

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΑΠΟ ΥΓΡΑΣΙΑ & ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΣΕ ΠΑΡΑΘΑΛΑΣΣΙΑ
ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΑ ΕΡΓΑ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ**

Σπουδάστριες: ΒΛΑΧΟΠΟΥΛΟΥ ΕΥΦΡΟΣΥΝΗ

ΚΑΣΤΑΝΟΥ ΣΟΦΙΑ

Επιβλ. Καθηγητής: ΑΥΤΟΥΣΜΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

Σεπτέμβριος, 2022

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος/η Βλαχοπούλου Ευφροσύνη...και Καστανού Σοφία του...Νικολαου και του Εμμανουηλ αντιστοιχα με αριθμό μητρώου 47895 και 47894 φοιτητής/τρια του Προγράμματος Διπλωματικών Σπουδών του Τμήματος...Πολιτικών-μηχανικών της Σχολής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο/Η Δηλών/ούσα



ΚΑΣΤΑΝΟΥ ΣΟΦΙΑ



ΒΛΑΧΟΠΟΥΛΟΥ ΕΥΦΡΟΣΥΝΗ

Η Διπλωματική Εργασία Εξετάστηκε Επιτυχώς από την κάτωθι
Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή

Σταυρούλα Δενεζάκη
Λέκτορα – Εφαρμογών

Τριαντάφυλλος – Φίλης Κόκκινος
Αναπληρωτής Καθηγητής



Μ.Αλογομιά
Ακαδημαϊκός Επιστήμων

Ευχαριστίες

Μέσα από τις επόμενες γραμμές θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ειλικρινείς μας ευχαριστίες στον επιβλέπων καθηγητή μας, που συνέβαλε τα μέγιστα με τη βοήθεια του στην επιτυχή ολοκλήρωση της διπλωματικής μας εργασίας. Θα θέλαμε λοιπόν να ευχαριστήσουμε το εκπαιδευτικό και διοικητικό προσωπικό της σχολής, τους υπόλοιπους καθηγητές του τμήματος καθώς τους φίλους και τους συμφοιτητές μας για τις γνώσεις και τις πλούσιες εμπειρίες που αποκομίσαμε στα χρόνια της φοιτητικής μας δραστηριότητας. Πάνω από όλους θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας στις οικογένειες μας για την ενθάρρυνση και ηθική συμπαράσταση που μας προσέφεραν όλα τα χρόνια των σπουδών μας.

Περίληψη

Τελευταία, έχει παρατηρηθεί ότι έργα που έχουν δημιουργηθεί πριν από χρόνια, με χρήση οπλισμένου σκυροδέματος έχουν αρχίσει να παρουσιάζουν φθορές, και σταδιακά χάνουν την χρησιμότητά τους. Αυτό δεν συνεπάγεται ότι είναι από λειτουργικής άποψης ανεπαρκή, ή ότι έχουν επηρεαστεί από εξωτερικές μηχανικές δράσεις, αλλά βάσει της φυσικής ροής των πραγμάτων έχουν παλιώσει. Ως εκ τούτου, το ζήτημα της ανθεκτικότητας του οπλισμένου σκυροδέματος πρέπει να διευθετηθεί από τους πολιτικούς μηχανικούς, μια κατάσταση που κατά κύριο λόγο είναι απόρροια των μηχανισμών διάβρωσης. Πρόκειται για ένα φαινόμενο πολύπλοκο και συχνά μη προβλέψιμο, αφού αιτία διάβρωσης των υλικών (σκυρόδεμα, χάλυβας κ.α.) είναι πολλοί παράγοντες.

Επίσης, σημαντική παράμετρος που μπορεί να ασκήσει επιρροή επί της στατικής επάρκειας μιας κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος είναι η εκδήλωση πυρκαγιών. Ωστόσο, η φωτιά δεν είναι ικανή να προκαλέσει αυτοτελώς καταστροφές επί του οπλισμένου σκυροδέματος. Σημειώνεται, πως δεν είναι εφικτός ο ακριβής υπολογισμός των επιδράσεων μιας πυρκαγιάς σ' αυτού του τύπου τις κατασκευές, κι έτσι η αντιμετώπιση γίνεται εμπειρικά.

