόσθετα.

1.1.1 Υλικά - Παρασκευή.

Η δομή του σκυροδέματος είναι εξαιρετικά ανομοιογενής και περίπλοκη, με αποτέλεσμα ακόμα και σήμερα να μην έχουν κατανοηθεί πλήρως οι σχέσεις δομής-ιδιοτήτων

του υλικού. Παρόλα αυτά θεωρείται απαραίτητη η κατανόηση των βασικών στοιχείων της δομής του, προκειμένου να εξηγηθούν οι διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν τις ιδιότητες του σκυροδέματος, καθώς και οι επιπτώσεις των περιβαλλοντικών συνθηκών σε αυτό. Κρίνεται λοιπόν σκόπιμο να γίνει μια σύντομη αναφορά στις πρώτες ύλες του σκυροδέματος που είναι το τσιμέντο, τα αδρανή, το νερό ανάμιξης, τα βελτιωτικά πρόσμικτα και τα πρόσθετα συστατικά.

1.1.1.1 Τσιμέντο.

Τσιμέντο ονομάζεται η υδραυλική κονία που αποτελείται κυρίως από ενώσεις οξειδίου του ασβεστίου, του πυριτίου, του αργιλίου και του σιδήρου. Κατά την ανάμειξή τους με νερό, σκληραίνουν αποκτώντας έτσι συνδεδεμένες ικανότητες και ανθεκτικότητα στο χρόνο. Ως προς την αντοχή σε θλίψη η οποία ορίζεται ίση τουλάχιστον με 250 kp/cm^2 (DIN 1164), τσιμέντο καλούμε κάθε υδραυλική κονία η οποία παρουσιάζει αυτή την αντοχή σε ηλικία 28 ημερών από την ανάμειξή της με το νερό.

Το τσιμέντο μπορεί να είναι φυσικό ή τεχνητό. Το φυσικό τσιμέντο προέρχεται από την όπτηση αργιλούχων ασβεστόλιθων με περιεκτικότητα 20-25% κ.β. σε άργιλο. Το προϊόν της όπτησης αλέθεται σε λεπτή σκόνη και αποτελεί το φυσικό τσιμέντο. Λόγω της έλλειψης σταθερότητας στη σύσταση των πετρωμάτων που έχουν χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή φυσικού τσιμέντου, οι ιδιότητές του υπολείπονται αυτών του τεχνητού και για αυτό το φυσικό τσιμέντο σήμερα ουσιαστικά δεν χρησιμοποιείται. Έτσι τα τεχνητά τσιμέντα σήμερα, μονοπωλούν την αγορά.

Το τσιμέντο Portland ανακαλύφθηκε το 1824 από τον Άγγλο L. Aspdin. Ο χρωματισμός του τσιμέντου είναι ίδιος με τα εδάφη της περιοχής Portland της Αγγλίας, από όπου πήρε και την ονομασία του. Στην Ελλάδα, η παραγωγή του τσιμέντου Portland ετησίως αγγίζει τους 15 εκατομμύρια τόνους, από τους οποίους το 50% εξάγεται. Ως τσιμέντο Portland ορίζεται το προϊόν που προκύπτει μετά από έψηση σε θερμοκρασία κλινκεροποίησης ($1380-1420^\circ\text{C}$), ενός κατάλληλα αλεσμένου και πλήρως ομογενοποιημένου μίγματος, που αποτελείται περίπου από 75% ασβεστολιθικά υλικά και 25% αργυλοπυριτικά υλικά. Το προϊόν που προκύπτει, καλείται κλίνκερ, και συναλέθεται με κατάλληλη ποσότητα γύψου ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

1.1.1.2 Αδρανή υλικά.

Αδρανή ονομάζονται τα υλικά που παραμένουν χημικά αδρανή σε αντίθεση με το τσιμέντο και το νερό, στη διαδικασία της σκλήρυνσης του σκυροδέματος. Τα αδρανή υλικά συνδέονται και συγκολλούνται μεταξύ τους και συμβάλλουν μηχανικά μόνο, στην αντοχή του τελικού προϊόντος.

Προέρχονται από πετρώματα ή τεχνητά υλικά, τα οποία υπέστησαν φυσικό ή τεχνητό τεμαχισμό. Η διάμετρος των κόκκων ποικίλει, ανάλογα με τη χρήση και κυμαίνεται συνήθως από 0 έως 63,5mm. Επίσης διακρίνονται και ως προς την ποιότητα τους, δηλαδή σε:

- Βαρέα αδρανή (βαρύ σκυρόδεμα) $2,8-6,0\text{g/cm}^3$.
- Συνήθη αδρανή (σύνθητες σκυρόδεμα) $2,0-2,8\text{g/cm}^3$.

- Ελαφρά αδρανή (ελαφροσκυρόδεμα) $< 2,0\text{g/cm}^3$.

Για αδρανή υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα υλικά που συγκεντρώνουν τρεις βασικές ιδιότητες: επαρκή αντοχή, πρόσφυση και χημική ανεκτικότητα. Τα καταλληλότερα πετρώματα είναι τα πυριτικά και τα ασβεστολιθικά. Τα αδρανή μπορούν να προέρχονται απευθείας από τη φύση με συλλογή από ρέματα, με λεία επιφάνεια και στρογγυλεμένες άκρες ή μπορεί να προέρχονται από θραύση πετρωμάτων, με τραχεία επιφάνεια και γωνιώδη.

Τα πετρώματα από τα οποία προέρχονται τα αδρανή, πρέπει να είναι άριστης ποιότητας, γιατί από αυτά εξαρτάται η τελική αντοχή του δομικού στοιχείου, τόσο στις στατικές καταπονήσεις όσο και στις αντιδράσεις που προέρχονται από τις καιρικές συνθήκες και από την προσβολή των χημικών ουσιών.

Γενικά τα μητρικά πετρώματα πρέπει να είναι υγιή, συμπαγή και απαλλαγμένα από γαιώδεις προσμίξεις. Οι ασβεστόλιθοι πρέπει να μην περιέχουν άργιλο και το πορώδες των πετρωμάτων να είναι μικρό. Οι κυριότερες ιδιότητες των πετρωμάτων που χρησιμοποιούνται για αδρανή υλικά είναι [1]:

- Αντοχή σε θλίψη και τριβή.
- Αντοχή στον παγετό.
- Επιβλαβείς προσμίξεις.
- Χημική συμπεριφορά τους με άλλα συστατικά του σκυροδέματος.
- Συστολή και διαστολή.

Πιο αναλυτικά, τα αδρανή δεν πρέπει να έχουν στην επιφάνεια ή στη μάζα τους ουσίες που μπορεί να εμποδίσουν την πρόσφυση με το κονίαμα ή να έχουν χημική επίδραση στο τσιμέντο ή στο χαλύβδινο οπλισμό. Τα κυριότερα από τα επιβλαβή αυτά πρόσμικτα είναι η πυριτική παιπάλη, οι οργανικές προσμίξεις και οι θειούχες ενώσεις. Ποσότητες πυριτίου στη μάζα των αδρανών, αντιδρούν με τα αλκάλια του τσιμέντου (Na_2O και K_2O), με αποτέλεσμα τη φθορά ή και την καταστροφή του σκυροδέματος.

Τέλος η κοκκομετρική σύνθεση των αδρανών αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην αντοχή του σκυροδέματος. Οι κόκκοι των αδρανών στηρίζονται ο ένας πάνω στον άλλο, και λόγω του πολυγωνικού τους σχήματος αφήνουν ενδιάμεσα κενά. Τα κενά αυτά γεμίζονται από το κονίαμα, συνδέοντας τους κόκκους μεταξύ τους με ένα συμπαγές υλικό. Το κονίαμα όμως είναι περισσότερο πορώδες και λιγότερο ανθεκτικό από το πέτρωμα των αδρανών, άρα όσο λιγότερα είναι τα παραπάνω κενά, τόσο αυξάνεται η αντοχή και η πυκνότητα του σκυροδέματος. Στην περίπτωση αυτή τα αδρανή υλικά που προτιμώνται είναι αυτά όπου το κλάσμα κόκκων διαμέτρου μικρότερης από $250\mu\text{m}$ είναι το 10-25% της συνολικής ποσότητας.

1.1.1.3 Νερό πρόσμειξης.

Το νερό είναι ένα από τα δύο ενεργά συστατικά του σκυροδέματος. Μαζί με το τσιμέντο παίρνει μέρος σε σειρά χημικών αντιδράσεων, που οδηγούν με τη δημιουργία ενυδρων κρυστάλλων, στην πήξη και στη σκλήρυνση του μίγματος. Η βασική απαίτηση στο νερό είναι να μην περιέχει συστατικά που μπορούν να βλάψουν ή να επηρεάσουν τις

αντιδράσεις ενυδάτωσης. Για παράδειγμα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί νερό με υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα και χαμηλό pH, διότι έτσι έχουμε παρουσία χλωριόντων που διευκολύνουν τη διάβρωση του οπλισμού. Βασική απαίτηση για τη χρήση του νερού κατά την παραγωγή του σκυροδέματος, είναι η σύστασή του να χαρακτηρίζεται από [3]:

- Περιεκτικότητα σε άλατα < 3,5%, θειικά < 0,5% και νάτριο < 3%.
- pH >4.
- Πλήρη έλλειψη σε λίπη ή έλαια.
- Χαμηλή περιεκτικότητα σε διαλυμένες και αιωρούμενες οργανικές ουσίες.

1.1.1.4 Βελτιωτικά - Πρόσμικτα.

Βελτιωτικά ή χημικά πρόσμικτα είναι τα υλικά που προστίθενται σε μικρές ποσότητες σε σχέση με τη μάζα του τσιμέντου, κατά τη διάρκεια της ανάμιξης του σκυροδέματος, με σκοπό να τροποποιήσουν τις ιδιότητες κυρίως του νωπού αλλά και του σκληρυμένου σκυροδέματος.

1.2 ΧΑΛΥΒΑΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.

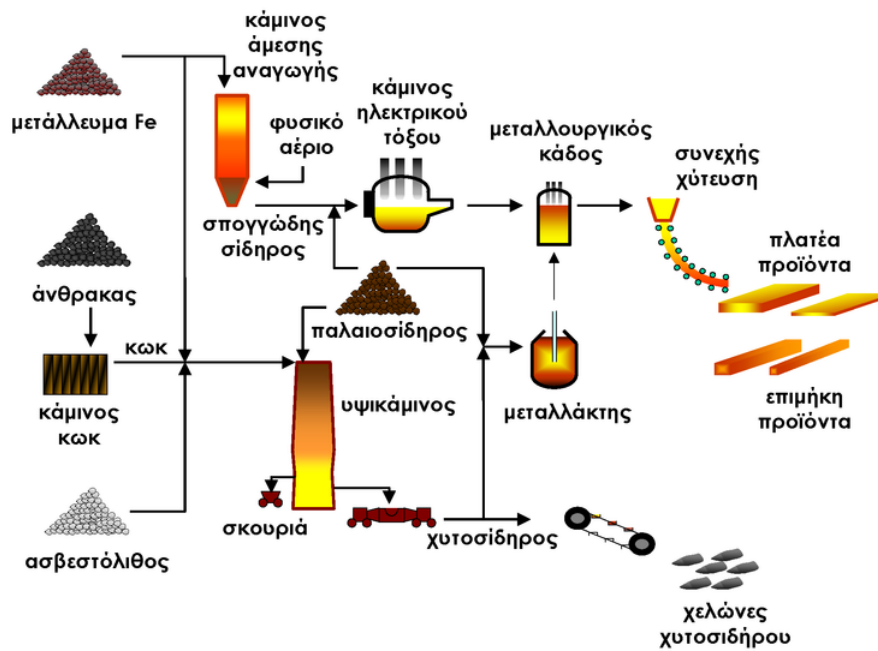
Ως καθαρός σίδηρος χαρακτηρίζεται συνήθως κράμα με περιεκτικότητα σε άνθρακα και λοιπά κραματικά στοιχεία μικρότερη από 0,05%. Ενώ ως Χάλυβας Οπλισμού Σκυροδέματος (Χ.Ο.Σ.), χαρακτηρίζεται το κράμα σιδήρου-άνθρακα (Fe-C) με περιεκτικότητα σε άνθρακα έως 2% και προσθήκες άλλων στοιχείων.

Οι χάλυβες οπλισμένου σκυροδέματος (Χ.Ο.Σ.) που παράγονται σήμερα, τόσο στην Ελλάδα όσο και διεθνώς, προέρχονται στο μεγαλύτερο μέρος από τήξη παλαιοσιδήρου (scrap) σε ηλεκτρικές καμίνους (Electric Arc Furnace-EAF). Η περαιτέρω επεξεργασία τους, που περιλαμβάνει τη δευτερογενή μεταλλουργία, τη χύτευση και τη θερμομηχανική κατεργασία, επιλέγονται έτσι ώστε να εξασφαλίζονται τα επιθυμητά χαρακτηριστικά στο τελικό προϊόν.

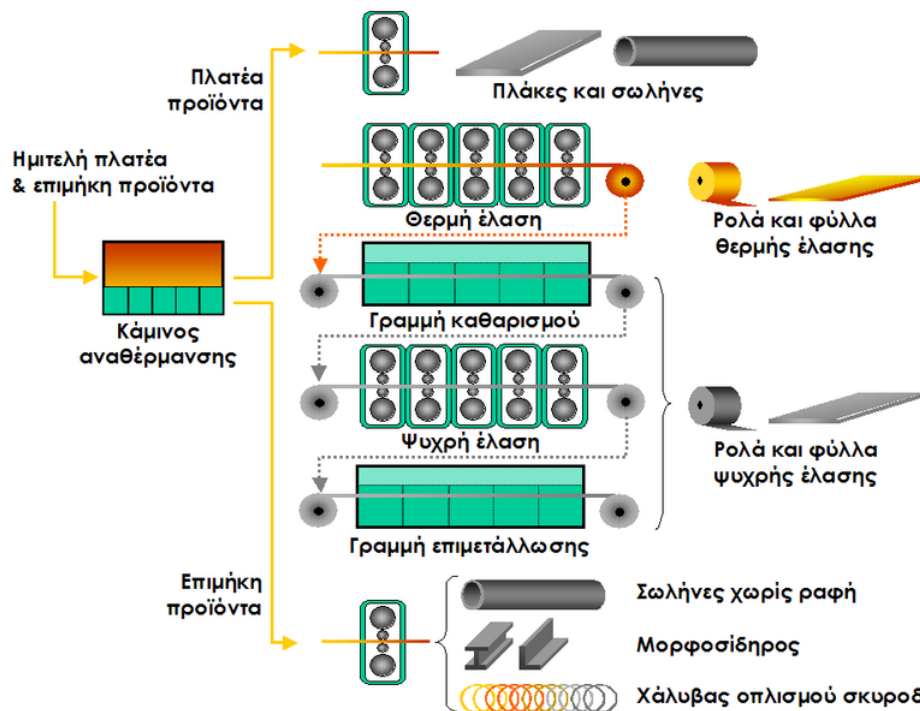
1.2.1 Παραγωγή χάλυβων οπλισμού σκυροδέματος.

Για την παραγωγή χάλυβων οπλισμού σκυροδέματος, υπάρχουν συνοπτικά τα παρακάτω στάδια [4]:

- 1) Χαλυβοποίηση: αφορά τις διαδικασίες που απαιτούνται ώστε να παραχθούν κράματα σιδήρου με περιεκτικότητα άνθρακα, κάτω από 2%.
- 2) Συνεχής χύτευση: το τήγμα χάλυβα της προηγούμενης φάσης, χυτεύεται και στερεοποιείται σε συγκεκριμένη μορφή ημι-τελικού προϊόντος (Σχήμα 1.1).
- 3) Θερμή έλαση: Τα ημιτελικά προϊόντα αναθερμαίνονται σε κατάλληλη θερμοκρασία ώστε να είναι ελάσιμα και με συνεχή υποβιβασμό της διατομής τους, παράγονται τελικά προϊόντα σε επιθυμητές διαστάσεις και μορφές (Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.1 Σχηματική παρουσίαση της παραγωγής χυτοσιδήρου και ημιτελών προϊόντων χάλυβα [4].



Σχήμα 1.2 Σχηματική παρουσίαση της παραγωγής τελικών προϊόντων χάλυβα [4].

1.2.2 Ποιότητες του χάλυβα.

Οι χάλυβες διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με τη χημική τους σύσταση, την περαιτέρω κατεργασία τους, την κρυσταλλική τους δομή ή και την τελική τους χρήση.

Ως προς τη χημική τους σύσταση, οι χάλυβες ταξινομούνται ως εξής [5]:

- Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες (carbon steels). Περιέχουν άνθρακα (έως 2,06%) και μικρό ποσοστό μαγγανίου (έως 1,65%), πυριτίου (έως 0,6%) και χαλκού (έως 0,6%). Χρησιμοποιούνται πολύ και συγκολλούνται εύκολα. Με βάση τον περιεχόμενο άνθρακα, οι κοινοί χάλυβες διακρίνονται στις εξής υποκατηγορίες:
 - χάλυβες χαμηλού άνθρακα ή μαλακοί χάλυβες (mild steels $C < 0,30\%$)
 - χάλυβες μετρίου άνθρακα (medium carbon steels $0,30\% < C < 0,60\%$)
 - χάλυβες υψηλού άνθρακα (high carbon steels $0,60\% < C < 1,00\%$)
 - χάλυβες πολύ υψηλού άνθρακα (ultra-high carbon steels $1,00\% < C < 2,00\%$)
- Κραματωμένοι χάλυβες (alloy steels), δηλαδή κράματα σιδήρου με άλλα μέταλλα σε σημαντική περιεκτικότητα. Τέτοιοι είναι οι
 - ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες ή χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης, που περιέχουν συνήθως χρώμιο, μολυβδαίνιο, βανάδιο, νικέλιο κ.λπ. σε συνολικό ποσοστό που δεν ξεπερνά το 10% κ.β., όπως π.χ. οι εργαλειοχάλυβες, και οι
 - ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες ή χάλυβες υψηλής κραμάτωσης, όπως οι ανοξειδωτοι χάλυβες, οι ταχυχάλυβες, κ.λπ.

Σημειώνεται ότι η χημική σύστασή τους συχνά καθορίζει και σε ποιο βαθμό προσβάλλονται οι χάλυβες από περιβαλλοντικές δράσεις (διάβρωση).

Ανάλογα με την περαιτέρω κατεργασία τους, οι χάλυβες διακρίνονται σε [5]:

- χάλυβες διαμόρφωσης, που υφίστανται περαιτέρω μηχανική κατεργασία (έλαση, διέλαση, κ.λπ.), και
- χυτοχάλυβες, που παράγονται απευθείας με χύτευση υπό μορφή πλινθωμάτων και επαναχυτεύονται για την κατασκευή διαφόρων εξαρτημάτων.

Τέλος, συχνά γίνεται λόγος για φερριτικούς, περλιτικούς, μαρτενσιτικούς, μπαινιτικούς κ.λπ. χάλυβες ανάλογα με την κύρια κρυσταλλική φάση τους.

Η ονοματολογία των χαλύβων γίνεται σύμφωνα με διάφορα συστήματα τυποποίησης όπως DIN, ASTM, ΕΛΟΤ κ.λπ. Συχνά υπάρχει αντιστοιχία ανάμεσα στο όνομα μιας κατηγορίας χάλυβα και την αντοχή της συγκεκριμένης κατηγορίας χάλυβα σε εφελκυσμό. Για παράδειγμα, το πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-3 ορίζει ότι ο χάλυβας B500C πρέπει να έχει όριο διαρροής μεγαλύτερο από 500 MPa (500 N/mm^2).

1.3 ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.

Το οπλισμένο σκυρόδεμα ή μπετόν αρμέ είναι ένα σύνθετο υλικό που προκύπτει από την ενίσχυση του σκυροδέματος με κάποιο άλλο υλικό μεγαλύτερης αντοχής που ονομάζεται οπλισμός. Το σύνθετο υλικό οπλισμού που χρησιμοποιείται είναι ο χάλυβας σε μορφή ράβδων ή ινών και σπανιότερα ίνες γυαλιού, πολυμερών υλικών και άλλα. Στόχος είναι να συνδυαστούν οι ιδιότητες των παραπάνω υλικών, του σκυροδέματος και του χάλυβα, σε ένα νέο που θα καλύπτει τις ανάγκες κατασκευής κάθε έργου.

1.3.1 Ιδιότητες σκυροδέματος.

Όπως προαναφέρθηκε, το σκυρόδεμα είναι ένα μείγμα αδρανών υλικών (χαλίκια), τσιμέντου και νερού που μετά από χημική αντίδραση μετατρέπεται σε στερεό σώμα. Έχει πολλά πλεονεκτήματα στις κατασκευές, όπως η ευκολία που έχει να παίρνει σχήμα όταν τοποθετηθεί σε καλούπια, η μεγάλη θλιπτική αντοχή του, η αντοχή στο χρόνο, η αντοχή στην πυρκαγιά και το σχετικά χαμηλό κόστος. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι η σχετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή του που έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Το βασικότερο μειονέκτημα του σκυροδέματος είναι η πολύ μικρή αντοχή του σε εφελκυσμό.

1.3.2 Ιδιότητες οπλισμού.

Το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί ως οπλισμός πρέπει να καλύπτει την αδυναμία του σκυροδέματος, πρέπει δηλαδή να έχει μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό. Επιπροσθέτως, για να μπορεί να συνεργαστεί με το σκυρόδεμα όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία θα πρέπει να έχει παρόμοιο συντελεστή θερμικής διαστολής.

Ο χάλυβας έχει και τις δύο αυτές ιδιότητες. Κύριο μειονέκτημα του χάλυβα είναι η ευαισθησία του σε διάβρωση και στη φωτιά, η οποία διερευνάται στη συγκεκριμένη εργασία. Η σκουριά είναι το αποτέλεσμα οξείδωσης. Το σκυρόδεμα όμως σχηματίζει αλκαλικό περιβάλλον που δεν επιτρέπει την οξείδωση του χάλυβα και όταν έχει αρκετό πάχος τον προστατεύει από τις υψηλές θερμοκρασίες της φωτιάς. Έτσι τα δύο υλικά καλύπτουν το ένα τις αδυναμίες του άλλου. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι διάφοροι περιβαλλοντικοί μηχανισμοί ενδέχεται να υποβαθμίσουν την προστατευτική δράση του σκυροδέματος με επιπτώσεις που παρουσιάζονται και σχολιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο.

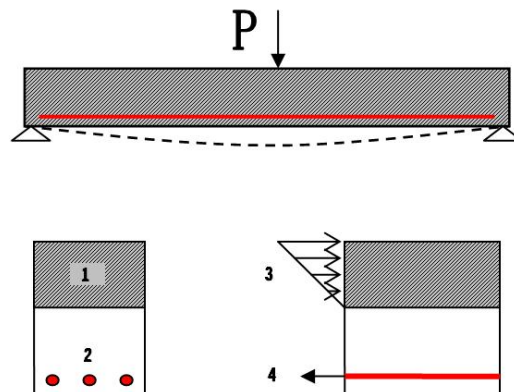
1.3.3 Σύντομη αναφορά στη λειτουργία του οπλισμού.