Απώτερος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να αναλυθούν διεξοδικά τα παραπάνω φαινόμενα. Πιο αναλυτικά, στην αρχή θα γίνει παρουσίαση του τρόπου με τον οποίο παρασκευάζεται το οπλισμένο σκυρόδεμα. Ακολούθως, θα αναλυθεί πώς η ενανθράκωση και τα χλωριόντα αντιμετωπίζουν θετικά τα φαινόμενα διάβρωσης. Επίσης, θα περιγραφεί ο τρόπος δημιουργίας της διάβρωσης οπλισμού (οικονομικές επιπτώσεις, παράγοντες επίδρασης, μορφές διάβρωσης, ατμοσφαιρική διάβρωση κ.λπ.), και θα αναλυθεί το πώς επιδρά η πυρκαγιά σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος (ιδιότητες υλικών, συμπεριφορά δομικών στοιχείων, ζημιές, αίτια βλαβών στον φέροντα οργανισμό). Εν συνεχεία, θα προταθούν μέτρα, που κρίνεται σκόπιμο να ληφθούν εκ των προτέρων, αλλά και εκ των υστέρων, προς αντιμετώπιση των παραπάνω φαινομένων. Τέλος, θα γίνει καταγραφή των γενικών συμπερασμάτων.

Λέξεις-κλειδιά: σκυρόδεμα, χάλυβας, παραθαλάσσια οικοδομικά έργα.

Abstract

Recently, it has been observed that structures built years ago using reinforced concrete have begun to deteriorate and gradually lose their usefulness. This does not imply that they are functionally inadequate, or that they have been affected by external mechanical actions, but in the normal course of events they have become outdated. Therefore, the issue of the durability of reinforced concrete must be addressed by civil engineers, a situation that is primarily a result of corrosion mechanisms. This is a complex and often unpredictable phenomenon, since corrosion of materials (concrete, steel, etc.) is caused by many factors.

Also, an important parameter that can influence the structural adequacy of a reinforced concrete structure is the occurrence of fires. However, fire is not capable of causing damage to reinforced concrete in isolation. It should be noted that it is not possible to accurately calculate the effects of fire on this type of structure, so the response is empirical.

The ultimate purpose of this paper is to analyze these phenomena in detail. In more detail, at the beginning, the way in which reinforced concrete is prepared will be presented. Subsequently, it will be analyzed how carbonation and chlorides positively deal with corrosion phenomena. It will also describe how reinforcement corrosion occurs (economic impact, influencing factors, forms of corrosion, atmospheric corrosion, etc.) and how fire affects reinforced concrete structures (material properties, behavior of structural elements, damage, damage causes to the load-bearing structure). Subsequently, measures will be proposed that are deemed appropriate to be taken both ex ante and ex post to deal with the above phenomena. Finally, the general conclusions will be recorded.

Keywords: concrete, steel, coastal construction projects.

Περιεχόμενα

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	2
Ευχαριστίες	4
Εισαγωγή	10
1^ο κεφάλαιο: Οπλισμένο σκυρόδεμα	11
1.1 Σκυρόδεμα	11
1.1.1 Υλικά - Παρασκευή	11
1.1.1.1 Τσιμέντο	12
1.1.1.2 Αδρανή υλικά	12
1.1.1.3 Νερό πρόσμειξης	14
1.1.1.4 Βελτιωτικά - Πρόσμικτα.....	14
1.2 Χάλυβας οπλισμένου σκυροδέματος	15
1.2.1 Παραγωγή χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος.	15
1.2.2 Ποιότητες του χάλυβα	17
1.3 Οπλισμένο σκυρόδεμα	18
1.3.1 Ιδιότητες σκυροδέματος	18
1.3.2 Ιδιότητες οπλισμού	18
1.3.3 Σύντομη αναφορά στη λειτουργία του οπλισμένου σκυροδέματος	19
1.3.4 Συνάφεια οπλισμένου σκυροδέματος.....	20
2^ο Κεφάλαιο: Ενανθράκωση Σκυροδέματος	21
2.1 Μηχανισμός Ενανθράκωσης και δράση των χλωριόντων	21
2.1.1 Ενανθράκωση	21
2.1.1.1 Παράμετροι που επηρεάζουν την ενανθράκωση	22
2.1.2 Η δράση και οι πηγές των χλωριόντων.....	23
2.1.2.1 Παράμετροι που επηρεάζουν τη διάβρωση του χάλυβα από χλωριόντα.....	24
2.2 Η σημασία του νερού στους πόρους	24
2.3 Έλεγχος και διαδικασίες επισκευής ενανθράκωσης	24
3^ο κεφάλαιο: Διάβρωση από την υγρασία	31
3.1 Σημασία και οικονομικές επιπτώσεις διάβρωσης	31
3.2 Παράμετροι και παράγοντες που επιδρούν στην διάβρωση	31
3.3 Μορφές διάβρωσης	33
3.4 Ατμοσφαιρική διάβρωση	38
3.4.1 Διάβρωση χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος.....	38
4^ο Κεφάλαιο: Επίδραση Πυρκαγιάς	43
4.1 Συμπεριφορά δομικών υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες	43
4.2 Το σκυρόδεμα σε υψηλές θερμοκρασίες	43
4.2.1 Εκτίμηση των μέγιστων τιμών θερμοκρασίας με βάση το χρώμα του υλικού.....	43
4.2.2 Συμπεριφορά του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες	44

4.2.3 Επίδραση της πυρκαγιάς στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος.....	44
4.3 Ο χάλυβας σε υψηλές θερμοκρασίες	47
4.3.1 Επίδραση της πυρκαγιάς στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα.....	47
4.3.2 Επιρροή της πυρκαγιάς στη συνάφεια χάλυβα – σκυροδέματος.....	50
4.4 Βλάβες μελών οπλισμένου σκυροδέματος έπειτα από πυρκαγιές.....	51
4.4.1 Αναλυτική αναφορά στη συμπεριφορά δομικών στοιχείων σε υψηλές θερμοκρασίες .	52
5.1 Μέτρα προστασίας εκ των προτέρων	56
5.1.1 Από το φαινόμενο της διάβρωσης	56
5.1.2 Από το φαινόμενο της πυρκαγιάς.....	57
5.2 Αποτίμηση διάβρωσης σε υπάρχουσες κατασκευές	60
5.3 Μέτρα προστασίας υφιστάμενων κατασκευών από την διάβρωση	61
5.3.1 Προστατευτικές επενδύσεις.....	61
5.3.2 Αναστολείς διάβρωσης.....	66
5.3.3 Καθοδική προστασία	67
6ο Κεφάλαιο: Συμπεράσματα θεωρητικού μέρους	71
7ο Κεφάλαιο: Πειραματικό μέρος – διάβρωση οπλισμένου σκυροδέματος σε παραθαλάσσια έργα	74
7.1 Αντικείμενο εργασίας	74
7.2 Προετοιμασία	75
7.3 Κατασκευή δοκιμίων.....	75
7.4 Σύστημα επικάλυψης.....	77
7.5 Διαβρωτικό περιβάλλον έκθεσης δοκιμίων	77
8.1 Ηλεκτροχημικές μετρήσεις αποτίμησης διάβρωσης	78
8.1.1 Μέτρηση δυναμικού διάβρωσης (OCP)	78
8.1.2 Αρχή μεθόδου	78
8.1.3 Ηλεκτρόδια αναφοράς	79
8.1.4 Κατάσταση σκυροδέματος σε σχέση με το δυναμικό διάβρωσης.....	80
8.2 Τεχνική γραμμικής πόλωσης (LPR).....	80
8.2.1 Αρχή μεθόδου	81
8.2.2 Κατάσταση χάλυβα συνάρτηση μετρήσεων γραμμικής πόλωσης.....	82
8.3 Απώλεια μάζας χαλύβδινων οπλισμών.....	82
9.1 Μέτρηση δυναμικού διάβρωσης	83
9.1.1 Αποτελέσματα δυναμικού διάβρωσης τυφλών δοκιμίων	83
<i>Διάγραμμα 1. Διάβρωση δοκίμου αναφοράς T1 σε συνάρτηση με το χρόνο</i>	<i>85</i>
<i>Διάγραμμα 3. Διάβρωση δοκίμου αναφοράς T4 σε συνάρτηση με το χρόνο</i>	<i>86</i>
<i>Διάγραμμα 5. Διάβρωση δοκίμου αναφοράς T6 σε συνάρτηση με το χρόνο</i>	<i>87</i>
Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Δυναμικού Δοκιμίων Αναφοράς ε συνάρτηση με το χρόνο	87
9.1.2 Αποτελέσματα μέτρησης δυναμικού δοκιμίων με αναστολέα διάβρωσης.....	88
9.1.3 Αποτελέσματα δυναμικού διάβρωσης δοκιμίων με αναστολέα διάβρωσης και επικάλυψη...	94
9.1.4 Νούμερο 1 μερικό συμπέρασμα	101
9.2 Αποτελέσματα γραμμικής πόλωσης Linear Polarization Technique, LPR	102
9.2.1 Αποτελέσματα γραμμικής πόλωσης τυφλών δοκιμίων	102
9.2.2 Αποτελέσματα γραμμικής πόλωσης δοκιμίων με αναστολέα διάβρωσης.....	103
9.2.3 Αποτελέσματα γραμμικής πόλωσης δοκιμίων με αναστολέα διάβρωσης και βαφή.....	108