Ο οπλισμός τοποθετείται στο σκυρόδεμα είτε ως ράβδοι σε επιλεγμένες θέσεις που προκύπτουν από τη στατική ανάλυση της κατασκευής, είτε ως ίνες ανακατεμένες στο μείγμα του (ινοπλισμένο σκυρόδεμα). Οι ράβδοι τοποθετούνται κυρίως στις θέσεις που εμφανίζονται οι εφελκυστικές τάσεις ή γενικότερα όπου δεν είναι επαρκής η αντοχή του σκυροδέματος. Λόγω του υψηλότερου κόστους του οπλισμού γίνεται προσπάθεια να χρησιμοποιηθεί μόνο εκεί που είναι απαραίτητος.

Για παράδειγμα στο Σχήμα 1.3 παρακάτω φαίνεται μια δοκός που στηρίζεται στα άκρα της και έχει ένα συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσον της. Το φορτίο, όπως προβλέπει και η θεωρία της κάμψης, καμπυλώνει τη δοκό (διακεκομμένη γραμμή). Το άνω μέρος της δοκού συμπιέζεται (γραμμοσκιασμένη περιοχή 1 στην τομή) ενώ στο κάτω εμφανίζονται εφελκυστικές τάσεις που τείνουν να το ανοίξουν. Εάν δεν υπήρχε οπλισμός, στο κάτω μέρος της δοκού θα εμφανίζονταν ρωγμές λόγω της χαμηλής αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό και η δοκός θα έσπαζε. Για να αντέξει η δοκός τις εφελκυστικές τάσεις τοποθετούνται ως ενίσχυση, ράβδοι χάλυβα που φαίνονται στο σχήμα με κόκκινο χρώμα.

Αυτή είναι η κύρια λειτουργία του κάτω οπλισμού που είναι ο σημαντικότερος για αυτή τη φόρτιση. Συνήθως στις δοκούς τοποθετούνται και άλλοι οπλισμοί για λόγους

αντισεισμικούς, κατασκευαστικούς, περιορισμού των ρηγματώσεων, αντοχής σε κάθετες δυνάμεις και άλλους.



Σχήμα 1.3 Θλιβόμενη περιοχή στην τομή της δοκού (1), εφελκόμενος οπλισμός στην τομή (2), θλιπτικές δυνάμεις σε πλάγια όψη (3), εφελκυστική δύναμη ράβδου σε πλάγια όψη (4) [6].

1.3.4 Συνάφεια οπλισμένου σκυροδέματος.

Βασική προϋπόθεση για τη δημιουργία λειτουργικού οπλισμένου σκυροδέματος είναι η συνάφεια του χάλυβα με το σκυρόδεμα. Ένα συναφές υλικό είναι ένα σύνθετο υλικό ενιαίας συμπεριφοράς, ικανό να αντέξει σε θλιπτικές, εφελκυστικές και διατμητικές καταπονήσεις.

Οι ιδιότητες συνάφειας των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος, συσχετίζονται πάντα με το σκυρόδεμα στο οποίο προσφύονται.

Όταν οι ράβδοι οπλισμού ενσωματώνονται μέσα στο σκυρόδεμα και στη συνέχεια αναλαμβάνουν φορτία, αναπτύσσεται σταδιακά τάση συνάφειάς τους με το σκυρόδεμα. Η τάση συνάφειας είναι συνάρτηση τεσσάρων βασικών παραμέτρων [7]:

- του επιβαλλόμενου φορτίου.
- της ποιότητας του σκυροδέματος.
- των μηχανικών ιδιοτήτων των ράβδων οπλισμού.
- των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας των ράβδων οπλισμού.
- της κατάστασης στην οποία βρίσκεται η επιφάνεια των ράβδων οπλισμού.

Η αντοχή συνάφειας, σχετίζεται με την ανάπτυξη αντιστάσεων τριβής, πρόσφυσης καθώς και αντιστάσεων που σχετίζονται με τη διάρθρωση των ραβδώσεων της ράβδου. Γι' αυτό και θεσπίστηκαν ειδικές απαιτήσεις για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των νευρώσεων στην επιφάνεια των Χ.Ο.Σ.

Αναγκαία είναι και τα μέτρα για αποφυγή παρουσίας γρασών, λίπους αλλά και δημιουργίας έντονης διάβρωσης στην επιφάνεια του οπλισμού πριν την ενσωμάτωσή του στο σκυρόδεμα. Διάβρωση εκ των υστέρων (αποσάρθρωση επικάλυψης, οξείδωση οπλισμού κλπ.) οφειλόμενη και σε περιβαλλοντικές δράσεις μπορεί να οδηγήσει σε απομείωση της συνάφειας σκυροδέματος και οπλισμού με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής τους σύνθετου

στοιχείου (η ολίσθηση της ράβδου δεν επιτρέπει την ανάπτυξη των μηχανισμών που περιγράφηκαν παραπάνω).

Βιβλιογραφικές Αναφορές 1^ο Κεφαλαίου

- [1] Κ.Κ. Σιδέρης, Τεχνολογία Δομικών Υλικών, Δ.Π.Θ., Ξάνθη, 1997.
- [2] Δ.Κ. Υφαντής, Υλικά – Διάβρωση και Προστασία, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2000.
- [3] Μπατής Γ. Καθ. ΕΜΠ, «Φθορά και προστασία των υλικών», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1999
- [4] Π. Μαυροειδής, Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2005.
- [5] Χάλυβας – Βικιπαίδεια
- [6] Οπλισμένο Σκυρόδεμα – Βικιπαίδεια
- [7] T. Ahiborn, T. Denhartigh, A comparative study of MMFX reinforcing steel in concrete, Michigan technology university, Center for Structural Durability, 2003.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

2.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΚΑΙ ΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ.

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 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 κατάσταση αυτή οδηγούν δύο αλληλένδετες διαδικασίες, η ενανθράκωση και η επίδραση χλωριόντων.

2.1.1 Ενανθράκωση.

Η μείωση του pH σε τιμές κάτω του 9.0 οφείλεται στην αντίδραση του Ca(OH)_2 του νερού των πόρων (και γενικότερα του στερεού ιστού του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού) με το διοξείδιο του άνθρακα (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 Ca(OH)_2 σε ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3), ονομάζεται ενανθράκωση του σκυροδέματος.

Η ύπαρξη του Ca(OH)_2 μαζί με αυτή άλλων υδροξειδίων που υπάρχουν σε μικρότερες ποσότητες εξασφαλίζουν στους οπλισμούς ένα προστατευτικό, έντονα αλκαλικό περιβάλλον (pH~12.5). Όπως αναφέραμε παραπάνω, σε αυτό το περιβάλλον ένα λεπτό στρώμα οξειδίων και υπεροξειδίων προστατεύει το χάλυβα από τη διάβρωση. Το στρώμα αυτό δεν σταματά τη διάβρωση, αλλά περιορίζει σημαντικά τους ρυθμούς εξέλιξής της. Η μετατροπή όμως του Ca(OH)_2 σε ασβεστόλιθο με τη βοήθεια του ανθρακικού οξέος, που προκύπτει από την ένωση του CaO με H_2O , 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 9.0, ενώ ένα πλήρως ενανθρακωμένο σκυρόδεμα έχει pH περίπου 8.0.

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 συνδυαστική δράση ενανθράκωσης και χλωριόντων μπορεί να είναι σημαντικά επιζήμια.

Η ενανθράκωση είναι το φαινόμενο εκείνο που περισσότερο από οποιοδήποτε αναδεικνύει το γεγονός ότι το οπλισμένο σκυρόδεμα γερνάει και απαξιώνεται. Τα ποσά που ήδη δαπανώνται για τη δομική αποκατάσταση μεγάλων τεχνικών έργων – όπως γέφυρες – είναι υπέρογκα. Στο άμεσο μέλλον θα εκτοξευθούν σε δυσθεώρητα ύψη για πολλά χρόνια. Η τάση αυτή θα κοπάσει όταν αρχίσουν να αποδίδουν τα μέτρα που λαμβάνονται για την καλύτερη προστασία των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα.

2.1.1.1 Παράμετροι που επηρεάζουν την ενανθράκωση.

- **Συνθήκες περιβάλλοντος:** Για σχετική υγρασία περιβάλλοντος 50% έως 70% παρατηρείται το μέγιστο ποσοστό ενανθράκωσης.
- **Ποιότητα και πάχος της επικάλυψης**
 - Χαμηλή διαπερατότητα. Μειώνει ή και αναστέλλει τη διείσδυση του CO₂.
 - Ύπαρξη ρωγμών. Επιταχύνει πολύ τη διαδικασία ενανθράκωσης.
 - Μικρές τιμές N/T (Νερού/Τσιμέντου). Περιορίζεται πολύ η διείσδυση υγρασίας και CO₂.
- **Είδος τσιμέντου**
 - Κατά τον U. Ludwig (1890) τσιμέντα που περιέχουν σκωρίες υψικαμίνων και ποζολάνες ενανθρακώνονται πιο γρήγορα από το Portland.
 - Κατά τον Matthews (1984) η προσθήκη ιπταμένων τεφρών στο τσιμέντο επιταχύνει την ενανθράκωση σε σκυροδέματα με αντοχή μικρότερη από 30 έως 35 MPa.
 - Από τους A. Zhu (1982), και X. Tan (1982) η προσθήκη λιγνοσουλφόνης στο σκυρόδεμα σε ποσότητα 0,25% κ.β. μειώνει την ταχύτητα ενανθράκωσης κατά 10% έως 30%.
 - Η προσθήκη πυριτικής παιπάλης επιταχύνει την ενανθράκωση. [2]

2.1.2 Η δράση και οι πηγές των χλωριόντων.

Το προστατευτικό στρώμα οξειδίου μπορεί να διατηρηθεί τοπικά από ιόντα χλωρίου, Cl⁻, αν η συγκέντρωση των τελευταίων υπερβεί το 0,4% έως 0,6% του βάρους του τσιμέντου. Τα χλωριόντα μπορεί να προέρχονται είτε από το εσωτερικό του σκυροδέματος είτε από το εξωτερικό περιβάλλον που περικλείει το σκυρόδεμα.

Τα χλωριόντα που μπορεί να διατρήσουν το προστατευτικό στρώμα προέρχονται από το εσωτερικό του σκυροδέματος, εάν έχουν χρησιμοποιηθεί συλλεκτά αδρανή από παραλίες ή θαλάσσιο νερό για το σκυρόδεμα (όχι ασυνήθιστη πρακτική στη νησιωτική Ελλάδα), ή από πρόσθετα βελτιωτικά του σκυροδέματος που περιέχουν χλωριούχα άλατα.

Χλωριόντα από το εξωτερικό περιβάλλον, είναι ένα σύνηθες φαινόμενο σε παραθαλάσσιες περιοχές, όπου και σε μεγάλες αποστάσεις από την ακτή ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει χλωριούχα άλατα, ιδίως αν οι επικρατούντες άνεμοι κατευθύνονται από τη θάλασσα προς τη ξηρά. Στις περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη χιονόπτωση, βασική πηγή

χλωριόντων είναι τα χλωριούχα άλατα που ρίχνουν στους δρόμους για την τήξη του χιονιού (Εικόνα 2.1). Χλωριόντα μπορεί να προέρχονται επίσης και από τα επιταχυντικά πήξης που χρησιμοποιούνται το χειμώνα επειδή το σκυρόδεμα πήζει αργά ή καθόλου.



Εικόνα 2.1 Γέφυρα πεζών στο δεύτερο όροφο νοσοκομείου, πριν και μετά από τη διάβρωσή της, λόγω χλωριόντων από εκχιονιστικά άλατα. [4]

Η ενανθράκωση και η διείδυση των χλωριόντων δεν είναι ανεξάρτητες διαδικασίες, καθώς η πρώτη επιταχύνει σημαντικά τη δράση των χλωριόντων: Το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ του τσιμεντοπολτού αντιδρά με τα χλωριόντα και τα δεσμεύει, περιορίζοντας την ποσότητα αυτών που διαχέονται προς τον οπλισμό κάτω από 0,4% έως 0,6% που απαιτείται για την διάτρηση του προστατευτικού οξειδίου. Με την αντίδραση όμως του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ κατά την ενανθράκωση τα δεσμευμένα χλωριόντα απελευθερώνονται προσβάλλοντας έτσι το χάλυβα.

2.1.2.1 Παράμετροι που επηρεάζουν τη διάβρωση του χάλυβα από χλωριόντα.

- **Ποιότητα και πάχος της επικάλυψης:** Μικρός λόγος N/T εξασφαλίζει πυκνό σκυρόδεμα με μικρή διαπερατότητα.
- **Περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο-πρόσθετα:** Το σκυρόδεμα θα πρέπει να περιέχει περισσότερο από 8% C_3A κ.β. τσιμέντου ώστε να δεσμεύσει τα χλωριόντα. Οι προσμίξεις στο σκυρόδεμα επηρεάζουν την ικανότητα του σκυροδέματος να δεσμεύσει τα χλωριόντα.
- **Είδος και συγκέντρωση των χλωριόντων:** Το CaCl_2 προκαλεί μεγαλύτερη διάβρωση του χάλυβα απ' ό,τι το NaCl . Αυξάνοντας τη συγκέντρωση των χλωριόντων αυξάνεται ο βαθμός διάβρωσης του χάλυβα έως ενός σημείου. Περαιτέρω όμως αύξηση των χλωριόντων προκαλεί μείωση του βαθμού διάβρωσης του χάλυβα.
- **Περιβάλλον:** Η διείδυση των χλωριόντων μπορεί να γίνει είτε σε ξηρό περιβάλλον είτε σε περιβάλλον με μεγάλο ποσοστό υγρασίας. Η διείδυση χλωριόντων σε υγρό περιβάλλον είναι η συνηθέστερη και πιο σοβαρή μορφή διείδυσης. [2]

2.2 Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟΥΣ ΠΟΡΟΥΣ.

Για να αρχίσει και να συνεχισθεί η διάβρωση πρέπει οι πόροι του σκυροδέματος να είναι μερικώς γεμάτοι και όχι τελείως γεμάτοι με νερό, ώστε να είναι δυνατή η συνεχής παροχή αέρα για τη διάχυση οξυγόνου στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Γι' αυτό στοιχεία σκυροδέματος που είναι μόνιμα βυθιζόμενα στο νερό ή βρέχονται συνεχώς δεν έχουν προβλήματα διάβρωσης.

Η ύπαρξη του νερού στους πόρους είναι απαραίτητη τόσο κατά το προπαρασκευαστικό στάδιο της διάβρωσης, στο οποίο γίνεται η μεταφορά των χλωριόντων από το εξωτερικό περιβάλλον προς τις ράβδους, όσο και κατά την αντίδραση του CO_2 με το εν διάλυση $\text{Ca}(\text{OH})_2$ κατά την ενανθράκωση. Η μεταφορά των χλωριόντων είναι ταχύτερη όταν οι πόροι είναι σχεδόν γεμάτοι με νερό, δηλαδή για σχετική υγρασία περιβάλλοντος κοντά στο 100% ή όταν το δομικό στοιχείο είναι μερικώς βυθισμένο σε νερό οπότε οι πόροι του υπολοίπου είναι σχεδόν πάντα γεμάτοι λόγω τριχοειδούς ανύψωσης. Αντιθέτως η ενανθράκωση προϋποθέτει μερικώς γεμάτους πόρους, ώστε να επιτρέπεται η διείσδυση του CO_2 προς το εσωτερικό. Έτσι ο ρυθμός ενανθράκωσης είναι μέγιστος για σχετική υγρασία κοντά στο 50%.

Το σκυρόδεμα όπως όλα τα πορώδη υλικά, αποβάλλει το νερό δυσκολότερα απ' ότι το απορροφά. Έτσι όταν έχουμε αυξομειώσεις της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος ή περιοδική διαβροχή, η μέση ποσότητα νερού στους πόρους του είναι μεγαλύτερη από την μέση υγρασία περιβάλλοντος. Η επιπλέον ποσότητα νερού επιβραδύνει την ενανθράκωση, γι' αυτό και το σκυρόδεμα σε επαφή με το περιβάλλον ενανθρακώνεται σε μικρότερο βαθμό από το αντίστοιχο σε επαφή με εσωτερικούς χώρους.

Στη χώρα μας το ξηρό κλίμα δεν ευνοεί τη διάβρωση των οπλισμών. Αυτό που την προκαλεί συνήθως είναι οι εναλλαγές διαβροχής-ξήρανσης (ή υψηλής-χαμηλής σχετικής υγρασίας). [6]

2.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ.

Ο έλεγχος του σκυροδέματος, γίνεται με ψεκασμό φαινολοφθαλεϊνης σε φρεσκοθραυσμένες επιφάνειες και από το χρωματισμό της επιφάνειας καταλαβαίνουμε την κατάσταση του σκυροδέματος (Εικόνα 2.2). Ουσιαστικά πρόκειται για έναν έλεγχο του pH του σκυροδέματος: το υγιές σκυρόδεμα έχει pH 12.5, το pH στο ξεκίνημα της ενανθράκωσης είναι 9, ενώ όταν είναι πλήρως ενανθρακωμένο το pH είναι 8.

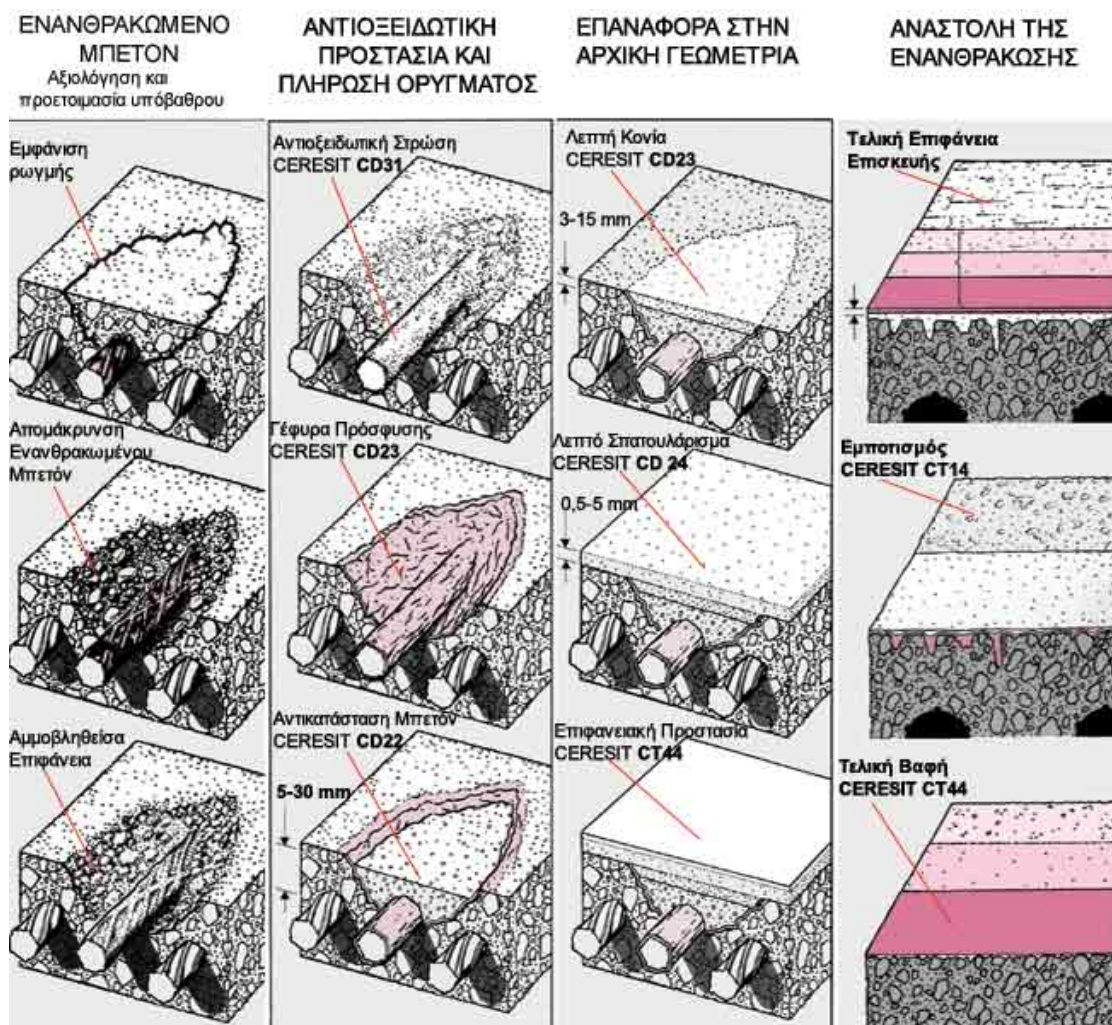
Μετά την εκτίμηση της κατάστασης του σκυροδέματος ακολουθούν οι διαδικασίες για την επισκευή και την αποκατάστασή του (Εικόνα 2.3).

I. Απομάκρυνση του ενανθρακωμένου σκυροδέματος έως ότου βρούμε υγιές σκυρόδεμα και να αποκαλυφθεί ο διαβρωμένος οπλισμός.

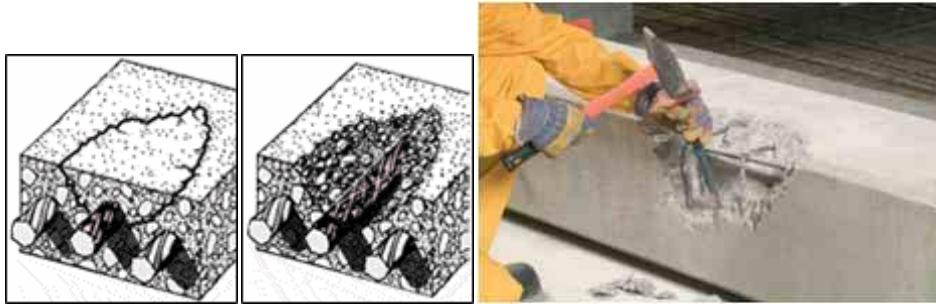
Σε κάθε σημείο με προφανείς ενδείξεις του φαινομένου τις ενανθράκωσης, ξεκινάμε με τη μηχανική απομάκρυνση του μη λειτουργικού μπετόν (Εικόνα 2.4). Επίσης κρίνεται αναγκαίο να ληφθούν δείγματα μπετόν και να προσδιοριστεί το βάθος της ζώνης της ενανθράκωσης, με τη βοήθεια διαλύματος φαινολοφθαλεϊνης. Αφού προσδιοριστεί το βάθος ενανθράκωσης ελέγχουμε εάν η επικάλυψη του οπλισμού το υπερβαίνει.