9.2.4 Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας	111
9.2.5 Νούμερο 2 μερικό συμπέρασμα	115
9.3. Αποτελέσματα μέτρησης απώλειας μάζας	115
Πίνακας 9.3 Αρχικά βάρη οπλισμών, Τελικά Βάρη οπλισμών, Απώλεια μάζας και για τις τρεις κατηγορίες δοκιμίων.....	116
Διάγραμμα 34. Μ.Ο απώλειας μάζας σε σχέση με το χρόνο για τα δοκίμια αναφοράς για τους 6 και τους 11 μήνες ΠΙΝΑΚΑΣ 9.3.2	119
ΠΙΝΑΚΑΣ 9.3.4	121
10^ο Κεφάλαιο: Γενικά συμπεράσματα πειραματικού μέρους	124
Βιβλιογραφία	127

Εισαγωγή

Έχει διαπιστωθεί πως το στην Ελλάδα, αλλά και παγκόσμια, η χρήση του σκυροδέματος γίνεται σε μεγαλύτερο βαθμό εν συγκρίσει με τα υπόλοιπα δομικά υλικά. Αυτό συμβαίνει, κατά κύριο λόγο, λόγω συνδυασμού των ιδιοτήτων και του κόστους του, καθώς συμπεριφέρεται εξαιρετικά στο νερό, είναι πολύ ανθεκτικό ως προς τη διάρκεια στις περιβαλλοντικές συνθήκες, κοστίζει λίγο, και όσο παρασκευάζεται καταναλώνει λίγη ενέργεια. Καθώς, λοιπόν έχει μεγάλη ανθεκτικότητα, χρησιμοποιείται σχεδόν για το σύνολο των κατασκευαστικών έργων (Μπατής 1999).

Σήμερα, στη χώρα μας αλλά και σε όλον τον κόσμο, η παρασκευή Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος (Χ.Ο.Σ) γίνεται κυρίως από την τήξη παλαιού σιδήρου σε ηλεκτρική καμίνη. Γίνεται χρήση ως οπλισμό σκυροδέματος, καθώς και κάλυψη των αδυναμιών του σκυροδέματος (μικρή εφελκυστική ανθεκτικότητα). Λόγω των παρόμοιων συντελεστών θερμικής διαστολής, η συμπεριφορά του χάλυβα με το σκυρόδεμα είναι καλή. Όταν ενισχύεται το σκυρόδεμα με τον χάλυβα, γίνεται παραγωγή σύνθετων υλικών που αποκαλούνται *οπλισμένο σκυρόδεμα* ή *μπετόν αρμέ* (4).

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της κύριας πρώτης ύλης του μείγματος, δηλαδή του τσιμέντου, έχει πρωταρχικό ρόλο στον τρόπο που συμπεριφέρεται το σκυρόδεμα, δηλαδή στο κατά πόσο είναι ανθεκτικό και στις ιδιότητές του. έχει διαπιστωθεί πως υπάρχουν και άλλοι, εκτός του τσιμέντου, παράγοντες που συμβάλλουν στη διαφοροποίηση μεταξύ των σκυροδεμάτων (12).

Σε επίπεδο μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος, το τελευταίο αντέχει πολύ περισσότερο στην καταστροφή, αλλά δεν επιδεικνύει την ίδια συμπεριφορά στον εφελκυσμό. Σε αυτόν ακριβώς τον λόγο οφείλεται ο συνδυασμός του σκυροδέματος με τον χάλυβα, καθώς επέρχεται η θεραπεία αυτού ακριβώς του υλικού, κάτι που αποκαλείται *οπλισμένο σκυρόδεμα*. Προς ολοκλήρωση των απαιτητικών κατασκευών, δημιουργούνται διαρκώς νέοι τύποι ειδικών τσιμέντων, που είναι ενισχυμένοι στη σύσταση χάλυβα και φέρουν ειδικά πρόσθετα (12).

1^ο κεφάλαιο: Οπλισμένο σκυρόδεμα

1.1 Σκυρόδεμα

1.1.1 Υλικά - Παρασκευή

Όπως προαναφέρθηκε, η χρήση του σκυροδέματος, παγκοσμίως, γίνεται σε μεγαλύτερο βαθμό εν συγκρίσει με τα υπόλοιπα δομικά υλικά. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στις ιδιότητες και το κόστος του, και πιο αναλυτικά στους κάτωθι λόγους (6):

- Στην εξαιρετική συμπεριφορά του υλικού με το υδάτινο στοιχείο.
- Στην αντοχή του υλικού στο χρόνο, αλλά και στις περιβαλλοντικές και εξωτερικές συνθήκες,
- Δεν κοστίζει πολύ και η παρασκευή του δεν απαιτεί πολύ ενέργεια. Επίσης, η διαθεσιμότητα των συστατικών του είναι εύκολη και άμεση.

Η φύση του σκυροδέματος υπάγεται στα τεχνητά δομικά υλικά, που η κατασκευή τους γίνεται από τσιμέντο, αδρανή (άμμο και χαλίκι) και νερό. Γίνεται σκλήρυνση του φρέσκου μείγματος σκυροδέματος, με συνέπεια να παράγεται ένα ισχυρό, συμπαγές σώμα (12).

Λόγω των υψηλών αντοχών του, η χρήση του σκυροδέματος έχει διάφορες λειτουργίες στον κατασκευαστικό τομέα. Οι βαρυσήμαντες ιδιότητες αυτού του υλικού που κατοχυρώνουν την κατασκευή ενός δομικού έργου είναι ποικίλες, και έχουν άμεση σχέση με την κάθε κατασκευή που θα παραχθεί, το περιβάλλον που θα εκτεθεί, και την ιδιαίτερη χρήση της. Κατά συνέπεια, υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ των απαιτήσεων του σκυροδέματος, καθώς άλλες παρουσιάζει για την κατασκευή ενός φράγματος, άλλες για μια οικοδομή, και άλλες για την κατασκευή γεφυρών. Οι ποικίλες ιδιότητες που έχει το σκυρόδεμα εξαρτώνται από την ποιότητα των πρώτων υλών, από τον τρόπο με τον οποίο παρασκευάζονται, καθώς και από την αντοχή του που παρουσιάζει αξιοσημείωτη μεταβολή (4).

Η σύσταση του σκυροδέματος είναι ιδιαίτερα περίπλοκη και σύνθετη, με συνέπεια να μην έχουν γίνει απόλυτα κατανοητές οι σχέσεις δομής με τις ιδιότητές του. Ωστόσο, κρίνεται αναγκαίο να γίνουν κατανοητά τα βασικά στοιχεία της δομής του, για να αντιληφθούμε τους διάφορους παράγοντες από τους οποίους επηρεάζονται οι ιδιότητες του υλικού, όπως και τις αρνητικές συνέπειες που έχουν οι συνθήκες του περιβάλλοντος πάνω του. Έτσι, λοιπόν, κρίνεται ουσιώδες να γίνει μια σύντομη αναφορά επί των πρώτων υλών του σκυροδέματος, δηλαδή του τσιμέντου, των αδρανών, του νερού ανάμιξης, των βελτιωτικών πρόσμικτων και των πρόσθετων συστατικών (3).