Εικόνα 2.2 Δοκίμιο σκυροδέματος το οποίο έχει ψεκασθεί με διάλυμα φαινολοφθαλείνης. Το τμήμα στο οποίο δεν παρουσιάζεται αλλαγή χρώματος (δεξιά) είναι ενανθρακωμένο. Το αριστερό τμήμα (χρώματος ροζ-βυσσινί) δεν έχει ενανθρακωθεί. [1]



Εικόνα 2.3 Διαδικασία αναστολής ενανθράκωσης σε ήδη ενανθρακωμένο δοκίμιο από μπετόν. [3]

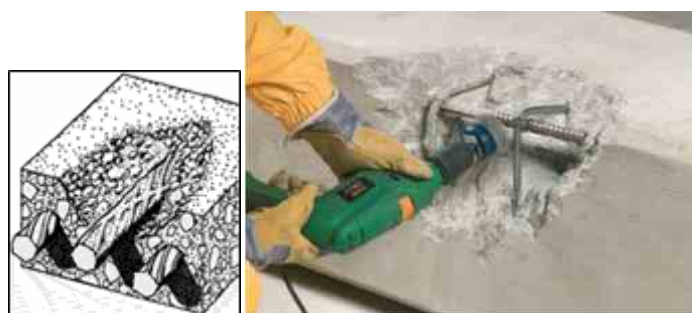


Εικόνα 2.4 Εμφάνιση ρωγμής – Απομάκρυνση ενανθρακωμένου μπετόν. [5]

Ο έλεγχος του οπλισμού γίνεται με μαγνητόμετρα, ή με σημειακές αποκαλύψεις. Μετά την ολοκλήρωση της εξέτασης του μπετόν αφαιρούμε τα επισφαλή τμήματά του. Στην περιοχή γύρω από τον οπλισμό, η αφαίρεση γίνεται χειρονακτικά με καλέμι. Ο οπλισμός πρέπει να αποκαλύπτεται περιμετρικά για να επιτευχθεί η πλήρης απομάκρυνση της ενανθρακωμένης ζώνης. Το περίγραμμα από το τμήμα που εξορύξαμε δεν πρέπει να σβήνει στο μηδέν αλλά να δημιουργεί «σκαλοπάτι» και συνθήκες πακτώσεως των μετέπειτα υλικών σφράγισης.

II. Επιμελής αφαίρεση της σκουριάς από την επιφάνεια του οπλισμού.

Αρχικά καθαρίζουμε τον αποκαλυφθέντα οπλισμό με κατάλληλες μεθόδους (αμμοβολή, συρματόβουρτσα κ.λπ., Εικόνα 2.5). Οι σχολαστικές εργασίες εξασφαλίζουν τη μονιμότητα της αποκατάστασης. Ο καθαρισμός οφείλει να γίνεται σύμφωνα με τον κανονισμό DIN 55 928 και η συνολική επιφάνεια του οπλισμού που αποκαλύφθηκε να αποκτήσει το βαθμό καθαρότητας Sa 2 ½. Η απομάκρυνση της σκουριάς πρέπει να γίνεται με ξηρό καιρό και η υγρασία του μπετόν να είναι μικρότερη του 4%. Η θερμοκρασία της επιφάνειας πρέπει να βρίσκεται 30° C πάνω από το σημείο συμπύκνωσης υδρατμών. Οι προετοιμασίες τελειώνουν με καθαρισμό της ευρύτερης περιοχής με σκούπισμα, βούρτσισμα, απορρόφηση ή φύσημα με πεπιεσμένο αέρα ο οποίος δεν περιέχει έλαια λίπανσης.

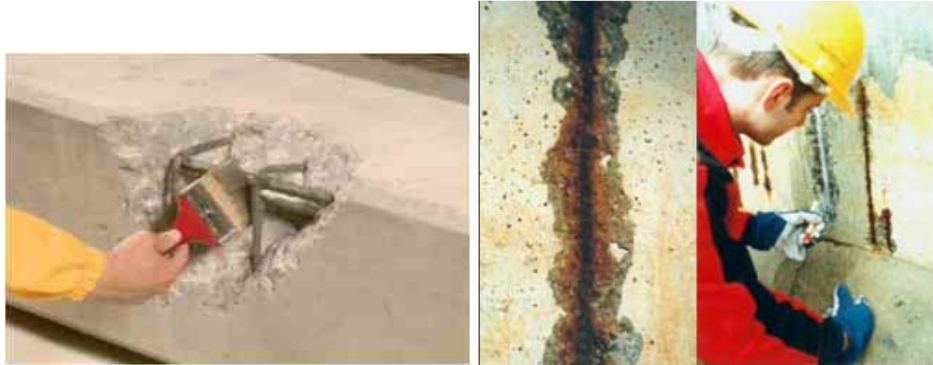


Εικόνα 2.5 Αμμοβληθείσα επιφάνεια – Αφαίρεση σκουριάς. [5]

III. Εφαρμογή εποξειδικής αντιοξειδωτικής στρώσης για την προστασία του οπλισμού.

Δύο έως τρεις ώρες μετά την απομάκρυνση της σκουριάς και της σκόνης ακολουθεί ένα πρώτο χέρι επάλειψης της συνολικής επιφάνειας του οπλισμού με ειδικό εποξειδικό αντιδιαβρωτικό υλικό (Εικόνα 2.6). Σε περίπτωση που έχουμε αποκαλύψει τον οπλισμό

περιμετρικά επαλείφουμε μόνο το μέταλλο. Το αντιδιαβρωτικό υλικό έχει την ιδιότητα να διεισδύει ηλεκτροχημικά, μέσω του μπετόν επί του καλυμμένου και οξειδωμένου οπλισμού στο πίσω μέρος, αδρανοποιώντας την. Ακολουθεί ένα δεύτερο χέρι όταν το πρώτο αρχίζει μεν να πήζει προτού όμως χάσει πλήρως την κολλητικότητα του (μετά από 2 ώρες). Στην δεύτερη αυτήν στρώση, 20 λεπτά μετά την επάλειψη γίνεται η επίπαση ή συμπίεση άμμου. Ιδανικότερη άμμος είναι η χαλαζιακή 0,2-0,7mm τελείως ξηρή.



Εικόνα 2.6 Αντιοξειδωτική στρώση. [5]

IV. Δημιουργία γέφυρας πρόσφυσης που εξασφαλίζει τη συγκόλληση των επισκευαστικών κονιαμάτων στο παλαιό μπετόν.

Μετά την σκλήρυνση της αντιοξειδωτικής στρώσης ακολουθεί διαβροχή της επιφάνειας, έτσι ώστε να χάσει την απορροφητικότητά της και να αποκτήσει μια υγρή ματ εμφάνιση. Ακολούθως επαλείφουμε με ένα υλικό το οποίο λειτουργεί ως γέφυρα πρόσφυσης μεταξύ παλαιών και νέων υλικών. Η επάλειψη γίνεται με πινέλο ή βούρτσα. Αν το πάχος της ζώνης επισκευής είναι από 3-15mm μόνο, μπορούμε να το συμπληρώσουμε με το ίδιο υλικό της γέφυρας πρόσφυσης, αμέσως, και μάλιστα από το ίδιο χαρμάνι και να έλθουμε «πρόσωπο» με το μπετόν.

V. Πλήρωση του κενού με χονδρόκοκκο κονίαμα.

Εάν τα πάχη είναι μεγάλα (5-30mm) το μπετόν που αφαιρέθηκε αντικαθίσταται με χονδρόκοκκο υλικό επισκευής, το οποίο τοποθετείται αμέσως πάνω στην ακόμα νωπή γέφυρα πρόσφυσης (Εικόνα 2.7). Με το χονδρόκοκκο αυτό υλικό ερχόμαστε σχεδόν «πρόσωπο» με την επιφάνεια του σκυροδέματος. Σε περιπτώσεις εμφανούς σκυροδέματος μπορούμε να επιτύχουμε καλύτερη επιφάνεια απλώνοντας μια στρώση λεπτόκοκκου υλικού (γέφυρα πρόσφυσης).



Εικόνα 2.7 Πλήρωση κενού. [5]

VI. Δημιουργία φράγματος ενανθράκωσης με την επάλειψη ειδικών υλικών.

Αφού ολοκληρωθούν οι εργασίες αποκατάστασης και σκληρυνθούν πλήρως τα κονιάματα επισκευής, μπορούμε να προχωρήσουμε στην επάλειψη των φραγμάτων ενανθράκωσης που σταματούν το φαινόμενο στο στάδιο που αυτό έχει έλθει μετά τις επισκευαστικές εργασίες. Η πρώτη στρώση αποτελείται από το υλικό προεπάλειψης (ακρυλική ρητίνη, ένα πλούσιο χέρι με βούρτσα).

Ακολουθεί ένα πρώτο χέρι με ειδικό χρώμα που συνήθως αποτελεί ένα δραστικό φράγμα CO₂,SO₂, χλωριδίων και νερού χωρίς να επηρεάζει τη διαπνοή. Τέτοιου είδους υλικά αραιώνονται με νερό ανάλογα με τις προδιαγραφές τις εταιρείας παρασκευής και επαλείφονται εύκολα με βούρτσα, ρολό ή πιστόλι airless.

Με τον τρόπο αυτό μπορεί να αναχαιτιστεί κάθε μελλοντική ενανθράκωση ενώ ο συνδυασμός συγκεκριμένων υλικών μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε υπέρβαση των προδιαγραφών του DIN άνω του 400%.

Σημειώνεται ότι ειδικά χρώματα όπως τα υλικά που αναφέρθηκαν δεν έχουν μόνο θεραπευτική εφαρμογή, μετά τις προαναφερθείσες εργασίες αποκατάστασης αλλά και προληπτικά ώστε να μην χρειασθεί ποτέ να εκτελέσουμε αυτές τις τόσο εκτεταμένες και συχνά πολυδάπανες εφαρμογές. Η πρόληψη προϋποθέτει ότι το βάθος της ζώνης ενανθράκωσης είναι μηδαμινό ή δεν έχει υπερβεί ακόμη το πάχος επικάλυψης του οπλισμού.

Από τη στιγμή που η επιφάνεια επικαλύπτεται με τα υλικά αυτά σταματά το φαινόμενο στο σημείο που ήδη βρίσκεται. Η εφαρμογή δε είναι ίδια με εκείνη της αποκατάστασης. [5]

Βιβλιογραφικές Αναφορές 2^ο Κεφαλαίου

[1] Πρακτικά – Διδακτικά Εγχειρίδια. Μέθοδοι για την επιτόπου αποτίμηση των Χαρακτηριστικών των υλικών, Χρ. Σπανός, Μ. Σπιθάκης και Κ. Τρέζος, Αθήνα, Μάιος 2001.

[2] Θ.Π. Τάσιος και Κ. Αλιγιζάκη (1993). Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος. Εκδόσεις Φοίβος, Αθήνα.

[3] http://www.panagopoulos.gr/v1/technical_solution_product/view_by_category/23

[4] Διαφημιστικό φυλλάδιο Sika, Τεχνολογία και συστήματα για την επισκευή και προστασία οπλισμένου σκυροδέματος.

[5] http://www.renovat.gr/technical/skurodema_beton/enanthrakosi_oplismou_skyrodematos

[6] Μιχαήλ Ν. Φαρδής, Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος ΙΙΙ, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2005.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΔΙΑΒΡΩΣΗ

3.1 ΣΗΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.

Όταν αναφερόμαστε στον όρο διάβρωση εννοούμε μια σειρά από φυσικοχημικές δράσεις που συμβαίνουν στα στοιχεία μιας κατασκευής και έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής και της λειτουργικότητας τους, όπως και την αλλαγή στην αισθητική εμφάνιση τους. Όλα αυτά καθιστούν απαραίτητη την προσοχή του πολιτικού μηχανικού. Μιλώντας για διάβρωση στα στοιχεία μιας κατασκευής ουσιαστικά αναφερόμαστε στη διάβρωση του οπλισμού της κατασκευής. Η διάβρωση του σιδήρου του οπλισμού μπορεί να απειλήσει την ασφάλεια και την καταλληλότητα των κατασκευών. Πρόκειται για ένα μεγάλο πρόβλημα σε παγκόσμια βάση μια και, σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, οι δαπάνες φτάνουν τα 200 – 500 εκ. δολάρια ετησίως, στις Ηνωμένες Πολιτείες, για ελέγχους, καταγραφές καθώς και επισκευές διαβρώσεων. Στην Αυστραλία, σύμφωνα με πρόσφατες εκτιμήσεις κόστους, το κόστος από τη διάβρωση του σιδηροπλισμού ανέρχεται στο 3 – 4% του ΑΕΠ.

Η διάβρωση του χάλυβα στο οπλισμένο σκυρόδεμα, αποτελεί ένα παγκόσμιο πρόβλημα το οποίο είναι δυνατόν να προκαλέσει καταστροφές οι οποίες κυμαίνονται από απλές παραμορφώσεις μέχρι ολοκληρωτικές δομικές καταστροφές. Παρά τη σοβαρότητα του φαινομένου κανείς δεν είχε προβληματιστεί πριν το πρώτο σχετικό συνέδριο που πραγματοποιήθηκε το 1978, το οποίο συγκέντρωσε τεράστιο ενδιαφέρον συμμετοχής και υιοθετήθηκε από το Ινστιτούτο Πολιτικών Μηχανικών (Institute of Civil Engineers), την Ομοσπονδία Τσιμέντου (Concrete Society) και από την Συνομοσπονδία Μηχανικών Διάβρωσης (NACE).

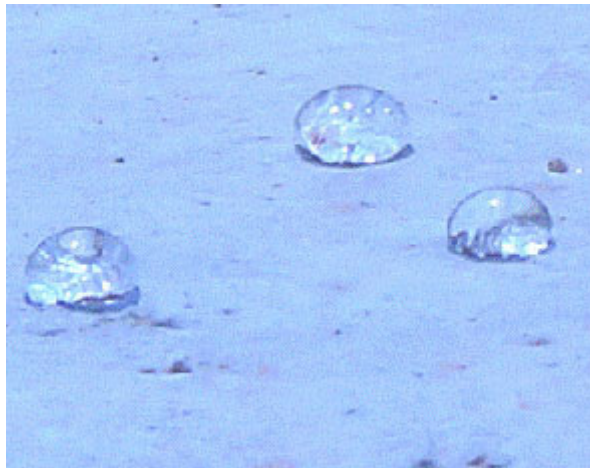
Η παραγωγή σκυροδέματος που να αποτρέπει πλήρως τη διάβρωση του οπλισμού είναι πρακτικά αδύνατη, είτε λόγω κατασκευαστικών αναγκών οι οποίες επιβάλλουν διακλαδώσεις, είτε λόγω αποκλίσεων από τις προδιαγραφές παρασκευής που επιτρέπουν τη δημιουργία διαύλων διεισδύσεως οξυγόνου και υγρασίας, δημιουργώντας έτσι τις προϋποθέσεις διάβρωσης του χάλυβα. Κατ' επέκταση το πρόβλημα της διάβρωσης είναι δυνατόν να καταλήξει ακόμη και στην αποκάλυψη του χάλυβα, τη μείωση της μάζας του και τελικά τη μείωση της αντοχής του σύνθετου συστήματος σκυροδέματος – σιδηροπλισμού. Στον τομέα των κατασκευών δίνεται περισσότερη έμφαση στην παράμετρο αντοχή και όχι στη διάρκεια ζωής του έργου. Αυτό αποκαλύπτει τη διάχυτη ιδέα πως μια κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα δεν θα χρειασθεί, καλώς εχόντων των πραγμάτων, να ελεγχθεί ή να επισκευαστεί. Αν δεν ληφθεί όμως υπόψη και το ενδεχόμενο του ελέγχου ή της επισκευής ενός έργου στη φάση του σχεδιασμού τα πράγματα γίνονται δύσκολα και πολύ δαπανηρά. Σε κάποιες περιπτώσεις διάβρωσης οπλισμένου σκυροδέματος, η έλλειψη προσβασιμότητας οδήγησε στην κατεδάφιση ενός κτιρίου λόγω του υψηλού κόστους αλλά και της δυσκολίας απομάκρυνσης των διαβρωμένων στοιχείων. [1]

3.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ.

Το φαινόμενο της διάβρωσης οφείλεται κυρίως στην είσοδο του νερού στο σκυρόδεμα. Οι κύριες προελεύσεις του νερού είναι οι παρακάτω: [3]

- 1) Υγρασία από φυσικά φαινόμενα (βροχή, χαλάζι, χιόνι).
- 2) Υγρασία του εδάφους.
- 3) Υπέργεια νερά (ρέοντα και λιμνάζοντα νερά).
- 4) Υπόγεια νερά (πηγές και διείσδυση θαλάσσιων νερών).
- 5) Υγρασία των εσωτερικών χώρων (συμπύκνωση υδρατμών αέρα, νερά σωληνώσεων).

Το νερό διεισδύει στο σκυρόδεμα λόγω των ρωγμών που δημιουργούνται στην επιφάνεια του ή λόγω της αύξησης του πορώδους (Εικόνα 3.1). Το πορώδες του σκυροδέματος αυξάνεται λόγω της γήρανσης κυρίως, της κακής ποιότητας και αναλογίας των συστατικών του ή της κακής συντήρησης. Η κίνηση του νερού στους πόρους του σκυροδέματος δημιουργεί κυψέλες κατακράτησης.



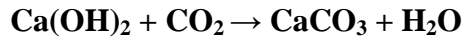
Εικόνα 3.1 Νερό στους πόρους του σκυροδέματος. [2]

Η υψηλή αλκαλικότητα του σκυροδέματος δημιουργεί ένα πολύ λεπτό στρώμα ένυδρο οξειδίου του σιδήρου στις επιφάνειες των ράβδων οπλισμού. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως παθητικοποίηση του χάλυβα και ουσιαστικά τον προστατεύει από τη διάβρωση και τον διατηρεί ανέπαφο για μεγάλο χρονικό διάστημα από εξωτερικές προσβολές. Η αλκαλικότητα του σκυροδέματος οφείλεται στη συγκέντρωση ισορροπίας του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ στο νερό των πόρων και αντιστοιχεί σε τιμή pH από 12,5 έως 13,2. Τα αλκαλικά προϊόντα ενυδάτωσης του τσιμέντου, παρουσία οξυγόνου και υγρασίας, προκαλούν την ύπαρξη του $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Το φαινόμενο της αποπαθητικοποίησης του χάλυβα, δηλαδή η καταστροφή του λεπτού προστατευτικού στρώματος από ένυδρο οξύδιο του σιδήρου, μπορεί να συμβεί με τους εξής τρόπους: [3]

- **Τοπικά από ιόντα χλωρίου.** Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο τα ιόντα χλωρίου κυρίως προέρχονται από αδρανή που έχουν συλλεχθεί από παραλίες και θαλασσινό νερό ανάμιξης, από πρόσμικτα βελτιωτικά του μπετόν, από χλωριούχα

άλατα που περιέχουν ή ακόμη και από τον ατμοσφαιρικό αέρα (κυρίως σε παράκτιες περιοχές).

- **Γενικά από την ενανθράκωση του σκυροδέματος.** Η ενανθράκωση του σκυροδέματος, που έχει αναλυθεί εκτενέστερα σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι αποτέλεσμα της χημικής αντίδρασης του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) που υπάρχει στην ατμόσφαιρα με το υδροξείδιο του ασβεστίου [Ca(OH)₂] που υπάρχει στο σκυρόδεμα.



Οι δύο τρόποι αποπαθητικοποίησης του χάλυβα είναι δύο διαδικασίες αλληλοεξαρτώμενες καθώς η ενανθράκωση προκαλεί ραγδαία επιτάχυνση της διείδυσης χλωριόντων στο σκυρόδεμα.

3.3 ΜΟΡΦΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.

Γενική ή ομοιόμορφη διάβρωση.

Τα προϊόντα της διάβρωσης καλύπτουν σχεδόν ομοιόμορφα όλη την επιφάνεια του μετάλλου. Όταν καταστραφεί το προστατευτικό στρώμα αρχίζει η διάβρωση, πράγμα που συμβαίνει όταν η αλκαλικότητα του σκυροδέματος χάνεται σε ευρεία περιοχή. Οι αιτίες που μπορούν να προκαλέσουν τη μείωση του pH σε ευρεία περιοχή είναι:

- Η επίδραση μαλακού νερού προκαλεί απόπλυση του υδροξειδίου του ασβεστίου Ca(OH)₂ του σκυροδέματος.
- Η ενανθράκωση του σκυροδέματος.
- Η πιθανή επίδραση θεικών ή ανθρακικών αλάτων.

Τοπική διάβρωση.

I. Διάβρωση κατά βελονισμό.

Ο συγκεκριμένος τύπος διάβρωσης μπορεί να προκληθεί αποκλειστικά και μόνο από την επίδραση χλωριόντων που υπήρχαν εξ' αρχής στο σκυρόδεμα, είτε διείδυσαν αργότερα από το περιβάλλον. Οι πόροι που είναι γεμάτοι ή μερικώς γεμάτοι με νερό είναι αυτοί που επιτρέπουν τη διείδυση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Μεγάλη επικινδυνότητα κρύβει η εναλλασσόμενη διαβροχή και ξήρανση της επιφάνειας του μπετόν από νερό που περιέχει ποσότητα χλωριούχων αλάτων. Ο τσιμεντοπολτός του σκυροδέματος δεσμεύει μία ποσότητα των χλωριόντων, αλλά τα υπόλοιπα παραμένουν ελεύθερα από τα οποία προκαλείται και η διάβρωση. Η δεσμευμένη ποσότητα χλωριόντων μπορεί να αγγίζει το 0.4-0.6% του βάρους του τσιμέντου. Έτσι έχουμε το σχηματισμό άλατος Friedell [3CaO·Al₂O₃·CaCl₂·10H₂O] το οποίο είναι αβλαβές για τον οπλισμό. Η παρουσία θεικών αλάτων ή η ενανθράκωση του σκυροδέματος προκαλεί τη διάσπαση του άλατος Friedell, πράγμα που προκαλεί την απελευθέρωση των χλωριόντων. Έτσι μετά την ενανθράκωση, οι σιδηροπλισμοί του σκυροδέματος είναι πιο εύκολο να υποστούν διάβρωση ακόμα και αν η ποσότητα των χλωριόντων είναι μικρή.

II. Μικρορρηγματώδης διάβρωση.

Αυτός ο τύπος διάβρωσης είναι ανάλογος με τη διάβρωση κατά βελονισμό, με τη διαφορά ότι δεν αρχίζει σε «υγρή» επιφάνεια αλλά σε μικρορρωγμές και μικροκοιλότητες της επιφάνειας του χάλυβα.

III. Διάβρωση μεταξύ των κόκκων.

Η συγκεκριμένη διάβρωση εμφανίζεται στο μέταλλο και όχι στην επιφάνειά του. Συμβαίνει συνήθως σε κράματα και όταν υπάρχει διαφορά δυναμικού. Η αποφυγή αυτής της διάβρωσης μπορεί να επιτευχθεί με μικρές ποσότητες άνθρακα (μικρότερη από 0.05%).

Διάβρωση λόγω ανάπτυξης εξωτερικής διαφοράς δυναμικού.

I. Γαλβανική δράση.

Όταν δύο διαφορετικά μέταλλα έρθουν σε επαφή αναπτύσσεται μια ηλεκτροχημική δράση που ονομάζεται γαλβανική. Κάθε μέταλλο έχει το δικό του κανονικό δυναμικό. Η επαφή δύο μετάλλων με την παρουσία μικρής ποσότητας υγρασίας σχηματίζει ένα μικρό ηλεκτροστοιχείο διάβρωσης. Όταν η διαφορά δυναμικού των δύο μετάλλων υπερβαίνει τα 50 mV τότε υπάρχει κίνδυνος διάβρωσης. Η παρουσία χλωριούχων ή θεικών αλάτων καθιστά μεγαλύτερη την πιθανότητα διάβρωσης.

II. Ηλεκτρολυτική διάβρωση.

Η άμεση εφαρμογή ρεύματος σε μια κατασκευή από κάποια εξωτερική πηγή προκαλεί την ηλεκτρολυτική διάβρωση, η οποία μπορεί να περιοριστεί με τους εξής τρόπους:

- Χρήση πολύ καλής ποιότητας σκυροδέματος, χωρίς χλωριόντα.
- Δημιουργία ηλεκτρικής μόνωσης μεταξύ της κατασκευής και της εξωτερικής πηγής ρεύματος (π.χ. διάφραγμα πολυαιθυλενίου).