1.1.1.1 Τσιμέντο

Τσιμέντο αποκαλούμε την υδραυλική κονία, που παράγεται κατά βάση από τις ενώσεις που κάνει το οξείδιο του ασβεστίου, το πυρίτιο, ο άργιλος με τον σίδηρο. Κατά τη διάρκεια ανάμειξης τους με νερό γίνονται σκληρά, αποκτώντας έτσι πιο πολλές ικανότητες και μεγαλύτερη αντοχή στον χρόνο. Σε επίπεδο αντοχής σε σύνθλιψη, που ορίζεται ίση τουλάχιστον με 250 k_p/cm² (DIN 1164), τσιμέντο αποκαλούμε κάθε υδραυλική κονία, η αντοχή της οποίας φτάνει τις είκοσι οχτώ μέρες από τη στιγμή ανάμειξης της με νερό (1).

Το τσιμέντο μπορεί να είναι φυσικό ή τεχνητό. Το φυσικό παράγεται από την όπτηση αργιλούχων ασβεστόλιθων που ενέχουν 20-25% κ.β. άργιλο. Στο παράγωγο της όπτησης γίνεται άλεση για να γίνει λεπτή σκόνη, με συνέπεια τη δημιουργία του φυσικού τσιμέντου. Λόγω της έλλειψης σταθερότητας στη σύσταση που έχουν τα πετρώματα που χρησιμοποιήθηκαν για να παρασκευαστεί το φυσικό τσιμέντο, οι ιδιότητες του είναι πιο χαμηλές εν συγκρίσει με αυτές που έχει το τεχνητό. Αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος που στην πραγματικότητα δεν γίνεται χρήση του φυσικού τσιμέντου. Ως εκ τούτου, σήμερα η αγορά μονοπωλείται από τα τεχνητά τσιμέντα (1).

Η ανακάλυψη του τσιμέντου Portland έγινε από τον Άγγλο L. Aspdin. Υπάρχει εξαιρετική ομοιότητα μεταξύ του χρωματισμού του τσιμέντου και του εδάφους της περιοχής Portland στην Αγγλία, απ' όπου πήρε και το όνομά του. Στη χώρα μας, η ετήσια παραγωγή του εν λόγω τσιμέντου φτάνει τα δεκαπέντε εκατομμύρια τόνους, οι μισοί εκ των οποίων είναι διαθέσιμοι για εξαγωγές.

Το συγκεκριμένο τσιμέντο παράγεται κατόπιν έψησης σε θερμοκρασία κλινκεροποίησης (1380-1420°C), ενός μίγματος που έχει πολύ καλά αλεστεί και πλήρως ομογενοποιηθεί, με σύσταση περίπου 75% ασβεστολιθικών υλικών και 25% αργυλοπυριτικών υλικών. Τα παράγωγα αυτής της διαδικασίας ονομάζονται κλίνκερ, και συναλέθεται με κατάλληλη ποσότητα γύψου (CaSO₄ 2H₂O) (1).

1.1.1.2 Αδρανή υλικά

Αδρανή αποκαλούνται τα υλικά αυτά που είναι ικανά να διατηρηθούν χημικά αδρανή, σε αντίθεση με το τσιμέντο και το νερό, ενόσω σκληραίνει το σκυρόδεμα. Ο τρόπος που συνδέονται και συγκολλούνται τα αδρανή υλικά έχει μηχανική συμβολή αποκλειστικά στο επίπεδο αντοχής που έχει το τελικό υλικό (12).

Τα αδρανή υλικά προέρχονται από κάποιο πέτρωμα ή τεχνητό υλικό, το οποίο τεμαχίστηκε φυσικά ή τεχνητά. Το εύρος της διαμέτρου που έχουν οι κόκκοι είναι μεγάλο, έχει άμεση σχέση με

την χρήση και κυμαίνεται κυρίως από 0-63.5 mm. Επίσης, μπορεί να διακριθεί βάσει της ποιότητάς τους σε (12):

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

Τα υλικά αυτά που συγκεντρώνουν τις βασικές ιδιότητες της μεγάλης αντοχής, της πρόσφυσης και της χημικής ανεκτικότητας χρησιμοποιούνται ως αδρανή υλικά. Η καταλληλότητα του πετρώματος κρίνεται στο κατά πόσο είναι πυριτικό και ασβεστολιθικό. Η προέλευση των αδρανών δύναται να γίνει απευθείας από τη φύση με μια σειρά από ρέματα λείας επιφάνειας και στρογγυλεμένων άκρων. Επιπροσθέτως, μπορεί να προέρχονται από πετρώματα που έχουν θρυμματιστεί, οι επιφάνειες των οποίων είναι τραχείς και έχουν γωνίες.

Τα πετρώματα τα οποία αξιοποιούνται προς δημιουργία των αδρανών είναι αναγκαίο να έχουν άριστα ποιοτικά χαρακτηριστικά, καθώς απ' αυτά εξαρτάται η τελική αντοχή του δομικού στοιχείου, τόσο στις στατικές καταπονήσεις όσο και στις αντιδράσεις που γίνονται λόγω των καιρικών συνθηκών και των ποικίλων χημικών ουσιών.

Σε γενικές γραμμές, το μητρικό πέτρωμα πρέπει να είναι υγιές, να μην έχει γαιώδεις προσμίξεις και να είναι συμπαγές. Οι ασβεστόλιθοι δεν πρέπει να περιέχουν άργιλο, ενώ το πορώδες των πετρωμάτων δεν πρέπει να είναι μεγάλο. Οι πιο σημαντικές ιδιότητες που διακρίνουν τα πετρώματα και χρησιμοποιούνται για παρασκευή αδρανών υλικών είναι ότι(6):

- Αντέχουν σε θλίψη και τριβή.
- Αντέχουν στο παγετό.
- Έχουν βλαβερές προσμίξεις.
- Συστέλλονται και διαστέλλονται.
- Παρουσιάζουν χημικές συμπεριφορές με άλλα συστατικά που έχει το σκυρόδεμα.

Πιο αναλυτικά, επί της επιφάνειας ή της μάζας των αδρανών υλικών δεν πρέπει να υπάρχουν ουσίες που μπορεί να εμποδίζουν τις προσφύσεις με το κονίαμα ή να προκαλούν χημικές επιδράσεις στο τσιμέντο ή στο χαλύβδινο σπλισμό. Οι κυριότερες από τις βλαβερές αυτές προσμίξεις είναι η *πυριτική παιπάλη*, οι *οργανικές προσμίξεις* και οι *θειούχες ενώσεις*. Κάποια ποσότητα πυριτίου στη μάζα των αδρανών κάνει αντίδραση με το αλκάλιο που βρίσκεται στο τσιμέντο (Na_2O και K_2O), με συνέπεια να προκαλείται φθορά και καταστροφή επί του σκυροδέματος (3).

Ακόμη, αξίζει να αναφερθεί πως η κοκκομετρική σύνθεση που έχουν τα αδρανή υλικά είναι ένας σημαντικός παράγοντας που ασκεί επιρροή στην αντοχή που έχει το σκυρόδεμα. Οι κόκκοι

των αδρανών στηρίζονται ο ένας πάνω στον άλλον, και λόγω του πολυγωνικού σχήματος υπάρχουν κενά ανάμεσά τους. Το γέμισμα αυτών των κενών μπορεί να γίνει από το κονίαμα, βάσει του οποίου γίνεται σύνδεση των κόκκων μεταξύ τους μέσω ενός συμπαγούς υλικού. Το κονίαμα είναι πορώδες σε μεγαλύτερο βαθμό, και κατά συνέπεια έχει λιγότερη αντοχή από το πέτρωμα που έχουν τα αδρανή. Συνεπώς, όσο πιο λίγα είναι τα παραπάνω κενά, τόσο μεγαλύτερη ανθεκτικότητα και πυκνότητα έχει το σκυρόδεμα. Σε αυτή την περίπτωση, το κλάσμα κόκκων των αδρανών υλικών με διάμετρο μικρότερη από 250 μm είναι 10-25% της συνολικής ποσότητας (3).