III. Διάβρωση από τριβή.

Ορίζεται η προσβολή που συμβαίνει μεταξύ δύο επιφανειών, όταν υπό φόρτιση υφίστανται ελαφριά σχετική ολίσθηση, συνήθως παλμική, η μία προς την άλλη.

IV. Διάβρωση από κόπωση.

Προκαλείται από τη συνδυασμένη δράση κυκλικών τάσεων και διαβρωτικής προσβολής, δηλαδή γρήγορα εναλλασσομένων θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων. Η συγκεκριμένη διάβρωση μπορεί να συμβεί και από χαμηλές τάσεις, μικρότερες του ορίου κόπωσης.

Διάβρωση υπό μηχανική τάση.

Η συγκεκριμένη διάβρωση εμφανίζεται σε χάλυβες υψηλής αντοχής υπό τάσεις που ξεπερνούν τα $0.8f_{py}$. Ο μηχανισμός της διάβρωσης υπό μηχανική τάση είναι πολύπλοκος και δεν έχει αποσαφηνισθεί πλήρως καθώς στην κατασκευή ούτε δημιουργείται σκουριά ούτε παρατηρείται απώλεια διατομής. Προκαλείται λόγω του διαβρωτικού περιβάλλοντος και της

ανάπτυξης πρόσθετης διαφοράς δυναμικού. Η διάβρωση του χάλυβα υπό μηχανική τάση μπορεί να συνοδευτεί από ψαθυροποίησή του λόγω εκλύσεως υδρογόνου. Οι χάλυβες που μπορούν να αποφύγουν τη διάβρωση που προκαλούν τα χλωριόντα είναι αυτοί που περιέχουν μεγάλες ποσότητες νικελίου. [4]

Σπηλαιώδης διάβρωση.

Αυτού του τύπου η διάβρωση οφείλεται στο σχηματισμό φυσαλίδων ατμού, μέσα σε ένα ρευστό που κινείται με μεγάλη ταχύτητα, οι οποίες σπάνε κοντά στον οπλισμό προκαλώντας κύματα σύγκρουσης.

Άλλες μορφές διάβρωσης.

- I. Θερμογαλβανική διάβρωση.
- II. Διάβρωση από ρεύματα διαφυγής.
- III. Ρευστομηχανική διάβρωση.
- IV. Περικρυσταλλική διάβρωση.

Οι πιο συνηθισμένες μορφές διάβρωσης που συναντά ο Πολιτικός Μηχανικός είναι η ομοιόμορφη και η τοπική διάβρωση. Ο εντοπισμός τους είναι εύκολος, καθώς είναι εύκολα ορατές. Η κύρια διαφορά τους είναι πως η ομοιόμορφη διάβρωση παρουσιάζεται ομοιόμορφα κατά το μήκος της ράβδου του οπλισμού, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2 Ομοιόμορφη διάβρωση [5]

Η ομοιόμορφη διάβρωση συμβαίνει σε περιπτώσεις που η ενανθράκωση του σκυροδέματος έχει φτάσει στο βάθος όπου βρίσκονται οι χαλύβδινες ράβδοι και μικρές ποσότητες υγρασίας. Η φθορά που προκαλείται εμφανίζεται στην επιφάνεια των δομικών στοιχείων σαν μια λεπτή σχισμή (ρηγμάτωση) παράλληλη στον οπλισμό, όπως είναι εμφανές και στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 3.2).

Αντιθέτως, η τοπική διάβρωση εμφανίζεται σε συγκεκριμένες θέσεις όπως το παράδειγμα παρακάτω στην Εικόνα 3.3, όπου η διάβρωση της πλάκας έχει προκληθεί από συσσώρευση υγρασίας ακριβώς πάνω από εκείνο το σημείο.



Εικόνα 3.3 Τοπική διάβρωση [6]

Η τοπική διάβρωση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διατομής στο συγκεκριμένο σημείο όπου έχει προκληθεί ενώ η υπόλοιπη ράβδος μπορεί να παραμείνει ανέπαφη. Όπως προαναφέρθηκε, η συσσώρευση υγρασίας, η αυξημένη συγκέντρωση ιόντων χλωρίου και κάποιες περιπτώσεις προέκτασης ή συγκόλλησης ράβδων χάλυβα μπορούν να αποφέρουν στην κατασκευή τέτοιου είδους διάβρωση. Οι συνέπειες αυτής είναι η μείωση της διατομής των ράβδων και η μείωση της ικανότητας τους να φέρουν φορτίο. Σε ορισμένες περιπτώσεις η τοπική διάβρωση μπορεί να κάνει τις ράβδους εύθραυστες με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν ορατές προειδοποιήσεις για την μειωμένη αντοχή της κατασκευής. Σε άλλες περιπτώσεις το πρόβλημα γίνεται ορατό με την παρουσία ρηγματώσεων στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

3.4 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ.

Το φαινόμενο της ατμοσφαιρικής διάβρωσης είναι αποτέλεσμα της επίδρασης της ατμόσφαιρας στις κατασκευές, ένα φαινόμενο που έχει μελετηθεί εκτεταμένα καθώς η επίδραση του περιβάλλοντος αφορά κτίρια, γέφυρες, पुलώνες κτλ. Πρόκειται για ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο που εκδηλώνεται με τη μορφή ενός γαλβανικού στοιχείου όπου η παρουσία επιφανειακού ηλεκτρολύτη προχωράει την αντίδραση. Οι παράγοντες που επιταχύνουν την ατμοσφαιρική διάβρωση είναι:

- ✓ Τα υγροσκοπικά άλατα
- ✓ Η σχετική υγρασία
- ✓ Το pH
- ✓ Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι
- ✓ Η παρουσία ομίχλης σε περιβάλλον με ρύπους

Σε περιοχές που η ποσότητα των ρύπων είναι μεγάλη έχει παρατηρηθεί πως το pH είναι κοντά στο 3. Επιπροσθέτως, σε επιφάνειες που γίνεται απόθεση εν ξηρώ, μεταξύ περιόδων βροχής, μπορεί να συγκεντρωθούν όξινοι και διαβρωτικοί ρυπαντές. Επιπλέον έχουν παρατηρηθεί συγκεντρώσεις χλωριόντων $0.35\text{g Cl}^- / \text{l}$ και $0.20\text{g SO}_4^{2-} / \text{l}$, ποσότητες 100 φορές μεγαλύτερες από τις κανονικές ποσότητες που συνήθως βρίσκονται στο νερό της βροχής. Το φαινόμενο που προαναφέρθηκε έχει προκαλέσει φθορά (τρύπημα) σε γαλβανισμένες στέγες μέσα σε διάστημα 3 χρόνων. Η δροσιά αφήνει στις επιφάνειες περίπου 10 g/m^2 νερό ενώ η βροχή περίπου 100 g/m^2 και παράλληλα ξεπλένει και τους ρύπους. Για το λόγο αυτό ο χρόνος που μια επιφάνεια μένει υγρή σε σχέση με το χρονικό διάστημα που παραμένει στεγνή επιδρά σε αυτό το φαινόμενο.

Ο υπολογισμός του χρόνου που μια επιφάνεια είναι υγρή είναι πολύ δύσκολο να υπολογισθεί πειραματικά καθώς τα αποτελέσματα αναιρούνται από τις μετεωρολογικές μετρήσεις.

Η δράση ενός ρυπαντή σε κάποιο σημείο όπως και οι επιπτώσεις της δράσης του εξαρτώνται από:

- ο Τη φύση του δέκτη της ρύπανσης.
- ο Τις κλιματολογικές συνθήκες.
- ο Την απόσταση του σημείου από την πηγή εκπομπής ρύπων.

Οι πορείες που ακολουθούν οι ατμοσφαιρικοί όξινοι ρυπαντές πριν την επίδραση τους στο περιβάλλον είναι:

- 1) Εκπομπή – Διασπορά – Ξηρή απόθεση.
- 2) Εκπομπή – Χημικός μετασχηματισμός / διασπορά – Ξηρή απόθεση.
- 3) Εκπομπή – Χημικός μετασχηματισμός / διασπορά – Υγρή κατακρήμνιση.

Η σημασία της ξηρής απόθεσης είναι μεγαλύτερη κοντά στην πηγή εκπομπής ρυπαντών, εμβέλειας μέχρι και 300χλμ , ενώ αντίθετα η υγρή κατακρήμνιση, με τη μορφή της όξινης βροχής, γίνεται πιο σημαντική σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Σε περιοχές χωρίς μεγάλες ποσότητες εκπομπής ρυπαντών και με υψηλές βροχοπτώσεις, η υγρή κατακρήμνιση αποτελεί το 65-80% της όξινης κατακρήμνισης, ενώ η ξηρή απόθεση υπερिशύει τους καλοκαιρινούς μήνες.

Η εκπομπή των εναέριων ρύπων γίνεται από φυσικές ή και από ανθρωπογενείς πηγές. Η εναπόθεση των εναέριων ρύπων γίνεται στα ποτάμια, στο έδαφος, στη βλάστηση και κυρίως στις θάλασσες.

Οι παράγοντες στους οποίους υπάρχει δυσμενής επιρροή από τον μολυσμένο αέρα ονομάζονται αποδέκτες. Οι ρυπογόνες ουσίες μπορούν να μεταφερθούν και μέσω του αέρα από την πηγή στον αποδέκτη. Παράγοντες των οποίων η επίδραση είναι άλλοτε θετική και άλλοτε αρνητική στη διασπορά των ρυπογόνων ουσιών είναι το ύψος εκπομπής του ρύπου αλλά και η διαφορά ταχύτητας μεταξύ ρυπογόνου αερίου και ανέμου. Παρακάτω (Πίνακας 3.1) κατατάσσονται οι πηγές και τα ιόντα των ρύπων.

Πίνακας 3.1: Οι ρύποι και οι πηγές τους. [8]

ΠΗΓΗ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΑΣ	ΙΟΝΤΑ
Ανθρωπογενής	Όξινος	H^+ , NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{-2}
Θάλασσα	Ουδέτερος	Na^+ , K^+ , Mg^+ , Ca^{+2} , SO_4^{-2} , Cl^-
Έδαφος	Αλκαλικός	Mg^{+2} , Ca^{+2}
Βιολογική δράση	Αλκαλικός	NH_4^+

Το θειικό και το νιτρικό οξύ που προκαλούνται από την ανθρώπινη δραστηριότητα αποτελούν την κυριότερη πηγή ισχυρών οξέων. Στην Ευρώπη οι ανθρωπογενείς πηγές εκπέμπουν πάνω από 90% των συνολικών εκπομπών SO_2 , ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για τα οξείδια του αζώτου είναι γύρω στο 50%. Στη βιομηχανία οι εκπομπές SO_2 κατά 63% οφείλονται στις καύσεις ενώ μόνο το 37% οφείλεται στην παραγωγική διαδικασία. Επιπλέον, η κυκλοφορία οχημάτων και η θέρμανση των κτιρίων αποτελούν σημαντικές πηγές ρυπαντών. Γενικότερα, παρατηρούνται μεγάλες συγκεντρώσεις οξειδίων του αζώτου στα μεγάλα αστικά κέντρα και μικρότερες στην περιφέρεια. [7],[8]

3.4.1 Διάβρωση χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος.

Δυστυχώς ο χάλυβας οπλισμένου σκυροδέματος, και κατά τη μεταφορά και κατά την αποθήκευση του στα εργοτάξια, βρίσκεται εκτεθειμένος στα χλωριόντα του θαλασσινού νερού, στο νερό της βροχής και στις ρυπογόνες ατμοσφαιρικές ουσίες για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η έκθεση του σε όλα τα παραπάνω δημιουργεί προϊόντα διάβρωσης στην επιφάνεια του.

Μετά από πειραματικές μελέτες έχει διαπιστωθεί πως τα χλωριόντα του θαλασσινού νερού προκαλούν διάβρωση με βελονισμό στο χάλυβα, φαινόμενο που αυξάνεται όσο έχουμε αύξηση της συγκέντρωσης των χλωριόντων με την εξάτμιση του νερού. Οι βελονισμοί που έχουν προκληθεί στην επιφάνεια του χάλυβα παραμένουν ενεργά κέντρα διάβρωσης όταν αυτός βρεθεί σε διαβρωτικό περιβάλλον, καθώς δεν μπορούν να αφαιρεθούν. Επίσης, οι εσοχές αυτές συγκεντρώνουν τάσεις κατά τη μηχανική φόρτιση, με κίνδυνο την έναρξη ψαθυρής θραύσης του χάλυβα.

Η ταχύτητα της διάβρωσης του χάλυβα μπορεί να αυξηθεί από: [9]

- ❖ Τη μείωση του pH.
- ❖ Την αύξηση της υγρασίας και της θερμοκρασίας.
- ❖ Την παρουσία χλωριόντων Cl^- .
- ❖ Την επαφή με το έδαφος.
- ❖ Την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε διοξείδιο του θείου SO_2 και οξείδια του αζώτου NO_x .
- ❖ Την ύπαρξη ενεργών κέντρων στην επιφάνεια του χάλυβα.
- ❖ Την ύπαρξη αρχικής διάβρωσης.

- ❖ Την επαφή χαλύβων διαφορετικού είδους και διαφορετικού ηλεκτροχημικού δυναμικού.
- ❖ Την επαφή χαλύβων με ήδη διαβρωμένους χάλυβες.

Για τους παραπάνω λόγους είναι προτιμότερο η αποθήκευση των οπλισμών να γίνεται σε στεγανοποιημένους χώρους. Γενικότερα συνίσταται, ο χάλυβας πριν τη χρήση του να μην παρουσιάζει τυχόν αλλοιώσεις ή παραμορφώσεις που να μπορούν να επιταχύνουν τη διάβρωση του.

Αυτό που τελικά μπορεί να χαρακτηρίσει κάποιο μέρος του χάλυβα ανοδικό και κάποιο άλλο καθοδικό είναι η ίδια η διάβρωση, καθώς πρόκειται για μια διεργασία ηλεκτρολυτικής φύσης η οποία πραγματοποιείται όταν το μέταλλο (χάλυβας) έρθει σε επαφή με έναν ηλεκτρολύτη (διάλυμα που περιέχει ιόντα) ή με κάποιο πιο ηλεκτροθετικό μέταλλο, οπότε και θα δημιουργηθεί ηλεκτρολυτικό ζεύγος ανόδου – καθόδου. Σε ένα τέτοιο ζεύγος μπορεί να υπάρξει μετασχηματισμός και μεταξύ δύο σημείων του ίδιου μετάλλου όταν υπάρχει διαφορά χημικής κατάστασης, μορφής ή και μεταξύ του μετάλλου και του οξειδίου του. [10]

Τα ζεύγη ανόδου – καθόδου που δημιουργούνται πάνω στο μέταλλο μπορούν να διακριθούν σε τοπικά και μακροσκοπικά γαλβανικά στοιχεία.

Ο χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος είναι ένα κράμα που από την παραγωγή του έχει οξειδία στην επιφάνειά του και κάποιες ανομοιομορφίες στη σύστασή του, λόγοι που συντελούν στη δημιουργία τοπικών γαλβανικών στοιχείων, τα οποία τυχαίνει να είναι διαφορετικής έντασης σε σχέση με άλλα γειτονικών περιοχών. Η διαφορά έντασης μπορεί να δημιουργεί διαφορετικά ηλεκτρικά δυναμικά, της τάξεως μερικών δεκάδων mV.

Οι λόγοι που μπορεί να δημιουργήσουν την παρουσία μακροσκοπικών γαλβανικών στοιχείων στην επιφάνεια του μετάλλου είναι η επαφή με χάλυβες διαφορετικής σύστασης, είτε η ύπαρξη περιοχών με διαφορετική τιμή pH ή διαφορετική ποσότητα χλωριόντων, είτε ακόμα και η ύπαρξη καλά αεριζόμενων και μη περιοχών. Το δυναμικό των γαλβανικών μακροσκοπικών στοιχείων μπορεί να φτάσει και την τάξη των εκατοντάδων mV. [11]

Και στις δύο περιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, δημιουργούνται στην επιφάνεια των ράβδων διάφορα προϊόντα οξειδωσης, οξειδία, υδροξειδία ή κάποιες χημικές ενώσεις τους. Με την πάροδο του χρόνου έχουμε αύξηση του πάχους των προϊόντων αυτών, με αποτέλεσμα αυτό το στρώμα που δημιουργείται να γίνεται επιβλαβές για τον οπλισμό και κατ' επέκταση για όλη την κατασκευή. [10]

Σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Χαλύβων, η παρουσία προϊόντων διάβρωσης στην επιφάνεια του χάλυβα, δεν μπορεί να θεωρηθεί βλαπτική, αντίθετα θεωρείται πως σε μικρές ποσότητες συνεισφέρει στη συνάφεια οπλισμού – σκυροδέματος. Η συνάφεια μπορεί να μειωθεί αν η ποσότητα των οξειδίων γίνει πολύ μεγάλη. Η παραπάνω παρατήρηση αναφέρεται στην περίπτωση που ο οπλισμός έχει υποστεί ατμοσφαιρική διάβρωση και όχι διάβρωση με βελονισμούς.

Επίσης, έχει παρατηρηθεί πως δοκίμια χάλυβα, που έχουν παραμείνει μέχρι τέσσερις εβδομάδες σε διάλυμα υδροξειδίου του ασβεστίου, έχουν μεγαλύτερη πρόσφυση από τον καθαρό χάλυβα. [12],[13]

Γενικότερα, ένας χάλυβας που έχει οξειδωθεί μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν το νωπό σκυρόδεμα μπορεί να αφομοιώσει τα προϊόντα διάβρωσης που υπάρχουν στην επιφάνεια του, μετατρέποντας αυτά τα οξείδια σε φερριτική φάση (Ca_4AF). Το ποσό αυτό εξαρτάται από το πορώδες του σκυροδέματος και από τη σύσταση και το ποσοστό C_3A στο τσιμέντο. Αντιθέτως στην περίπτωση που, τα οξείδια δεν αφομοιωθούν από το σκυρόδεμα δημιουργούνται τοπικά γαλβανικά στοιχεία που επιταχύνουν τη διάβρωση του οπλισμού. [9]

Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί πως οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα επηρεάζονται από την παρουσία οξειδίων, καθώς η αλλαγή στη διατομή του, λόγω της οξείδωσης μπορεί να μειώσει την αντοχή και την ολκιμότητά του με αποτέλεσμα τη στατική ανεπάρκεια της κατασκευής.

Η ανθεκτικότητα του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος στην ατμοσφαιρική διάβρωση, εξαρτάται από το είδος του, δηλαδή τη χημική σύσταση και τις νευρώσεις του, όπως επίσης και από τις περιβαλλοντικές δράσεις και την παρουσία παραμένουσων τάσεων που οφείλονται στη μέθοδο παραγωγής. Γενικά μπορεί να θεωρηθεί πως: [13]

- Χάλυβες θερμής έλασης έχουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα από χάλυβες θερμικής κατεργασίας και ψυχρής έλασης.
- Ο χάλυβας έχει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα όσο μικρότερη περιεκτικότητα σε θείο (S), άζωτο (N) και φώσφορο (P) έχει.
- Όσο μικρότερη είναι η τραχύτητα της επιφάνειας του χάλυβα, τόσο ανθεκτικότερος είναι.

Τέλος, θα πρέπει να τονιστεί πως αν ο χάλυβας είναι υπό μηχανική τάση είναι πιο επιρρεπής στη διάβρωση και αυτή θα είναι σίγουρα πιο έντονη καθώς οι περιοχές του χάλυβα, που έχουν υποστεί πλαστική παραμόρφωση εν ψυχρό, π.χ. κάμψη, κοπή, αναδίπλωση, αποτελούν ανοδικά σημεία και η διάβρωσή τους επέρχεται πιο εύκολα.

Βιβλιογραφικές Αναφορές 3^ο Κεφαλαίου

[1] R.J. Currie, The Implications of Reinforcement Corrosion for Safety and Serviceability Structures, In Corrosion of Reinforcement In Concrete Construction, A.P. Crane, Editor, Society of Chemical Industry and Ellis Horwood Ltd., London 1983.

[2] <http://monosimacon.blogspot.com> .

[3] Πτυχιακή Εργασία, Ραφαήλ Όλγα – Παπαδόπουλος Κωνσταντίνος, «ΠΡΟΛΗΨΗ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ», Θεσσαλονίκη 2012.

[4] <http://cyane.org.cy/dynamicdata/newsImages/Michalis Petrou.pdf> .

[5] <http://4myhouse.gr> .

[6] <http://www.buildnet.gr> .

[7] Θ. Σκουλικίδης, «Εφαρμοσμένη Ηλεκτροχημεία Α: Διάβρωση και Προστασία», Αθήνα 1976.

[8] Π. Βασιλείου, Ατμοσφαιρική Διάβρωση Μετάλλων, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2000.

[9] Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος (Κ.Τ.Χ.), 2008.

[10] Θ. Π. Τάσιος, Κ. Αλιγαζάκη, Ανθεκτικότητα Οπλισμένου Σκυροδέματος, Αθήνα 1992.

[11] Μπατής Γ. Καθ. ΕΜΠ., «Φθορά και προστασία των υλικών», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1999.

[12] Γ. Μπατής, Ε. Ρακαντά, Δόμηση και Κατασκευές, Ατμοσφαιρική διάβρωση και προστασία χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος, 2000.

[13] Π. Μαυροειδής, Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2005.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

4.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.

Ο σχεδιασμός των κατασκευών για καταπόνηση σε πυρκαγιά είναι ίσως μία από τις «παραμελημένες» εργασίες του Πολιτικού Μηχανικού, αφού κυριαρχεί ως ένα βαθμό η δικαιολογημένη πεποίθηση ότι το οπλισμένο σκυρόδεμα προσφέρει πρακτικά απεριόριστη προστασία έναντι πυρκαγιάς. Οι υψηλές ποσότητες θερμότητας που εκλύονται από μια πυρκαγιά επηρεάζουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά μιας κατασκευής όπως επίσης και τη συνάφεια του σκυροδέματος με τον οπλισμό (χάλυβα).

Στη σχεδιαστική φάση της κατασκευής ο μηχανικός καλείται να της προσδώσει τον απαιτούμενο βαθμό πυρασφάλειας (ενεργητική και παθητική προστασία). Η ενεργητική προστασία αντιστοιχεί σε μέτρα που έχουν σκοπό να μειώσουν την πιθανότητα έναυσης και εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς, πράγμα που εξαρτάται από τη θέση και διάταξη του κτιρίου, τη σωστή χρήση του, τα αντιπυρικά χωρίσματα, τη θερμική μόνωση και την αποδοτικότητα των συστημάτων πυρανίχνευσης και πυρόσβεσης.

Η παθητική προστασία αναφέρεται στην «ανθεκτικότητα» της κατασκευής. Ως ανθεκτικότητα ορίζεται: (1) η ικανότητα ανάληψης φορτίων, (2) η διατήρηση της αντιπυρικής ακεραιότητας – ενισχύεται και εξασφαλίζεται με διαχωριστικά στοιχεία (πλάκες, τοιχία) που εμποδίζουν τις φλόγες να διαπεράσουν την κατασκευή, 3) Η διατήρηση της θερμομονωτικής ικανότητας – ενισχύεται και εξασφαλίζεται με διαχωριστικά στοιχεία που εμποδίζουν τη θερμότητα να μεταφερθεί στη μη εκτεθειμένη επιφάνειά τους ώστε η φωτιά να μην εξαπλωθεί σε γειτονικούς χώρους.

4.2 ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.

4.2.1 Εκτίμηση των μέγιστων τιμών θερμοκρασίας με βάση το χρώμα του υλικού.

Πρωταρχική σημασία για τη μεταγενέστερη έρευνα της απομένουσας αντοχής των δομικών στοιχείων είναι η εκτίμηση της θερμοκρασίας που εμφανίζεται στα διάφορα τμήματα του κτιρίου.

Κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς και ανάλογα με την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία το σκυρόδεμα αποκτά διάφορους χρωματισμούς. Πειραματικές μελέτες [4] έχουν δείξει πως όταν η θερμοκρασία φτάσει τους 300°- 600°C το μπετόν γίνεται κόκκινο ή ροζ. Ενώ αν η θερμοκρασία φτάσει τους 600°- 900°C το χρώμα του σκυροδέματος γίνεται γκρι. Έτσι μια πρώτη ένδειξη της εναπομένουσας αντοχής του σκυροδέματος, μετά από μια πυρκαγιά, είναι τα χρώματα, για παράδειγμα σε θερμοκρασία 600°- 800°C το σκυρόδεμα χάνει το 50 - 80% της αντοχής του.

4.2.2 Συμπεριφορά του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες.

Το σκυρόδεμα από άποψη συμπεριφοράς σε πυρκαγιά είναι το καλύτερο από τα συνήθη δομικά υλικά για τους παρακάτω λόγους [1]:

α) Τα δομικά στοιχεία που κατασκευάζονται από μπετόν είναι γενικά πολύ μεγαλύτερης μάζας από αντίστοιχα ξύλινα ή χαλύβδινα, έτσι αναστέλλεται η αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικού του στοιχείου.

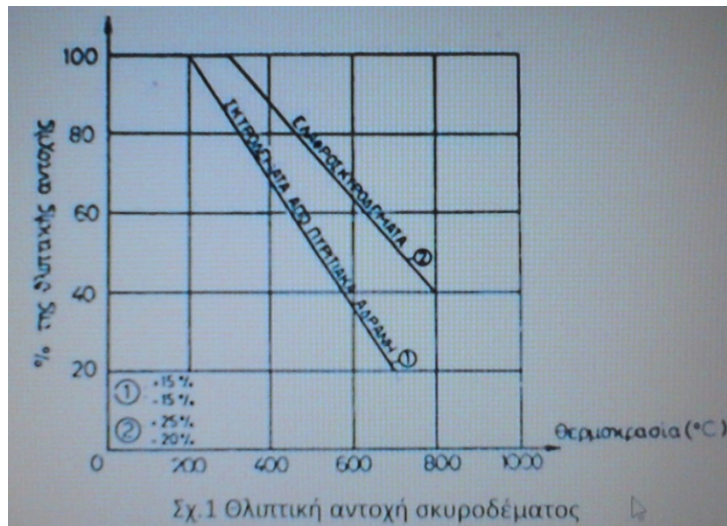
β) Το σκυρόδεμα ακόμη και σε ξηρό περιβάλλον περιέχει νερό και σε αυτό οφείλεται το ότι στους 600°C αποσυντίθεται ο τσιμεντοπολτός των εξωτερικών στρώσεων. Σε υψηλές θερμοκρασίες το νερό εξατμίζεται αρχικά στην επιφάνεια και σιγά-σιγά, όσο διαρκεί η πυρκαγιά, βαθύτερα. Κατά την εξάτμισή του απορροφάται θερμότητα με αποτέλεσμα να καθυστερεί η θέρμανση των εσωτερικών στρωμάτων.

γ) Το είδος των αδρανών παίζει επίσης πολύ σημαντικό ρόλο στην υψηλή αντοχή του σκυροδέματος σε πυρκαγιά. Για παράδειγμα τα ασβεστολιθικά αδρανή, που χρησιμοποιούνται κυρίως στην Ελλάδα, είναι πολύ ανθεκτικά καθώς χάνουν την αντοχή τους στους 900°C. Εξίσου καλή συμπεριφορά παρουσιάζουν οι σκωρίες υψικαμίνων (εφόσον πρωτίστως εκπληρώνουν καταλληλότητα για μπετόν). Τα πυριτικά αδρανή παρουσιάζουν διόγκωση και σπάζουν όταν θερμανθούν στους 500°C, οπότε γίνεται αλλαγή του συστήματος κρυστάλλωσης του χαλαζιού συνοδευόμενη από διόγκωση.

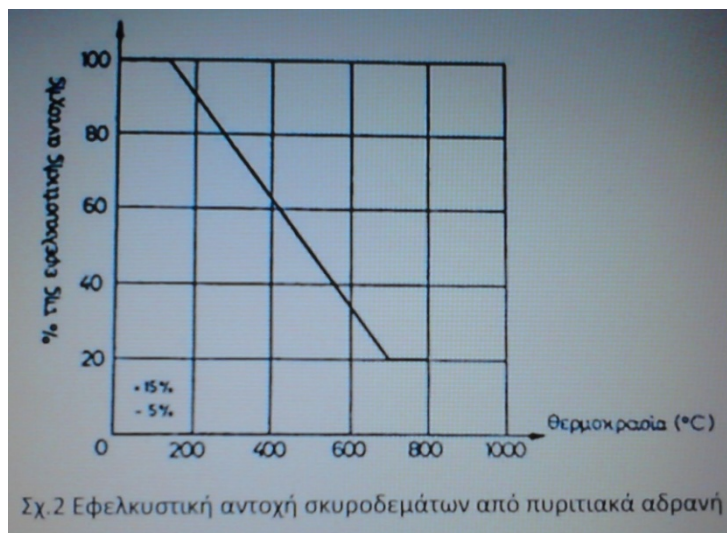
4.2.3 Επίδραση της πυρκαγιάς στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος.

Η πυρκαγιά επιδρά και μεταβάλλει, μεταξύ άλλων, τη θλιπτική αντοχή, την εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος, ενώ συγχρόνως προκαλεί και θερμικές παραμορφώσεις. Οι γραφικές παραστάσεις που παρουσιάζονται παρακάτω (Σχήματα 4.1 έως 4.4) προτείνονται από το CEB ως πρακτικές καμπύλες για τους υπολογισμούς των παραπάνω μεγεθών.

Τα Σχήματα 4.1 και 4.2 αφορούν τις αντοχές του σκυροδέματος, θλιπτική και εφελκυστική αντιστοίχως. Για τη θλιπτική αντοχή σκυροδέματος με ασβεστολιθικά αδρανή προτείνεται η σχεδίαση και μιας «ενδιάμεσης» ευθείας μεταξύ των δύο εικονιζόμενων στο Σχήμα 4.1, που αφορούν ελαφροσκυροδέματα και σκυροδέματα με πυριτικά αδρανή. Η μοναδική ευθεία του Σχήματος 4.2 έχει προκύψει για την περίπτωση των πυριτικής σύστασης αδρανών, προτείνεται όμως η χρήση της και για σκυροδέματα με ασβεστολιθικά αδρανή, όπως αυτά που κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα. Όπως παρατηρείται και στα δύο διαγράμματα η αντοχή του σκυροδέματος μειώνεται στο 20% της τιμής της σε θερμοκρασίες περίπου 700 °C, γεγονός που σημαίνει ότι μία πυρκαγιά μπορεί να οδηγήσει εμφάνιση αστοχιών σε μία κατασκευή.

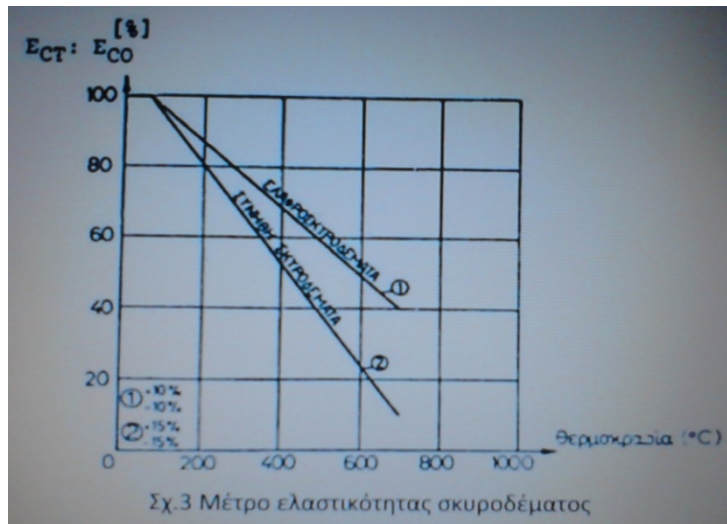


Σχήμα 4.1 Επίδραση της υψηλής θερμοκρασίας στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος [1]

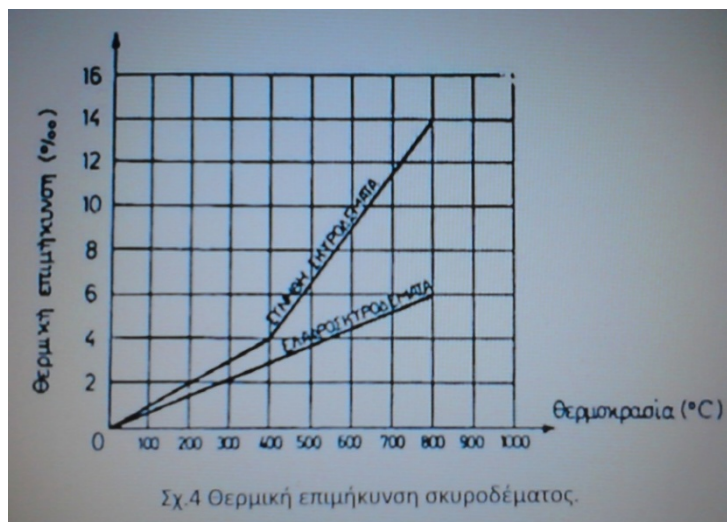


Σχήμα 4.2 Επίδραση της υψηλής θερμοκρασίας στην εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος [1]

Όπως είναι αναμενόμενο, η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας ακολουθεί αυτή των αντοχών (Σχήμα 4.3). Τέλος, όσον αφορά τη θερμική επιμήκυνση, παρατηρείται μία σημαντική αύξηση της κλίσης του σχετικού διαγράμματος για θερμοκρασία μεγαλύτερη από 400 °C, γεγονός που υποδηλώνει ότι πάνω από την τιμή αυτή το φαινόμενο εκδηλώνεται πολύ πιο έντονα.



Σχήμα 4.3 Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος με την αύξηση της θερμοκρασίας [1]



Σχήμα 4.4 Μεταβολή της επιμήκυνσης λόγω θερμότητας του σκυροδέματος με την αύξηση της θερμοκρασίας [1]

Παρακάτω δίνεται ένας πίνακας (Πίνακας 4.1) όπου συγκρίνονται χαρακτηριστικές τιμές για δύο βασικές παραμέτρους σκυροδεμάτων με ασβεστολιθικά και πυριτικά αδρανή, συγκεκριμένα:

- η αντοχής σε θλίψη σε συνήθη θερμοκρασία $f_c(20\text{ }^\circ\text{C})$
- η αντίστοιχη σε υψηλή θερμοκρασία θ $f_c(\theta)$ και η παραμόρφωση $\varepsilon_{c1}(\theta)$

Παρατηρείται ότι τα ασβεστολιθικά αδρανή πλεονεκτούν έναντι των πυριτικών, καθώς η αντοχή των σκυροδεμάτων που παρασκευάζονται με αυτά σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες ($\sim 900\text{ }^\circ\text{C}$) είναι έως και 10% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των σκυροδεμάτων με πυριτικά αδρανή.

Πίνακας 4.1 Μεταβολή της αντοχής του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες [1]

θερμοκρασία σκυροδέματος (°C)	$f_c(\theta) / f_c(20^\circ\text{C})$		$\varepsilon_{c1}(\theta) / 10^{-3}$
	πυριτικά αδρανή	ασβεστολιθικά αδρανή	
20	1,00	1,00	2,5
100	0,95	0,97	3,5
200	0,90	0,94	4,5
300	0,85	0,91	6,0
400	0,75	0,85	7,5
500	0,60	0,74	9,5
600	0,45	0,60	12,5
700	0,30	0,43	14,0
800	0,15	0,27	14,5
900	0,08	0,15	15,0
1000	0,04	0,06	15,0
1100	0,01	0,02	15,0
1200	0,00	0,00	-

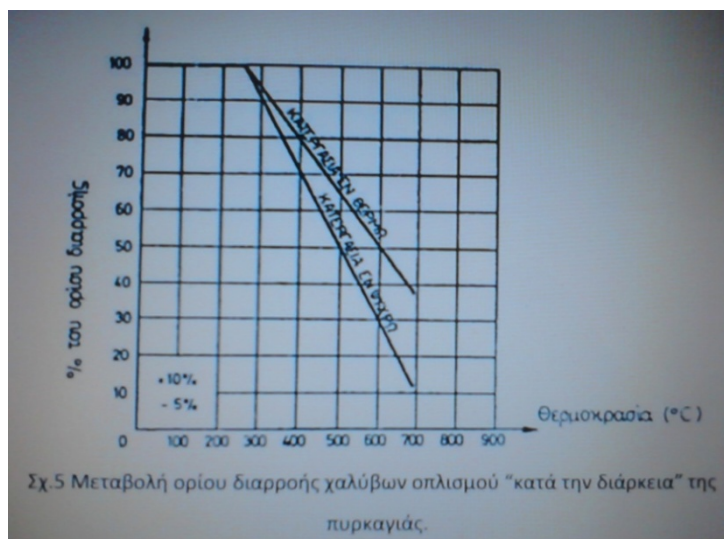
4.3 Ο ΧΑΛΥΒΑΣ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.

Ο χάλυβας είναι ένα άκαυστο υλικό αλλά μη ανθεκτικό στην πολύωρη έκθεση σε θερμοκρασίες όπως αυτές που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς. Σύμφωνα με εργαστηριακές δοκιμές [4] σε συνήθη μαλακό χάλυβα φαίνεται πως η αντοχή σε εφελκυσμό αυξάνει αρχικά σε θέρμανση μέχρι τους 250°C για να επανέλθει στην αρχική στους 400°C, από όπου πέφτει ξανά και στους 550°C τελικά φτάνει στην επιτρεπόμενη τάση με βάση τους συνηθισμένους συντελεστές ασφαλείας. Χάλυβες που έχουν αποκτήσει υψηλή αντοχή με ψυχρή έλαση εμφανίζουν ταχύτερη πτώση γιατί με την ανόπτηση που επέρχεται χάνεται η πρόσθετη αντοχή έτσι η κρίσιμη θερμοκρασία τους είναι 400° - 450°C. Ο οπλισμός του σκυροδέματος έχει φυσικά τις ιδιότητες του χάλυβα, αλλά για να αξιοποιήσει τα πλεονεκτήματα του σκυροδέματος θα πρέπει να πραγματοποιείται η κατάλληλη κάλυψή του, σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς.

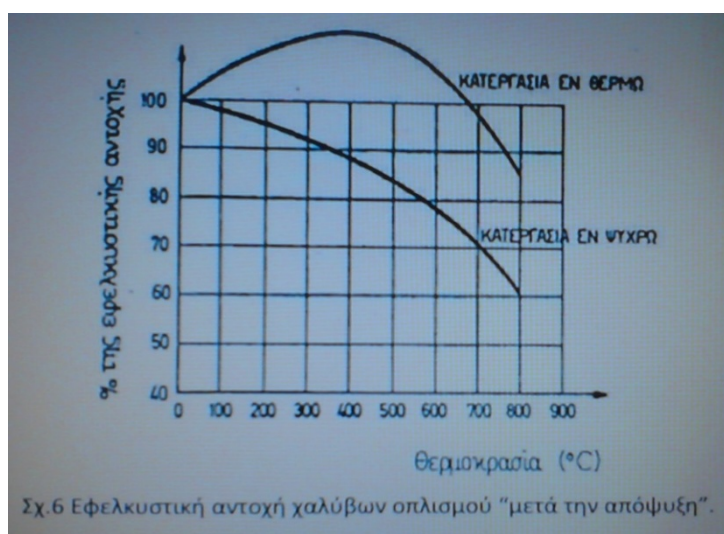
4.3.1 Επίδραση της πυρκαγιάς στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα.

Όπως και στην περίπτωση του σκυροδέματος, η πυρκαγιά επιδρά και μεταβάλλει το όριο διαρροής, την εφελκυστική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα και προκαλεί θερμικές παραμορφώσεις. Οι γραφικές παραστάσεις που παρουσιάζονται παρακάτω προτείνονται από το CEB ως πρακτικές καμπύλες για τους υπολογισμούς των μεγεθών αυτών.

Όπως παρατηρείται στα Σχήματα 4.5 και 4.6 η μείωση του ορίου διαρροής των ράβδων οπλισμού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία είναι πρακτικά γραμμική και ξεκινά από τους 250°C. Εξαρτάται και από το είδος του χάλυβα και είναι εντονότερη σε χάλυβες που προέρχονται από εν ψυχρώ κατεργασία. Ομοίως, η εφελκυστική αντοχή εξαρτάται από την ιστορία φορτίσεως και από το είδος του χάλυβα. Στην περίπτωση αυτή, οι χάλυβες που έχουν παραχθεί με εν θερμό κατεργασία πιθανόν να εμφανίσουν αυξημένες αντοχές. Ωστόσο, με δεδομένη τη σημαντική μείωση του ορίου διαρροής, οι υψηλότερες αντοχές μάλλον αντιστοιχούν σε μεγάλες τιμές παραμορφώσεων στις ράβδους, άρα και στα δομικά μέλη. Αντίθετα, οι χάλυβες που παράγονται με εν ψυχρώ κατεργασία (η πλειονότητα των χαλύβων που χρησιμοποιούνται σήμερα δηλαδή) δεν εμφανίζουν καμία αύξηση της αντοχής τους με την άνοδο της θερμοκρασίας.

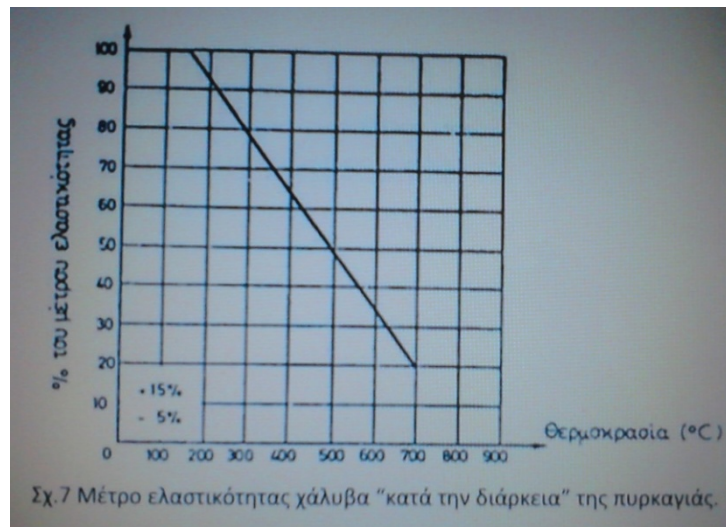


Σχήμα 4.5 Επίδραση πυρκαγιάς στο όριο διαρροής του χάλυβα [1]

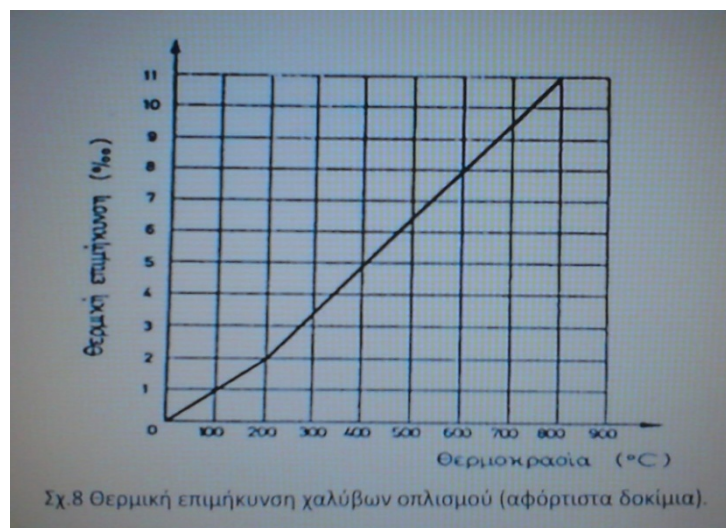


Σχήμα 4.6 Επίδραση πυρκαγιάς στην εφελκυστική αντοχή του χάλυβα [1]

Όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα, η μείωση της τιμής του σε υψηλές θερμοκρασίες λόγω πυρκαγιάς είναι αντίστοιχη αυτής του ορίου διαρροής (Σχήμα 4.7). Τέλος η θερμική επιμήκυνση του χάλυβα είναι ανάλογη της θερμοκρασίας και γίνεται πιο έντονη για τιμές της τελευταίας μεγαλύτερες από 200°C (Σχήμα 4.8). Σημειώνεται ότι οι παραπάνω παρατηρήσεις και τα αντίστοιχα διαγράμματα αφορούν χάλυβες και των δύο κατηγοριών κατεργασίας (θερμής και ψυχρής).



Σχήμα 4.7 Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του χάλυβα με την αύξηση της θερμοκρασίας [1]



Σχήμα 4.8 Επιμήκυνση λόγω θερμότητας του χάλυβα με την αύξηση της θερμοκρασίας [1]

4.3.2 Επιρροή της πυρκαγιάς στη συνάφεια χάλυβα – σκυροδέματος.

Η συνάφεια σκυροδέματος και ράβδων οπλισμού αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό του οπλισμένου σκυροδέματος και εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων οι οποίοι λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό του μήκους αγκυρώσεως και είναι οι παρακάτω [1]:

- Η ποιότητα του σκυροδέματος (θλιπτική και εφελκυστική αντοχή).

- Το είδος και το μέγεθος των αδρανών μέσα στο σκυρόδεμα.
- Το είδος της επιπόνησης που ασκείται στο σκυρόδεμα.
- Η επικάλυψη του οπλισμού.
- Η παρουσία εγκάρσιου οπλισμού.
- Η επιφάνεια της ράβδου οπλισμού.
- Η θερμοκρασία.

Ειδικά η θερμοκρασία επηρεάζει άμεσα τη συνάφεια του οπλισμένου σκυροδέματος, λόγω της διαφοράς των συντελεστών θερμικής διαστολής χάλυβα – σκυροδέματος. Κατά επέκταση λοιπόν η πυρκαγιά επηρεάζει τη συνάφεια του οπλισμένου σκυροδέματος, καθώς επιφέρει μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας. Στις θερμοκρασίες αυτές ο χάλυβας και το περιβάλλον σκυρόδεμα εμφανίζουν διαφορετικού μεγέθους παραμορφώσεις με αποτέλεσμα να υπάρχει σχετική ολίσθηση των δύο υλικών και να μην πλέον είναι δυνατή η αποτελεσματική «συνεργασία» για την ανάληψη των φορτίων των δομικών μελών.

4.4 ΒΛΑΒΕΣ ΜΕΛΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ

Πριν ξεκινήσουν οι εργασίες για την αποκατάσταση των βλαβών είναι απαραίτητο να γίνεται εκτίμηση των αιτιών που προξένησαν τις βλάβες, όπως και διαχωρισμός στα φέροντα και μη φέροντα στοιχεία της κατασκευής εφόσον αυτά που αρχικά μας ενδιαφέρουν είναι τα φέροντα.

Οι πιο συνηθισμένες αιτίες των ζημιών στον φέροντα οργανισμό είναι οι εξής [2]:

- Η θέρμανση προκαλεί υπέρμετρη επιμήκυνση του οπλισμού και απώλεια της αντοχής του.
- Η θερμική διαστολή του σκυροδέματος είναι μικρότερη από αυτή του οπλισμού, γεγονός που προκαλεί τάσεις εξαναγκασμού και οδηγεί στη θραύση του σκυροδέματος.
- Η μεγάλη ογκομετρική μεταβολή των μελών του σκυροδέματος οδηγεί στην έκρηξη του.
- Η υπερβολική επιμήκυνση του χάλυβα προκαλεί αστοχία της θλιβόμενης ζώνης καμπτόμενων φορέων.
- Η επίδραση του νερού κατάσβεσης προκαλεί την ανάπτυξη ανομοιόμορφων θερμικών τάσεων στο σκυρόδεμα καθώς και τη μερική καταστροφή του.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η εικόνα του φέροντα οργανισμού, δηλαδή οι βλάβες που παρουσιάζονται μετά την πυρκαγιά είναι οι ακόλουθες [2]:

- ❖ Αποσύνθεση – ασβεστοποίηση του σκυροδέματος στα διάφορα στοιχεία και κυρίως στις πλάκες.
- ❖ Αποφλοιώση σκυροδέματος σε διάφορα στοιχεία.
- ❖ Επιφανειακές ρηγματώσεις διαφόρου τύπου και βαθμού σε δοκούς, υποστυλώματα και πλάκες.
- ❖ Αποκοπή γωνιών από υποστυλώματα και δοκούς.
- ❖ Αποφλοιώση σκυροδέματος σε διάφορα στοιχεία.

- ❖ Αχρήστευση οπλισμού από διαστολή και αποκοπή του από το σκυρόδεμα.
- ❖ Σημαντικό βέλος κάμψης προβόλων, κλιμάκων και πιθανά πλακών.

4.4.1 Αναλυτική αναφορά στη συμπεριφορά δομικών στοιχείων σε υψηλές θερμοκρασίες.

Η παρούσα παράγραφος παρουσιάζει με λεπτομέρεια τη μορφή των βλαβών που αναμένονται σε δομικά μέλη από οπλισμένο σκυρόδεμα έπειτα από πυρκαγιά. Η περιγραφή και η κατανόηση των βλαβών αυτών είναι απαραίτητη προκειμένου να γίνουν κατανοητά τα μέτρα και οι τεχνικές επισκευής που παρουσιάζονται σε ακόλουθο κεφάλαιο της εργασίας.

(α) Υποστυλώματα.

Ο βασικότερος κίνδυνος σε περίπτωση πυρκαγιάς είναι η απόσχιση (αποφλοιώση) του σκυροδέματος ιδίως στις γωνίες με αποτέλεσμα ο οπλισμός να μένει εκτεθειμένος και, αν θερμανθεί πάνω από 600°C, να φθάνει για τις συνήθεις φορτίσεις στο όριο διαρροής του. Η προστασία των υποστυλωμάτων οφείλεται κυρίως στις διαστάσεις τους και την επικάλυψη των οπλισμών με μεγάλη ποσότητα σκυροδέματος, το οποίο αναστέλλει τη θέρμανση στο εσωτερικό. Έτσι λαμβάνοντας υπόψη κάποιες πειραματικές διαδικασίες [3],[4], καθώς και από την εμπειρία, έχει αποδειχθεί πως υποστυλώματα 40x40εκ. αντέχουν σε πυρκαγιά 90 λεπτών της ώρας με το φορτίο του στατικού υπολογισμού, ενώ αντίστοιχα υποστυλώματα 25x25εκ. αντέχουν σε πυρκαγιά 1 ώρα. Σε υποστυλώματα πλευράς 20εκ. έχουμε πρόβλημα όχι λόγω υπέρβασης της αντοχής σε θλίψη, αλλά από λυγισμό. Πειραματικά [3],[4] έχει προκύψει πως υποστυλώματα κάτω από 25εκ. χρειάζονται πρόσθετη επένδυση. Σε περίπτωση που απαιτείται αυξημένη αντοχή, τυλίγουμε τον οπλισμό με ελαφρό πυκνό δομικό πλέγμα, το οποίο εμποδίζει την αποφλοιώση του σκυροδέματος, και επιπλέον συντελεί στο διπλασιασμό της αντοχής σε πυρκαγιά των λεπτών υποστυλωμάτων (έως 30εκ.).

(β) Δοκοί.

Το πλάτος της διατομής, το βάθος του οπλισμού, η ύπαρξη πυκνού επιφανειακού οπλισμού καθώς και το σύστημα στατικής λειτουργίας είναι τα βασικά χαρακτηριστικά μιας δοκού.

Ο κίνδυνος απόσχισης (αποφλοιώσης) του σκυροδέματος, που μειώνεται δραστικά σε περίπτωση που έχουμε ξηρό περιβάλλον για την αποφυγή συμπύκνωσης των υδρατμών, επίσης επιτυγχάνεται αν χρησιμοποιήσουμε ασβεστολιθικά αδρανή ή πυρίμαχο σκυρόδεμα, αν το πλάτος της διατομής είναι μεγαλύτερο από 20 εκ., όπως και αν έχουμε μεγαλύτερες επικαλύψεις των οπλισμών.

Το σύστημα στατικής λειτουργίας της δοκού είναι ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της δοκού, όπως προαναφέρθηκε. Αμφιέριστες δοκοί ή πλαίσια ενός ανοίγματος είναι ευπαθέστερα. Έχει αποδειχθεί [3],[4] πως συνεχείς δοκοί κτιρίων και πολύστηλα πλαίσια είναι ασφαλέστερες, καθώς από τη θερμοκρασία προσβάλλεται ο κάτω οπλισμός ενώ ο οπλισμός στις στηρίξεις είναι πιο κοντά στο δάπεδο του υπερκείμενου ορόφου στον οποίο έχουμε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Έτσι στην περίπτωση που ο οπλισμός των ανοιγμάτων

φθάσει στο όριο διαρροής θα πραγματοποιηθεί ανακατανομή των ροπών με αύξηση των ροπών στήριξης όπου ο οπλισμός είναι ψυχρότερος και πιο ικανός να τις αναλάβει.

Ένα επιπλέον πρόβλημα αποτελούν οι παραμορφώσεις, δηλαδή οι επιμηκύνσεις των φερόντων στοιχείων που αν εμποδιστούν, από τα μέλη τα οποία βρίσκονται δίπλα τους, παρουσιάζουν προβλήματα λυγισμού και στρέβλωσης.

(γ) Πλάκες.

Πλάκες συνηθισμένου σκυροδέματος πάχους 8εκ. και 9εκ., σύμφωνα με τους κανονισμούς, θεωρούνται ανασταλτικές του πυρός με αντοχή 30 λεπτών, ενώ πλάκες που έχουν πάχος πάνω από 10εκ. θεωρούνται πως είναι ανθεκτικές σε πυρκαγιά για τουλάχιστον 1 ώρα και 30 λεπτά [3],[4]. Επαύξηση της αντοχής συνεχών πλακών γίνεται αν τοποθετήσουμε και στα ανοίγματα οπλισμό στο πάνω μέρος κατ' επέκταση μέρους του οπλισμού στηρίξεων, όπως αναφέρθηκε για τις δοκούς.

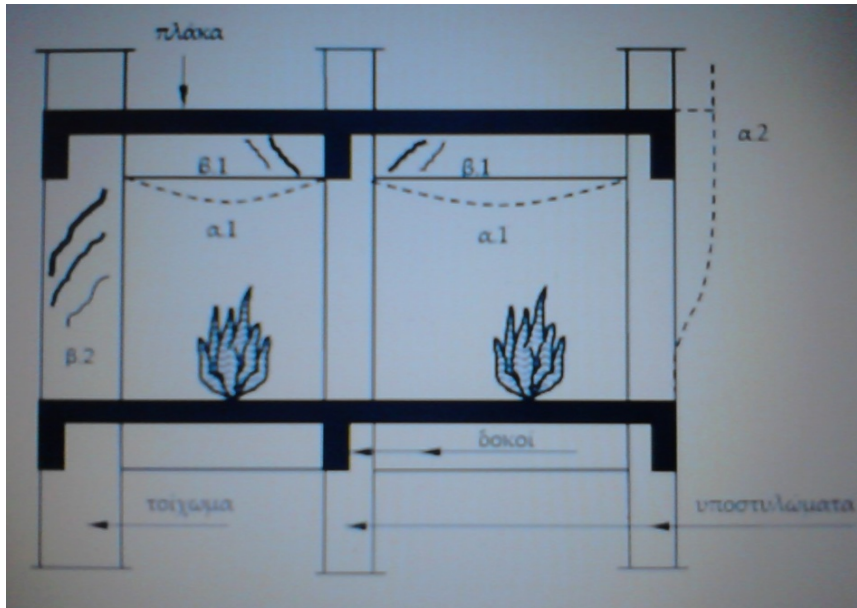
(δ) Γενική μορφολογία βλαβών.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η πυρκαγιά προκαλεί διάφορες χαρακτηριστικές αλλοιώσεις των υλικών, τήξεις και καύσεις. Πέραν αυτών, μπορούμε να συνοψίσουμε τις κύριες και τυπικές «γεωμετρικές» βλάβες στις ακόλουθες [5]:

- Πρόωρες αποκολλήσεις και καταπτώσεις επιχρισμάτων και οροφοκονιαμάτων, λόγω πλημμελούς πρόσφυσης και μεγάλου πάχους.
- Απομειώσεις διατομών των φερόντων στοιχείων λόγω απολεπίσεων, αποφλοιώσεων και αποκολλήσεων των εξωτερικών στοιβάδων, καθώς και αποσύνθεση της μάζας του σκυροδέματος ή του κονιάματος.
- Χαρακτηριστικές παραμένουσες παραμορφώσεις, τόσο για τους οριζόντιους φορείς, όσο και για τα κατακόρυφα στοιχεία. Ας σημειωθεί ότι μεγάλο μέρος των παρουσιαζόμενων θερμικών παραμορφώσεων παραμένει ως μόνιμο (έως και το 50%).
- Λόγω των έντονων παραμορφώσεων (σε συνδυασμό με την απομείωση των διατομών και των αντοχών), παρατηρούνται σημαντικές καμπτικές καθώς και διατμητικές βλάβες (ρωγμές). Οι πιο τυπικές διατμητικές βλάβες είναι οι λοξές ρωγμές σε μεσαίες εδράσεις συνεχών δοκών από οπλισμένο σκυρόδεμα (και λόγω ανακατανομής της έντασης), καθώς και οι έντονες λοξές ρωγμές σε ισχυρά και δύσκαμπτα κατακόρυφα στοιχεία.

Έντονης και μεγάλης διάρκειας πυρκαγιές μπορούν να οδηγήσουν σε βαριές βλάβες των δομικών στοιχείων, τοπικές ή και γενικότερες καταρρεύσεις, ορόφου ή και κτιρίου ως συνόλου.

Παρακάτω (Σχήμα 4.9) ακολουθεί ένα τυπικό σκαρίφημα ενός κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό εσωτερική φωτιά.



Σχήμα 4.9 Χαρακτηριστικές βλάβες κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα λόγω πυρκαγιάς στο εσωτερικό του - οι αριθμοί α.1, β.1 κλπ. παραπέμπουν στις περιγραφές του κειμένου [5].

Το βέλος κάμψης δομικών στοιχείων αυξάνεται γρήγορα επειδή η αύξηση της θερμοκρασίας σε μια από τις παρειές των δομικών στοιχείων συνεπάγεται αύξηση του μήκους και επιβολή καμπυλότητας, καθώς και απομείωση των χαρακτηριστικών των υλικών (και της συνάφειας), επομένως και μείωση των δυσκαμψιών.

Για ισοστατικούς φορείς, η αύξηση των παραμορφώσεων πραγματοποιείται χωρίς τροποποίηση της έντασης τους, ενώ για υπερστατικούς φορείς (δηλ. για τα συνήθη κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα), η αύξηση των παραμορφώσεων των στοιχείων που καίγονται συνεπάγεται και έντονη ανακατανομή της έντασης (ανακούφιση των ανοιγμάτων και επιβάρυνση των στηρίγματος).

Επιπλέον, η μείωση των αντοχών χάλυβα (και σκυροδέματος) στα ανοίγματα λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, οδηγεί σε μείωση της ροπής αντοχής, ενώ στα στηρίγματα η ροπή αντοχής επηρεάζεται πολύ λιγότερο και βραδύτερα.

Αυτά τα δύο συζευγμένα φαινόμενα οδηγούν σε παραμορφώσεις και ρηγματώσεις, καμπτικές (στα ανοίγματα) αλλά και διατμητικές (στα στηρίγματα).

Έτσι, συνήθως παρατηρείται (Σχήμα 4.9):

α.1: Καμπτική βλάβη, «κοίλιασμα» πλακών/δοκών και έντονη ρηγμάτωση, λόγω των συζευγμένων φαινομένων που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

β.1: Διατμητική βλάβη, σοβαρές ρηγματώσεις συνεχών δοκών στις ενδιάμεσες στηρίξεις (κυρίως), πάλι λόγω των συζευγμένων φαινομένων που προαναφέρθηκαν.

α.2: Καμπτική βλάβη, «φούσκωμα» στύλων και απλή ρηγμάτωση. Οφείλεται στην επιμήκυνση του ζυγώματος λόγω θερμοκρασίας. Στην περίπτωση στύλων μικρής διατομής και δυσκαμψίας, η επιμήκυνση αυτή μπορεί να μην συνοδεύεται από ρωγμές στο υποστύλωμα.

β.2: Διατμητική βλάβη, έντονες λοξές ρωγμές σε ισχυρό και δύσκαμπτο τοίχωμα, θερμικό «λάκτισμα». Οφείλεται, πάλι, στην επιμήκυνση του καιόμενου συστήματος πλακών και δοκών.

γ: Τέλος, συνηθισμένες βλάβες είναι και οι διαμπερείς ρωγμές σε πλάκες εξωστών (προβόλων), οι οποίες γενικώς εκτείνονται και στους κορμούς των υποκείμενων περιμετρικών δοκών του κτιρίου. Οι φλόγες που εξέρχονται από το κτίριο, μέσω των κουφωμάτων, συνεπάγονται έντονη αύξηση των θερμοκρασιών και επιμήκυνση των υπερκείμενων δοκών και προβόλων (αν υπάρχουν), με αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολλαπλών ρηγματώσεων, κάθετων προς την όψη.

Οι παραπάνω βλάβες απαιτούν την επέμβαση στο φέροντα οργανισμό για την αποκατάστασή τους και την αναβάθμιση της ασφάλειας της κατασκευής. Τα διάφορα μέτρα και τεχνικές που διατίθενται για το σκοπό αυτό παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

Βιβλιογραφικές Αναφορές 4^ο Κεφαλαίου

- [1] Πρακτικός Σχεδιασμός Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα Έναντι Πυρκαγιάς. Θ. Π. ΤΑΣΙΟΣ, Γ. ΔΕΟΔΑΤΗΣ, Αθήνα 1984.
- [2] 11^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Τ.Ε.Ε. Ελληνικό Τμήμα Σκυροδέματος, Κέρκυρα, 18-20 Μαΐου 1994, Τόμος 1.
- [3] Πυρασφάλεια, Εφαρμοσμένη Πυροπροστασία και Στοιχεία Πυρόσβεσης. Β.ΣΕΛΛΟΥΝΤΟΣ, Γ.ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ, Στ.ΠΕΡΔΙΟΣ.
- [4] «Επίδραση της Πυρκαγιάς σε Κατασκευές από Οπλισμένο Σκυρόδεμα», ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, ΤΣΙΤΟΣ ΑΝΤΩΝΗΣ, 7^ο Φοιτητικό Συνέδριο «Επισκευές Κατασκευών -01», Μάρτιος 2001.
- [5] Απόσπασμα από Εργασία «ΙV. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΒΛΑΒΕΣ ΛΟΓΩ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΑΠΟ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ».

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

5.1 ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΕΚ ΤΩΝ ΠΡΟΤΕΡΩΝ.

5.1.1 Από το φαινόμενο της διάβρωσης.

Η εξ' αρχής αντιμετώπιση του προβλήματος της διάβρωσης, με τη χρήση κατάλληλων μέτρων για την αποφυγή ή τον περιορισμό του φαινομένου που θα δημιουργηθεί με την πάροδο του χρόνου, είναι σαφέστατα προτιμότερη και κατασκευαστικά αλλά και οικονομικά από την αντιμετώπιση εκ των υστέρων. Η μεγάλη διαφορά κόστους που έχουν οι παραπάνω τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου μεταξύ τους, καθιστούν απαραίτητη τη λήψη μέτρων μείωσης του κινδύνου διάβρωσης κατά το κατασκευαστικό κομμάτι.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η αποφυγή της διάβρωσης του οπλισμού σκυροδέματος γίνεται λαμβάνοντας τα παρακάτω μέτρα: [1], [3], [4], [5]

- 1. Το πάχος και η ποιότητα επικάλυψης των οπλισμών.** Όσο μεγαλύτερη επικάλυψη έχουμε στην κατασκευή τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η προστασία που προσφέρεται. Όσον αφορά τη βελτίωση της ποιότητας της επικάλυψης, αυτή επιτυγχάνεται με:
 - Τη μείωση του πορώδους του σκυροδέματος.
 - Την αύξηση της ποσότητας του τσιμέντου.
 - Την καλή συμπίκνωση και ωρίμανση.
- 2. Η σχετική υγρασία του σκυροδέματος.** Τα ποσοστά υγρασίας που επιταχύνουν περισσότερο τη διαδικασία της ενανθράκωσης είναι περίπου στο 50-60%. Όταν τα ποσοστά είναι περίπου στο 40% ή και κοντά στο 85-90% έχουμε επιβράδυνση της διαδικασίας καθώς είναι δύσκολη διάλυση ή διείδυση του CO₂ αντίστοιχα. Τέλος, όταν τα ποσοστά προσεγγίζουν το 20% η ενανθράκωση πρακτικά μηδενίζεται.
- 3. Το περιβάλλον.** Μέρη στα οποία η περιεκτικότητα του αέρα σε CO₂ είναι αυξημένη, θεωρούνται «εύφορα» για την ενανθράκωση του σκυροδέματος. Τέτοια μέρη είναι τα βιομηχανικά και τα αστικά στα οποία οι χαμηλοί όροφοι των κατασκευών όπως και τα πάρκινγκ των αυτοκινήτων είναι πολύ επιβαρυνόμενα από εκπομπές σε CO₂.
- 4. Ύπαρξη ρωγμών.** Ελέγχοντας το πλήθος και το εύρος των ρηγματώσεων, τόσο στο νωπό όσο και στο σκληρυμένο σκυρόδεμα, ελέγχουμε καλύτερα και την ίδια την ενανθράκωση.
- 5. Φράγματα κατά της ενανθράκωσης.** Βαφές, εμποτισμοί ή και λεπτά επιχρίσματα είναι κάποια από τα υλικά που εμποδίζουν την είσοδο του CO₂ στο εσωτερικό του σκυροδέματος.
- 6. Ανοξειδωτοι χάλυβες.** Η χρήση ανοξειδωτων χάλυβων καλύπτει τις απαιτήσεις προστασίας των οπλισμών από τη διάβρωση ακόμη και σε μέρη που χαρακτηρίζονται πολύ βλαβερά για τις κατασκευές. Η παθητικοποίηση της επιφάνειας των χάλυβων

λόγω του σχηματιζόμενου λεπτού επιφανειακού στρώματος οξειδίου του χρωμίου, είναι αυτή που είναι υπεύθυνη για την ανθεκτικότητα των ανοξειδωτων χαλύβων στη διάβρωση. Κάποια από τα είδη ανοξειδωτων χαλύβων που διατίθενται στην αγορά είναι οι ωστενιτικοί, οι φερριτικοί, οι μαρτενσιτικοί και οι duplex (συνδυασμός ωστενιτικών και φερριτικών). Η καταλληλότητα του ανοξειδωτου χάλυβα εξαρτάται από τις απαιτήσεις και τα ειδικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, το κόστος αλλά και τη δυνατότητα παραγωγής των χαλύβων στις απαιτούμενες διαστάσεις και διατομές.

5.1.2 Από το φαινόμενο της πυρκαγιάς.

Ένας ακόμη σοβαρός κίνδυνος για τις κατασκευές είναι η φωτιά. Ο σχεδιασμός μιας κατασκευής έχει σκοπό να προσδιορίσει το χρόνο που μεσολαβεί από την έναρξη της φωτιάς μέχρι την κατάρρευσή της. Ο χρόνος αυτός ονομάζεται δείκτης πυραντίστασης. Είναι φανερό πως εάν δεν ληφθούν κάποια μέτρα μια κατασκευή θα παρουσιάσει σημαντικά προβλήματα σε περίπτωση φωτιάς. Επομένως είναι απαραίτητο να ληφθούν κάποια μέτρα πυροπροστασίας, τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω. Από τα μέτρα αυτά, κάποια είναι γενικής εφαρμογής, όπως π.χ. τα ειδικού τύπου χρώματα επάλειψης, ενώ άλλα αφορούν κατασκευές κυρίως από πλέον ευπαθή σε πυρκαγιά χαλύβδινα στοιχεία και αναφέρονται για λόγους πληρότητας της εργασίας.

Εκτοξευόμενες Προστατευτικές Επικαλύψεις

Υπάρχουν διάφορα υλικά τα οποία μπορούν να σχηματίσουν ένα προστατευτικό στρώμα γύρω από το χάλυβα για την περίπτωση της πυρκαγιάς. Τα υλικά αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία έχει σαν βασικό συστατικό το βερμικουλίτη, ο οποίος πρέπει να συνδυαστεί με ένα συνδετικό υλικό (συνήθως το τσιμέντο). Η δεύτερη κατηγορία έχει σαν βασικό συστατικό τις ορυκτές ίνες.

Τα υλικά αυτά εφαρμόζονται με εκτόξευση πάνω στη γυμνή επιφάνεια του χάλυβα. Για το λόγο αυτό δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις που ο κίνδυνος διάβρωσης είναι υψηλός. Μπορούν όμως να εφαρμοστούν σε χαλύβδινα στοιχεία τα οποία βρίσκονται στο εσωτερικό των κτιρίων. Τα περισσότερα υλικά μπορούν να προσφέρουν προστασία από τη φωτιά για 4 ώρες. Συχνά αυτή η μέθοδος είναι η ταχύτερη και φθηνότερη μέθοδος πυροπροστασίας. [2]

Μηχανικά Στερεωμένες Επικαλύψεις

Ένας μεγάλος αριθμός διαφόρων επικαλύψεων που καλύπτουν την επιφάνεια του χάλυβα προσδίδοντας μια αντοχή στην υψηλή θερμοκρασία από 0,5 έως και 4 ώρες. Η στερέωσή τους στα χαλύβδινα στοιχεία της κατασκευής πραγματοποιείται με μηχανικές μεθόδους (βίδες, ιμάντες, γαλβανισμένες γωνίες) ή με κόλλες ή κατάλληλα πλαίσια.

Το πάχος των επικαλύψεων εξαρτάται από το είδος του υλικού και τον προβλεπόμενο χρόνο προστασίας, γενικά όμως μεταβάλλεται από 6 έως 80mm. Για την παραγωγή αυτών των υλικών χρησιμοποιούνται ορυκτές ίνες όπως ο βερμικουλίτης ή ανόργανα υλικά που σχηματίζουν φυλλίδια όπως η μίκα. Σαν συνδετικό υλικό χρησιμοποιείται το τσιμέντο ή γενική πυριτικά συνδετικά μέσα. Οι επικαλύψεις αυτές χρησιμοποιούνται κύρια για την κάλυψη υποστρωμάτων δίνοντας ταυτόχρονα με την πυροπροστασία και μια αξιόλογη

αισθητική εμφάνιση. Πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι όλη η διεργασία στο εργοτάξιο πραγματοποιείται χωρίς την χρήση υγρών μέσων. [2]

Προκατασκευασμένα Προστατευτικά Περιβλήματα

Προκατασκευασμένα προστατευτικά περιβλήματα από πλαίσια χάλυβα ή από κονιάματα βερμικουλίτη χρησιμοποιούνται προκειμένου να δώσουν πυροπροστασία στα χαλύβδινα στοιχεία μέχρι 4 ώρες. Τα χαλύβδινα πλαίσια είναι βαμμένα με συνήθεις πυροπροστατευτικές επικαλύψεις. Το πάχος των επικαλύψεων εξαρτάται από τον απαιτούμενο χρόνο προστασίας. Συνήθως δεν υπολογίζεται πρόσθετος χρόνος προστασίας λόγω του χαλύβδινου πλαισίου.

Τα προκατασκευασμένα προστατευτικά περιβλήματα μπορούν να έχουν μια πολύ καλή αισθητική εμφάνιση. Είναι προφανές ότι πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο σωστό μέγεθος. Ακόμη πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα η πυροπροστασία των συνδέσμων μεταξύ των προκατασκευασμένων προστατευτικών περιβλημάτων τόσο μεταξύ τους όσο και μεταξύ χάλυβα και περιβλήματος. [2]

Διογκούμενα Χρώματα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι οργανικές επικαλύψεις ή χρώματα μπορούν να προστατεύσουν το χάλυβα από τη διάβρωση. Επίσης μπορούν να προσφέρουν πυροπροστασία στο χάλυβα. Τα χρώματα πυροπροστασίας κάτω από την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών παράγουν αέρια προϊόντα τα οποία τα διογκώνουν μέχρι 50 φορές του αρχικού τους πάχους στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κατά τη διόγκωση σχηματίζεται ένα σπογγώδες στρώμα το οποίο παρουσιάζει θερμομονωτικές ιδιότητες. Η προστασία διαρκεί 2 ώρες. Η απόχρωση των χρωμάτων πυροπροστασίας είναι μαύρη ή σκούρα και επομένως πρέπει να καλυφθούν από ένα άλλο στρώμα χρώματος ώστε να δώσουν μια καλή αισθητική εμφάνιση. Η επικάλυψή τους από ένα άλλο στρώμα χρώματος είναι αναγκαία και για το λόγο της προστασίας από την υγρασία. Η εφαρμογή των χρωμάτων μπορεί να γίνει επί τόπου με βούρτσα ή σπάτουλα.

Τα χρώματα πυροπροστασίας αποτελούν μια απλή και φθηνή μέθοδο προστασίας από τη φωτιά και συνδυάζονται με την αντιδιαβρωτική προστασία. [2]

Πλήρωση με Σκυρόδεμα (χαλύβδινα στοιχεία)

Η μέθοδος αυτή όπως και η επόμενη μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε κλειστές διατομές που περιέχουν κενά π.χ. κοιλοδοκοί. Η πλήρωση με σκυρόδεμα αρχικά είχε χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της ακαμψίας των διατομών αλλά στη συνέχεια διαπιστώθηκε και η ευνοϊκή επίδραση στην πυροπροστασία. Η προσθήκη χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος αυξάνει τις ευνοϊκές επιδράσεις. Ένα από τα πλεονεκτήματα της σύνθετης κατασκευής είναι ότι μεταβάλλοντας το πάχος του χάλυβα και την ποιότητα του σκυροδέματος (και του περιεχόμενου οπλισμού) μπορεί η αντοχή της διατομής να αυξηθεί σημαντικά χωρίς αύξηση των διαστάσεων. Σε περίπτωση πυρκαγιάς συμπεριφέρεται καλύτερα από μια όμοια διατομή υποστρώματος οπλισμένου σκυροδέματος. [2]

Πλήρωση με Νερό (χαλύβδινα στοιχεία)

Η πλήρωση κοιλοδοκών με νερό σε περίπτωση πυρκαγιάς μπορεί να προφυλάξει το χάλυβα. Το νερό μπορεί να μεταφέρει θερμότητα από τα τμήματα του χάλυβα που έχουν εκτεθεί στη φωτιά σε άλλα τμήματα που δεν έχουν εκτεθεί ή να εξατμισθεί το νερό σε κατάλληλη δεξαμενή. Η ποσότητα νερού στη δεξαμενή εξαρτάται από το εμβαδόν της επιφάνειας του χάλυβα, την προβλεπόμενη άνοδο της θερμοκρασίας και τη διάρκεια της φωτιάς. Το ποσό του νερού που εξατμίζεται από τη δεξαμενή πρέπει να συμπληρώνεται.

Επειδή αναπτύσσονται μεγάλες υδροστατικές πιέσεις η όλη κατασκευή πρέπει να χωρισθεί σε τομείς, οι οποίοι εξυπηρετούνται με κατάλληλη αντλία κυκλοφορίας του νερού. Είναι αυτονόητο ότι το νερό το οποίο αποθηκεύεται στη δεξαμενή δεν πρέπει να έχει την τάση απόθεσης αλάτων, και με κατάλληλα πρόσθετα να εξασφαλίζεται η μη διαβρωτική του ικανότητα και η αύξηση του σημείου ζέσεως. [2]

5.2 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΕ ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ.

Για την εκτίμηση της κατάστασης μιας κατασκευής από πλευράς διάβρωσης του οπλισμού της, επιβάλλεται να γίνει αυτοψία με σκοπό να ληφθούν υπ' όψη οι ιδιαιτερότητες που μπορεί να εμφανίζει η συγκεκριμένη κατασκευή. Σύνηθες δείγμα για την ύπαρξη διάβρωσης στην κατασκευή είναι η ύπαρξη ρωγμών, παράλληλων στους οπλισμούς, στην επιφάνειά της. Συγκεκριμένα, μια ρηγμάτωση μεγάλου εύρους κατά μήκος του υποστυλώματος ή της δοκού αποτελεί χαρακτηριστικό σημάδι διάβρωσης των σιδηροπλισμών.

Αμέσως μετά την αυτοψία, με σκοπό να εξετάσουμε το βαθμό διάβρωσης των ράβδων, προβαίνουμε σε δοκιμές σε επιλεγμένα σημεία της κατασκευής μετρώντας έτσι την επικάλυψη, το βαθμό ενανθράκωσης (με ψεκασμό διαλύματος φαινολοφθαλεΐνης) και διαπιστώνοντας την ύπαρξη χλωριόντων (με ψεκασμό κατάλληλου χρωματικού δείκτη). [1]

Η γνώση της κατάστασης διαβρώσεως του χάλυβα του σκυροδέματος είναι απαραίτητη καθώς είναι αυτή που μας οδηγεί στη χρήση μέτρων προστασίας. Ο έλεγχος του κινδύνου διαβρώσεως του χάλυβα γίνεται μέσω της μέτρησης του ελεύθερου δυναμικού του. [6]

Η μέτρηση δυναμικού χάλυβα οδηγεί στις ακόλουθες διαπιστώσεις: [6]

Όταν $E > -200\text{mV}_{\text{cse}}$, κατά ποσοστό 90% δεν έχουμε διάβρωση.

Όταν $E < -350\text{mV}_{\text{cse}}$, κατά ποσοστό 90% έχουμε διάβρωση.

Όταν $-200\text{mV}_{\text{cse}} > E > -350\text{mV}_{\text{cse}}$, δεν είμαστε βέβαιοι αν έχουμε ή όχι διάβρωση.

5.3 ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ.

Αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα της διάβρωσης των οπλισμών εκ των υστέρων δαπανούμε πολύ περισσότερα χρήματα από την περίπτωση που έχουμε λάβει εξ' αρχής τα απαραίτητα μέτρα τηρώντας τις αντίστοιχες κατασκευαστικές λεπτομέρειες. Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψη πως κάνοντας τέτοιου τύπου εργασίες μπορεί να επηρεάσουμε την ομαλή λειτουργία του κτιρίου, όταν πρόκειται για παράδειγμα για ένα κέντρο υγείας, κάποιο νοσοκομείο, καθώς για την επισκευή απαιτείται η αφαίρεση των επικαλύψεων όπως και

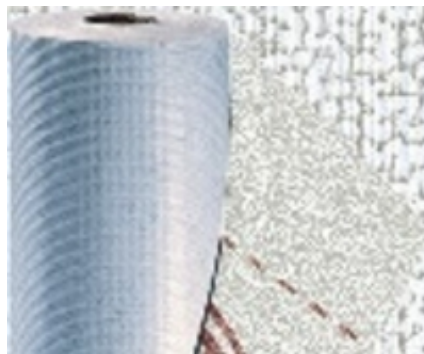
κάποιων τμημάτων του στοιχείου που έχει διαβρωθεί. Ο τρόπος επέμβασης θα εξαρτηθεί από το αν η διάβρωση έχει περιοριστεί στην επικάλυψη ή αν έχει προχωρήσει μέχρι τον οπλισμό της κατασκευής και σε τι βαθμό έχει φθαρεί ο τελευταίος.

Τα τελευταία χρόνια στο εμπόριο είναι διαθέσιμο ένα πλήθος υλικών που μπορούν να καθυστερήσουν την εμφάνιση της διάβρωσης σε νέες κατασκευές, άλλα επιβραδυντικά υλικά για υπάρχουσες κατασκευές ακόμη και υλικά που προκαλούν επαναπαθητικοποίηση του οπλισμού που έχει αποπαθητικοποιηθεί λόγω ύπαρξης χλωριόντων ή ενανθράκωσης. Τα υλικά αυτά υπάρχουν σε διάφορες μορφές ανάλογα με τον τρόπο που θα χρησιμοποιηθούν. Υπάρχουν σε μορφή προσμίκτων για νέες κατασκευές, σε μορφή διαλύματος το οποίο απλώνεται στην επιφάνεια με σκοπό το διαποτισμό του σκυροδέματος είτε σε μορφή υλικών επικάλυψης με σκοπό τη στεγανοποίηση των επιφανειών από υγρά και αέρια που ευθύνονται για το φαινόμενο της διάβρωσης. Η χρόνια χρήση αυτών των υλικών είναι αυτή που αποδεικνύει αν ένα υλικό είναι αποτελεσματικό ή όχι, καθώς οι εργαστηριακές δοκιμές δεν είναι αντιπροσωπευτικές. [1]

Οι μέθοδοι και οι διαδικασίες που ακολουθούνται προκειμένου να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο της διάβρωσης ή να προστατευθεί μια υπάρχουσα κατασκευή από τα προβλήματα διάβρωσης αναλύονται παρακάτω.

5.3.1 Προστατευτικές επενδύσεις.

Υδατοστεγείς μεμβράνες (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1 Υδατοστεγής μεμβράνη. [11]

Τα παραπάνω είναι διαθέσιμα είτε σε βιομηχανοποιημένα φύλλα είτε σε υγρά υλικά, τα οποία είναι μεν πιο ακριβά αλλά είναι πιο εύχρηστα κατά την εφαρμογή τους. Η χρήση των μεμβρανών αποτελεί οικονομικότερη λύση, προσφέρει καλύτερη πρόσφυση με το υπόστρωμα, εμποδίζει την είσοδο των χλωριόντων και της υγρασίας και τέλος οι μεμβράνες δεν αντιδρούν με τα υλικά του σκυροδέματος.

Η τοποθέτηση των μεμβρανών στο σκυρόδεμα θα πρέπει να ακολουθεί αυστηρά τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες όπως επίσης θα πρέπει να γίνεται κάτω από καλές καιρικές συνθήκες. Οι καιρικές συνθήκες, το πορώδες και η υγρασία του σκυροδέματος είναι αυτά που ευθύνονται για τη δημιουργία φυσαλίδων στην επιφάνεια του, πράγμα που μειώνει τη λειτουργικότητα των μεμβρανών.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί πως η αποτελεσματικότητα των υδατοστεγών μεμβρανών δεν διαρκεί για πάντα κι έτσι καθίσταται απαραίτητη η αλλαγή τους ανά τακτά χρονικά διαστήματα. [7]

Προστατευτικά επιστρώματα σκυροδέματος (Εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.2 Τοποθέτηση προστατευτικού επιστρώματος. [12]

Σκυροδέματα με τσιμέντο υψηλής ποιότητας, όπως το Portland ή αυτά που περιέχουν πολυμερή, είναι αυτά που μπορούν να γίνουν προστατευτικά επιστρώματα πάνω από το υφιστάμενο σκυρόδεμα, μειώνοντας τη διαπερατότητά του. Για τη σωστή κατασκευή των επιστρωμάτων απαιτείται να προηγηθεί διεργασία που θα εξασφαλίσει τη συνάφεια τους με το υπάρχον σκυρόδεμα.

Πρόκειται, συνήθως για επιστρώματα πάχους 40-50mm, των οποίων η παρασκευή γίνεται επί τόπου και πριν την τοποθέτησή τους πρέπει να έχει προηγηθεί διαβροχή του υποστρώματος. Τα προστατευτικά επιστρώματα μετά την τοποθέτησή τους πρέπει να συντηρούνται για τουλάχιστον 72 ώρες, γιατί σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες του περιβάλλοντος μπορεί να προκαλέσουν ξήρανση ή και συστολή ξήρανσης στο υπόστρωμα, φαινόμενο πολύ σοβαρό και επικίνδυνο. [7]

Εμποτισμός με πολυμερή στο σκυρόδεμα.

Η μέθοδος του εμποτισμού χρησιμοποιείται όταν η μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος δεν είναι αρκετή, πράγμα που σημαίνει πως είναι απαραίτητη η χρήση πιο δραστικών μέτρων, όταν το περιβάλλον είναι πολύ διαβρωτικό. Για τον παραπάνω λόγο, χρησιμοποιούμε τη μέθοδο της πλήρωσης των κενών με πολυμερή σε βάθος 35-50mm, η οποία αναλύεται παρακάτω:

- Καθαρισμός της επιφάνειας από τυχόν ξένες ουσίες.
- Άπλωμα άμμου στο σκυρόδεμα με σκοπό την αποφυγή ενός θερμικού σοκ του σκυροδέματος κατά την επακολουθούσα εφαρμογή υψηλών θερμοκρασιών.
- Ξήρανση του σκυροδέματος που επιτυγχάνεται με διατήρηση υψηλών θερμοκρασιών για αρκετό χρονικό διάστημα (120° C για 8 ώρες).

- Σταδιακή απόψυξη του σκυροδέματος με ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην απορροφηθεί υγρασία από το περιβάλλον (38° C για 12-36 ώρες).
- Αφαίρεση του αέρα από το σκυρόδεμα με εφαρμογή κενού.
- Προσθήκη μονομερούς.
- Προσθήκη αδιάβροχων μεμβρανών στην επιφάνεια, εμποδίζοντας έτσι την εξάτμιση του μονομερούς.
- Θερμικός καταλυτικός πολυμερισμός του μονομερούς στους 74° C για 5 ώρες.

Το μονομερές που χρησιμοποιείται συνήθως για τη μέθοδο του εμποτισμού είναι το μεθακρυλικό μεθύλιο, το οποίο ναι μεν έχει υψηλό κόστος, αλλά έχει μικρό ιξώδες, εύκολο πολυμερισμό, υψηλό σημείο βρασμού και δεν είναι τοξικό.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου του εμποτισμού είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε τύπο σκυροδέματος, ανεξάρτητα από τη σύσταση και την ποιότητά του, και βελτιώνει τις ιδιότητές του. Αντίθετα, τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η μεγάλη προσοχή που πρέπει να δοθεί στη διαδικασία της ξήρανσης του σκυροδέματος, ώστε να μην προκληθεί κάποια ρηγμάτωση, όπως επίσης ο ειδικός εξοπλισμός και το εξειδικευμένο προσωπικό που απαιτούνται. [7]

Επανακαλοποίηση του σκυροδέματος.

Η επανακαλοποίηση είναι μια μέθοδος η οποία εφαρμόζεται σε ενανθρακωμένα σκυροδέματα με στόχο να αυξήσει την αλκαλικότητά τους, μείωση που έχει επιφέρει το φαινόμενο της ενανθράκωσης. Η ηλεκτροώσμωση παρουσία εξωτερικού δυναμικού αποτελεί τη βάση αυτής της λειτουργίας. Η παραπάνω μέθοδος εφαρμόζεται ως εξής: Αρχικά απλώνεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος ένα αλκαλικό υλικό και ένα ηλεκτρόδιο που λειτουργεί σαν άνοδος, ενώ αντίθετα ο χάλυβας του οπλισμένου σκυροδέματος λειτουργεί σαν κάθοδος. Στη συνέχεια αφού εφαρμοστεί ένα εξωτερικό ηλεκτρικό δυναμικό επιτυγχάνεται η διείδυση του αλκαλικού υγρού στο εσωτερικό του σκυροδέματος και έτσι παρατηρείται άμεση αύξηση στο pH του.

Αλκαλικό υγρό ποσότητας περίπου 1,2 lt/m² είναι εφικτό να επανακαλοποιήσει σκυρόδεμα πάχους 1cm με πορώδες 12%. Πρόκειται για μία απλή μέθοδο που εφαρμόζεται για 14 ημέρες περίπου. Βασικό της μειονέκτημα είναι η πιθανότητα να υπάρξουν περιοχές στο σκυρόδεμα, στις οποίες δεν θα αυξηθεί το pH. [7]

Αφαίρεση χλωριόντων από το σκυρόδεμα.

Πρόκειται για μία μέθοδο που εφαρμόζεται με σκοπό την αφαίρεση χλωριόντων από καταστρώματα γεφυρών, από τα οποία μπορεί να αφαιρεθεί έως και το 90% των χλωριόντων. Είναι μία μέθοδος που βασίζεται στην αρχή της ηλεκτροωσμώσεως μιας και η αφαίρεση των χλωριόντων γίνεται ηλεκτροχημικά. Η αφαίρεση των χλωριόντων επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός κατάλληλου ηλεκτρολύτη, μιας ρητίνης ανταλλαγής ιόντων και ενός μεταλλικού πλέγματος που απλώνεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος που χρησιμεύουν σαν άνοδος, ενώ ο οπλισμός δρα σαν κάθοδος. Με την εφαρμογή του δυναμικού τα χλωριόντα έλκονται από τη θετικά φορτισμένη άνοδο, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα τη δέσμευσή τους από τη ρητίνη.

Η μέθοδος αυτή είναι δαπανηρή και απαιτεί την εφαρμογή υψηλού δυναμικού που έχει όμως ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγάλων θερμοκρασιών στο σκυρόδεμα το οποίο κινδυνεύει να ρηγματωθεί. Επίσης παρατηρείται αύξηση της διαπερατότητας του σκυροδέματος κατά πέντε φορές και θα πρέπει, ως εκ τούτου να πραγματοποιηθεί και εμποτισμός του σκυροδέματος με πολυμερή και, τέλος, υπάρχει κίνδυνος λόγω των συνθηκών να μειωθεί η αντοχή συνάφειας χάλυβα - σκυροδέματος. [7]

Αφαίρεση υγρασίας από το σκυρόδεμα.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι η τιμή του pH ($\text{pH} > 8$) και η περιεκτικότητα του κονιάματος σε ποσότητες αλάτων (μικρή περιεκτικότητα). Η πολύ μικρή ή η πολύ μεγάλη ποσότητα αλάτων εμποδίζει την ξήρανση του πορώδους. Η ιδανικότερη περίπτωση είναι αυτή που η περιεκτικότητα σε άλατα κυμαίνεται από 2-5%, ενώ η παρουσία θεικών ιόντων, τα οποία διευκολύνουν τη διάσπαση του νερού, θεωρείται αρνητική για την εφαρμογή της μεθόδου.

Η διαδικασία εφαρμογής είναι ανάλογη με αυτή που εφαρμόζεται για την αφαίρεση των χλωριόντων από το σκυρόδεμα. Με τον τρόπο αυτό, η διαφορά δυναμικού αναγκάζει τα ιόντα των αλάτων να κινηθούν προς τα ηλεκτρόδια, μεταφέροντας έτσι και το νερό. Για την πραγματοποίηση της ξήρανσης θα πρέπει να δημιουργηθεί ρεύμα έντασης τουλάχιστον ίσης με 0,1 έως 1 A.

Πρόκειται για μία πολύ αργή μέθοδο, πράγμα που μπορούμε να αντιληφθούμε εύκολα αν αναλογιστούμε ότι για να πέσει η υγρασία ενός τοίχου από το 50% στο 30% θα πρέπει να εφαρμοστεί για 6 μήνες. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται σε τοιχοποιίες όπου το κόστος είναι χαμηλό ενώ τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά. [7]

5.3.2 Αναστολείς διάβρωσης.

Με δεδομένο ότι ο χάλυβας δεν μπορεί να δημιουργήσει προστατευτικό επίστρωμα μόνος του, πρέπει να καλυφθεί με κάποιο επίστρωμα για να μην σκουριάσει με την ατμοσφαιρική έκθεση.

Αναστολέας διάβρωσης μπορεί να χαρακτηριστεί οποιαδήποτε ουσία που είναι ικανή να εμποδίσει το χάλυβα να έρθει σε επαφή με οξυγόνο, υγρασία ή χλωριόντα. Τα επιχρίσματα αυτά τοποθετούνται στο χάλυβα όταν αυτός είναι απολύτως καθαρός και απαλλαγμένος από ελαιώδεις ουσίες, σκόνη ή σκουριά. Αναστολέας είναι μια χημική ουσία που όταν προστεθεί σε μικρή συγκέντρωση σε ένα περιβάλλον, μειώνει σημαντικά το ρυθμό διάβρωσης. Ιδιαίτερο πλεονέκτημα στην προστασία μετάλλων με χρήση αναστολέων είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί ή να αλλαχθεί *in situ* χωρίς να δημιουργήσει μεγάλη αναστάτωση στη διαδικασία δόμησης ή επισκευής. Απαραίτητη είναι μια τυποποίηση που θα μας λέει πως ανάλογα με το βαθμό ενανθράκωσης, το pH, το είδος του χάλυβα και τη σύνθεση του σκυροδέματος θα πρέπει να εφαρμόσουμε συγκεκριμένο αναστολέα για καταπολέμηση των αιτιών της διάβρωσης. [8]

Οι αναστολείς διάβρωσης μπορούν να επηρεάσουν είτε τις ανοδικές, είτε τις καθοδικές αντιδράσεις, είτε και τις δύο. Θα πρέπει να γίνεται σαφής διάκριση μεταξύ των αναστολέων διάβρωσης και άλλων προσθέτων του σκυροδέματος που βελτιώνουν την αντοχή σε

διάβρωση του σκυροδέματος με τη μείωση της διείσδυσης των ιόντων χλωρίου, όπως π.χ. η πυριτική παιπάλη.

Οι αναστολείς διάβρωσης χωρίζονται, ανάλογα με τον τρόπο δράσης τους στις εξής κατηγορίες:

- **Ανοδικοί αναστολείς διάβρωσης:** Τα υλικά αυτά προκαλούν αναστολή της διάβρωσης, σταθεροποιώντας το προστατευτικό φιλμ του οπλισμού, το οποίο έχει την τάση να διασπάται όταν ανεβαίνει η περιεκτικότητα των χλωριδίων. Τέτοιοι αναστολείς είναι αυτοί που περιέχουν νιτρώδες ασβέστιο και χρησιμοποιούνται σε κονιάματα επισκευών. Το νιτρώδες ασβέστιο όμως έχει σαν παράπλευρη δράση την επιτάχυνση της πήξης και θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για την αποφυγή φαινομένων «άμεσης πήξης».
- **Καθοδικοί αναστολείς διάβρωσης:** Αυτοί προσροφώνται από τον οπλισμό και σχηματίζουν στην επιφάνειά του ένα φράγμα που οδηγεί στη μείωση του οξυγόνου που είναι η κύρια αιτία καθοδικής αντίδρασης του χάλυβα στο σκυρόδεμα. Όμως, οι πιο πολλοί καθοδικοί αναστολείς, όπως οι αμίνες και τα φωσφορικά, έχουν σαν αποτέλεσμα τη μεγάλη επιβράδυνση της πήξης του σκυροδέματος.
- **Οργανικοί αναστολείς διάβρωσης (προσροφητικοί αναστολείς διάβρωσης):** Η δράση τους συνδυάζει ανοδική και καθοδική προστασία. Χαρακτηριστικό δείγμα αυτών των αναστολέων είναι οι οργανικές αμίνες όπως π.χ. οι αμινοαιθανόλες.
- **Αναστολείς διάβρωσης φάσης ατμού:** Έχουν παρόμοια δράση με τους προσροφητικούς αναστολείς αλλά επίσης προκαλούν υψηλή πίεση υδρατμών, που λειτουργεί ως φράγμα στη διείσδυση διαβρωτικών ουσιών από την ατμόσφαιρα στο σκυρόδεμα.
- **Οξειδωτικοί αναστολείς διάβρωσης:** Τέτοιες ουσίες, όπως είναι και τα χρωμικά άλατα, δρουν σαν αναστολείς διάβρωσης με πολλούς τρόπους. Η βασική τους χρήση είναι η αναστολή διάβρωσης σε μέταλλα που επιδεικνύουν ενεργητική παθητική μετάλλαξη, όπως ο σίδηρος και τα κράματά του.

Από τα παραπάνω είδη αναστολέων διάβρωσης οι πιο αποτελεσματικοί είναι οι οργανικοί αναστολείς, οι οποίοι μπορούν να διεισδύσουν μέσα από το σκληρυμένο σκυρόδεμα μέσω διάχυσης. [8]

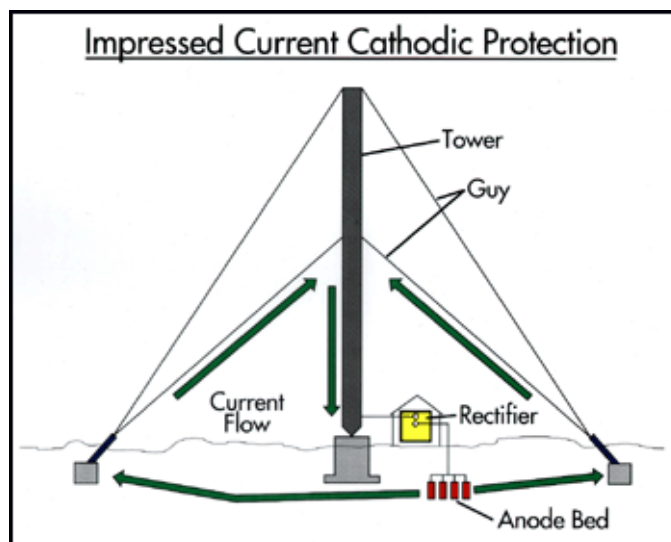
5.3.3 Καθοδική προστασία.

Σκοπός της είναι να επανέλθει η αλκαλικότητα του σκυροδέματος και να αποφευχθεί η ενανθράκωση των οπλισμών. Κατά τη μέθοδο της καθοδικής προστασίας, φορτίζουμε αρνητικά την εγκατάσταση που θέλουμε να προστατέψουμε. Έτσι ενώ πριν η εγκατάσταση ήταν άνοδος, τώρα γίνεται κάθοδος. Αυτό σημαίνει ότι η εγκατάσταση εξακολουθεί να είναι αρνητικά φορτισμένη, όπως και πριν από την εφαρμογή της προστασίας, απλά η δράση αντιστρέφεται: έχει προδιάθεση να πάθει αναγωγή και όχι, όπως αρχικά, οξείδωση. Για να εφαρμοστεί η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθούν, είτε ηλεκτρική τάση από πηγή συνεχούς ρεύματος, είτε θυσιαζόμενοι άνοδοι. Άρα διακρίνουμε: [9]

A) Σύστημα με εφαρμοζόμενο ρεύμα. [9]

Η μέθοδος αυτή συνίσταται στη σύνδεση του θετικού πόλου μιας πηγής συνεχούς ρεύματος με την επιφάνεια του σκυροδέματος, και του αρνητικού με τους οπλισμούς. Έτσι, η επιφάνεια γίνεται άνοδος και οι οπλισμοί κάθοδος. Τα ανιόντα υδροξυλίου (OH^-) που σχηματίζονται στην κάθοδο (χάλυβας) με την αντίδραση του νερού των πόρων με το οξυγόνο και με ελεύθερα ηλεκτρόνια από την κάθοδο, κινούνται προς την επιφάνεια αντί να κατευθύνονται κατά μήκος των ράβδων. Επίσης προς την επιφάνεια κινούνται υπό την επίδραση της τάσης συνεχούς ρεύματος και τα τυχόν υπάρχοντα χλωριόντα της μάζας του σκυροδέματος και του νερού των πόρων. Έτσι η εξουδετέρωση των ανιόντων, δηλαδή η οξείδωση, γίνεται στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος και όχι στο χάλυβα που θα είχε ως συνέπεια τη διάβρωσή του.

Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής απαιτεί εξαιρετικά μεγάλη προσοχή γιατί αν εφαρμοστεί με λανθασμένες συνθήκες, η αύξηση της καθοδικότητας της εγκατάστασης πάνω από ορισμένο όριο (υπερπροστασία), μεγαλώνει εξαιρετικά την ταχύτητα διάβρωσης. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με την επάλειψη μεγάλου τμήματος της επιφάνειας του σκυροδέματος με ένα συνεχές στρώμα ηλεκτρικά αγωγίμης μπογιάς (συνήθως με βάση τον άνθρακα) με το οποίο συνδέονται σε αρκετά πυκνές αποστάσεις ηλεκτρικά καλώδια από το θετικό πόλο της ηλεκτρικής πηγής. Η σύνδεση των ράβδων οπλισμού ή η επαφή των ράβδων μέσω των συρμάτων επαρκεί. Αντίθετα εντελώς απαραίτητο είναι να μην υπάρχουν μεταξύ του επιφανειακού αγωγίμου στρώματος και των ράβδων οπλισμού σύρματα, καβίλιες και άλλα που μπορούν να βραχυκυκλώσουν το ηλεκτρικό κύκλωμα.



Σχήμα 5.1 Σύστημα με εφαρμοζόμενο ρεύμα. [13]

Εφαρμόζεται πολύ περισσότερο σε σχέση με τη μέθοδο θυσιαζόμενων ηλεκτροδίων, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις:

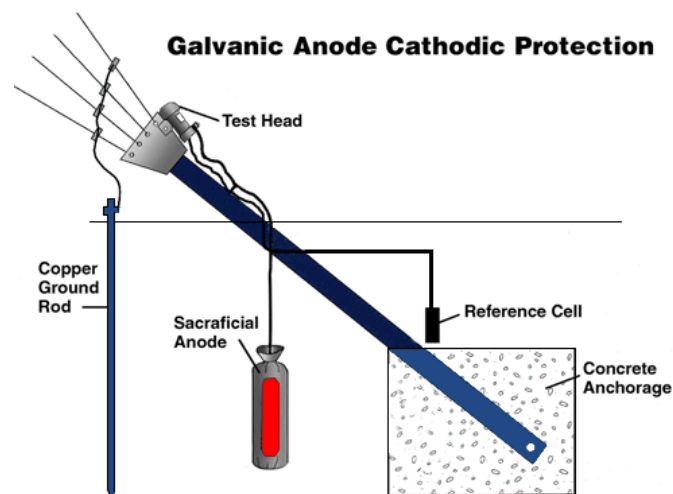
A) για την προστασία σωλήνων μέσα στο έδαφος σε γλυκό ή θαλασσινό νερό

B) σε κατασκευές πλωτών και μη, μέσα στη θάλασσα

Γ) για πλοία.

B) Σύστημα θυσιαζόμενης ανόδου. [10]

Κατά αυτόν τον τρόπο καθοδικής προστασίας τοποθετείται στους οπλισμούς σειρά πλακών από μέταλλο ανοδικότερο του χάλυβα, το οποίο λειτουργεί ως θυσιαζόμενη άνοδος. Συνήθως χρησιμοποιούνται κράματα Mg, Zn, Al. Οι πλάκες αυτές συνδέονται με την κατασκευή χωριστά η καθεμία με τη βοήθεια εξωτερικά μονωμένων αγωγών και με την παρεμβολή αντίστασης. Τα ανοδικότερα αυτά μέταλλα αποκτούν αυθόρμητα αρνητικό δυναμικό σε σχέση με το διαβρωτικό περιβάλλον. Το ίδιο αρνητικά φορτισμένη (σε σχέση με το διαβρωτικό περιβάλλον) είναι και η κατασκευή που πρόκειται να προστατευθεί. Όμως, τα μέταλλα αυτά έχουν μεγαλύτερη προδιάθεση να διαβρωθούν και για το λόγο αυτό φορτίζονται περισσότερο αρνητικά ως προς το περιβάλλον απ' ό,τι ο χάλυβας. Έτσι ο χάλυβας φορτίζεται θετικά ως προς τα μέταλλα αυτά. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα γαλβανικό στοιχείο με αρνητικό πόλο το μέταλλο και θετικό το χάλυβα. Επιβάλλεται δηλαδή στο χάλυβα από τα ανοδικότερα αυτά τα μέταλλα ένα αντίστροφο δυναμικό, απ' το δυναμικό διάβρωσής του (ηλεκτρόνια ρέουν από την πλάκα του μετάλλου προς το χάλυβα). Ταυτόχρονα, εξ αιτίας του γαλβανικού στοιχείου που δημιουργήθηκε, το ανοδικότερο μέταλλο οξειδώνεται (απώλεια ηλεκτρονίων, σχηματισμός ιόντων) και καταναλίσκεται περισσότερο παρά αν ήταν μόνο του. Θυσιάζεται δηλαδή για την προστασία της κατασκευής.



Σχήμα 5.2 Σύστημα θυσιαζόμενης ανόδου. [13]

Όσον αφορά τους κινδύνους χρήσης της μεθόδου αυτής, έχει παρατηρηθεί ότι όταν οι άνοδοι από μαγνήσιο (Mg) ή αλουμίνιο (Al) τοποθετηθούν σε σκουριασμένη επιφάνεια και κοντά σε εύφλεκτα υλικά, όπως πετρέλαιο, παράγουν σπινθήρα εξαιτίας θερμικής αντίδρασης. Σε επικίνδυνο περιβάλλον συνίσταται άνοδος Zn. Από την άλλη, άνοδοι Zn δεν λειτουργούν αποτελεσματικά σε παραθαλάσσιο περιβάλλον με υψηλή θερμοκρασία (άνω των 60° C).

Βιβλιογραφικές Αναφορές 5^ο Κεφαλαίου

[1] Μιχαήλ Ν. Φαρδής, Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος ΙΙΙ, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2005.

[2]

http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/METAL_KATASK/me4_3t.htm

.

[3] Διαφημιστικό φυλλάδιο renovat, Έκδοση 2000.

[4] 11^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Τ.Ε.Ε. Ελληνικό Τμήμα Σκυροδέματος, Κέρκυρα, 1994, τόμος Ι.

[5] Θανάσης Χ. Τριανταφύλλου, Δομικά υλικά, Πάτρα 2002.

[6] Τ.Ε.Ε. Αντισεισμική θωράκιση υφιστάμενων κατασκευών, Μέθοδοι για την επιτόπου αποτίμηση των χαρακτηριστικών των υλικών, Χρ. Σπανός, Μ. Σπιθάκης και Κ. Τρέζος, Αθήνα 2001.

[7] Τάσιος Θ. Π. και Αλιγιζάκη Κ., Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος, Εκδόσεις Φοίβος, Αθήνα 1993.

[8] Γ. Μπατής, Εισήγηση στην ημερίδα του ΤΕΕ: Ενίσχυση κτιρίων με σύγχρονα υλικά.

[9] Θ. Ν. Σκουλικίδης, Διάβρωση και προστασία υλικών, Αθήνα 1994.

[10] Σ. Βλάχος, Προστασία χάλυβα από διάβρωση (Διδακτορική διατριβή), 1991.

[11] <http://www.knauf.gr> .

[12] <http://anadomicity.files.wordpress.com> .

[13] <http://www.anchorguard.com> .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το σκυρόδεμα είναι το υλικό που παρουσιάζει την ευρύτερη χρήση από όλα τα δομικά υλικά τόσο στη χώρα μας όσο και διεθνώς. Αυτό οφείλεται κυρίως στο συνδυασμό ιδιοτήτων και κόστους του καθώς έχει εξαιρετική συμπεριφορά με το νερό, μεγάλη ανθεκτικότητα σε διάρκεια και περιβαλλοντικές επιδράσεις, χαμηλό κόστος και χαμηλή ενέργεια για την παρασκευή του. Λόγω των υψηλών αντοχών του χρησιμοποιείται για το σύνολο σχεδόν των κατασκευαστικών έργων.

Οι Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος (Χ.Ο.Σ.) που παράγονται σήμερα, τόσο στην Ελλάδα όσο και διεθνώς, προέρχονται στο μεγαλύτερο μέρος από τήξη παλαιοσιδήρου σε ηλεκτρικές καμίνες. Χρησιμοποιούνται ως οπλισμός του σκυροδέματος και καλύπτουν την αδυναμία που έχει το σκυρόδεμα (μικρή εφελκυστική αντοχή). Ο χάλυβας μπορεί να συνεργαστεί με το σκυρόδεμα επειδή έχει παρόμοιο συντελεστή θερμικής διαστολής. Το σύνθετο υλικό που προκύπτει από την ενίσχυση του σκυροδέματος με χάλυβα ονομάζεται οπλισμένο σκυρόδεμα ή μπετόν αρμέ.

Από την παρούσα εργασία διαπιστώθηκαν, αναφορικά με την αλληλεπίδραση του οπλισμένου σκυροδέματος με το περιβάλλον, τα εξής:

- Το βασικό πρόβλημα του οπλισμένου σκυροδέματος από άποψη ανθεκτικότητας είναι η διάβρωση των οπλισμών, από την οποία οι ράβδοι οπλισμού προστατεύονται μέσω ενός πολύ λεπτού επιφανειακού στρώματος ένυδρου οξειδίου του σιδήρου. Η αλκαλικότητα, κατά την οποία δημιουργείται αυτό το στρώμα, χαρακτηρίζεται από μια τιμή του pH γύρω στο 12.5. Όταν οι τιμές του pH πέσουν κάτω από 9.0 ο χάλυβας αποπαθητικοποιείται, κατάσταση που ευνοούν η ενανθράκωση και η δράση των χλωριόντων.
- Η μείωση του pH σε τιμές κάτω του 9.0 οφείλεται στην αντίδραση του Ca(OH)_2 του νερού των πόρων με το CO_2 της ατμόσφαιρας, από την οποία το Ca(OH)_2 μετατρέπεται σε CaCO_3 , διαδικασία που ονομάζεται ενανθράκωση του σκυροδέματος. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την ενανθράκωση είναι οι συνθήκες του περιβάλλοντος, η ποιότητα και το πάχος της επικάλυψης και το είδος του τσιμέντου.
- Το προστατευτικό στρώμα οξειδίου μπορεί να διατηρηθεί τοπικά από ιόντα χλωρίου, φαινόμενο σύνηθες σε παραθαλάσσιες περιοχές, καθώς ιόντα χλωρίου υπάρχουν στον ατμοσφαιρικό αέρα. Άλλη μία πηγή χλωριόντων είναι τα συλλεκτά αδρανή του σκυροδέματος (από παραλίες), όπως και τα πρόσθετα βελτιωτικά που περιέχουν χλωριούχα άλατα. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τη δράση των χλωριόντων είναι η ποιότητα και το πάχος της επικάλυψης, η περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο – πρόσθετα, το είδος και η συγκέντρωση των χλωριόντων και το περιβάλλον.
- Ο έλεγχος του σκυροδέματος ως προς την ενανθράκωση γίνεται με ψεκασμό φαινολοφθαλείνης σε φρεσκοθραυσμένες επιφάνειες και από το χρωματισμό που θα

πάρουν εκτιμάμε την κατάσταση του σκυροδέματος και ακολουθούμε τις διαδικασίες για την επισκευή του.

- Η διάβρωση του χάλυβα στο οπλισμένο σκυρόδεμα, αποτελεί ένα παγκόσμιο πρόβλημα το οποίο είναι δυνατόν να προκαλέσει καταστροφές οι οποίες κυμαίνονται από απλές παραμορφώσεις μέχρι ολοκληρωτικές δομικές καταστροφές.
- Το φαινόμενο της διάβρωσης οφείλεται κυρίως στην είσοδο του νερού στο σκυρόδεμα, λόγω των ρωγμών που δημιουργούνται στην επιφάνειά του ή λόγω της αύξησης του πορώδους.
- Η ομοιόμορφη διάβρωση συμβαίνει σε περιπτώσεις που η ενανθράκωση του σκυροδέματος έχει φτάσει στο βάθος όπου βρίσκονται οι χαλύβδινες ράβδοι και μικρές ποσότητες υγρασίας. Η φθορά που προκαλείται εμφανίζεται στην επιφάνεια των δομικών στοιχείων σαν μια λεπτή σχισμή (ρηγμάτωση) παράλληλη στον οπλισμό. Αντιθέτως, η τοπική διάβρωση εμφανίζεται σε συγκεκριμένες θέσεις όπου η διάβρωση της πλάκας έχει προκληθεί από συσσώρευση υγρασίας ακριβώς πάνω από εκείνο το σημείο.
- Το φαινόμενο της ατμοσφαιρικής διάβρωσης είναι αποτέλεσμα της επίδρασης της ατμόσφαιρας στις κατασκευές, ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο που λαμβάνει χώρα ως γαλβανικό στοιχείο όπου η παρουσία επιφανειακού ηλεκτρολύτη προχωράει την αντίδραση.
- Δυστυχώς ο χάλυβας οπλισμένου σκυροδέματος, και κατά τη μεταφορά και κατά την αποθήκευση του στα εργοτάξια, βρίσκεται εκτεθειμένος στα χλωριόντα του θαλασσινού νερού, στο νερό της βροχής και στις ρυπογόνες ατμοσφαιρικές ουσίες για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η έκθεση του σε όλα τα παραπάνω δημιουργεί προϊόντα διάβρωσης στην επιφάνεια του. Για τους παραπάνω λόγους είναι προτιμότερο η αποθήκευση των οπλισμών να γίνεται σε στεγανοποιημένους χώρους. Γενικότερα συνίσταται, ο χάλυβας πριν τη χρήση του να μην παρουσιάζει τυχόν αλλοιώσεις ή παραμορφώσεις που να μπορούν να επιταχύνουν τη διάβρωση του.
- Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα επηρεάζονται από την παρουσία οξειδίων, καθώς η αλλαγή στη διατομή του, λόγω της οξείδωσης μπορεί να μειώσει την αντοχή και την ολκιμότητά του με αποτέλεσμα τη στατική ανεπάρκεια της κατασκευής.
- Προκειμένου να περιορισθούν οι επιπτώσεις της πυρκαγιάς σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν τα εξής: (α) υψηλός βαθμός αερισμού συνεπάγεται ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών (β) ο χάλυβας ψυχρής έλασης πλήττεται σημαντικά από τις υψηλές θερμοκρασίες (γ) ως στατικά συστήματα προτιμώνται συνεχείς δοκοί και πολύστυλα πλαίσια (δ) προτιμώνται τα ασβεστολιθικά αδρανή σε σχέση με τα πυριτικά (ε) έχοντας μεγάλες διατομές, η βραδεία διεύδυση της θερμοκρασίας αποτρέπει την σε μικρό χρόνο απώλεια μεγάλου ποσοστού της αντοχής του στοιχείου (στ) επαύξηση της αντοχής στις πλάκες μπορεί να γίνει με επέκταση μέρους του οπλισμού στα ανοίγματα στο πάνω πέλμα (ζ) απαιτείται καλή διάστρωση του σκυροδέματος ώστε να προκύψει επιφάνεια χωρίς ανωμαλίες και να αυξηθεί η αντοχή (η) υψηλή θλιπτική αντοχή και μεγάλες διαμέτρου ράβδοι ευνοούν τη διατήρηση υψηλότερων ποσοστών αντοχής σε συνάφεια και μετά τη θέρμανση.

- Για να μπορέσουμε να προτείνουμε μέτρα για την αντιμετώπιση της διάβρωσης θα πρέπει να γνωρίζουμε ποια είναι η παρουσία χλωριόντων, το βάθος ενανθράκωσης, τη διάβρωση του χάλυβα και την αντίστοιχη απώλειά διατομής του λόγω αυτής, τη διαπερατότητα και την υγρασία του σκυροδέματος. Έτσι θα είμαστε σε θέση να επιλέξουμε την βέλτιστη λύση.
- Για νέες κατασκευές η αύξηση του πάχους της επικάλυψης των οπλισμών με σκυρόδεμα και η μείωση του πορώδους του τελευταίου μέσω κατάλληλης σύνθεσης, είναι σίγουρα οικονομικότερη και ασφαλέστερη λύση από οποιοδήποτε προϊόν προστασίας από διάβρωση.
- Τα υλικά χρωματισμών που παρέχουν ουσιαστική μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος δεν είναι οικονομικά. Αντίθετα τα συνηθισμένα επιχρίσματα, και ιδιαίτερα αυτά που έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε άσβεστο μιας και δεσμεύει το CO₂ και τα χλωριόντα, μειώνουν το κίνδυνο διαβρώσεως. Μάλιστα, πολύ αποτελεσματική είναι και η εφαρμογή του επιχρίσματος έστω και μετά από την πάροδο αρκετών ετών, και αυτό γιατί ανακόπτει τις διεργασίες διάβρωσης.
- Όσο αφορά την προστασία του χάλυβα, η μοναδική μέθοδος που προσφέρει άμεση προστασία στους οπλισμούς, είναι η καθοδική προστασία. Στην περίπτωση που η διάβρωση του χάλυβα είναι περιορισμένη, χρειάζεται να γίνει αντικατάσταση της επικάλυψης, καθαρισμός των ράβδων και προσθήκη εποξειδοτικής ρητίνης σε αυτούς. Αν όμως είναι εκτεταμένη χρειάζεται ριζική ενίσχυση των στοιχείων.