1.1.1.3 Νερό πρόσμιξης

Ένα εκ των δυο ενεργών συστατικών του σκυροδέματος είναι το νερό. Σε συνδυασμό με το τσιμέντο συμμετέχει σε ένα εύρος χημικών αντιδράσεων, οι οποίες καταλήγουν δημιουργώντας ενυδρους κρυστάλλους, στην πήξη και την σκλήρυνση του μίγματος. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη σύσταση του νερού, καθώς δεν πρέπει να έχει βλαβερά συστατικά ή τέτοια που να ασκούν επιρροή επί των αντιδράσεων ενυδάτωσης. Επί παραδείγματι, δεν μπορεί να γίνει χρήση νερού που έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε άλατα και χαμηλό pH, καθώς με αυτόν τον τρόπο υπάρχουν χλωριόντα που διευκολύνουν τη διάβρωση του οπλισμού. Για να παρασκευαστεί το σκυρόδεμα θα πρέπει τα συστατικά του να χαρακτηρίζονται από (4):

- Περιεκτικότητα σε άλατα < 3,5%, θειικά < 0,5% και νάτριο < 3%.
- pH >4.
- Απουσία λιπών και ελαίων
- Χαμηλά ποσοστά περιεκτικότητας σε διαλυμένες και αιωρούμενες οργανικές ουσίες.

1.1.1.4 Βελτιωτικά - Πρόσμικτα.

Βελτιωτικά ή χημικά πρόσμικτα είναι τα υλικά που μπορούν να προστεθούν σε μικρή ποσότητα, ανάλογα με τη μάζα που έχει το τσιμέντο, κατά τη διάρκεια ανάμιξης του σκυροδέματος, με σκοπό την τροποποίηση των ιδιοτήτων του νωπού και δευτερευόντως του σκληρυμένου σκυροδέματος.

1.2 Χάλυβας οπλισμένου σκυροδέματος

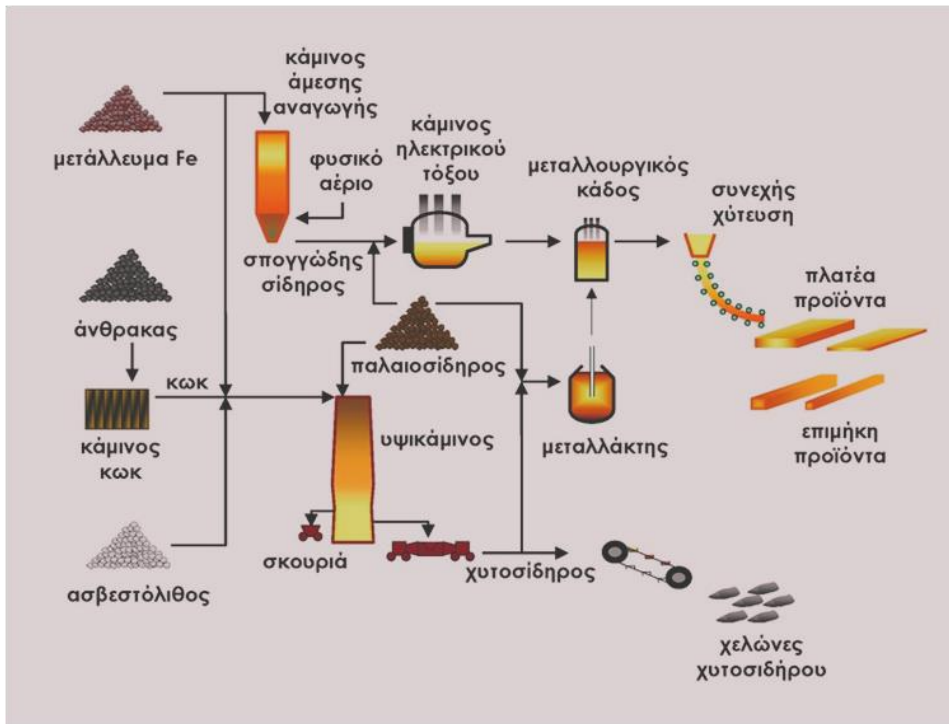
1.2.1 Παραγωγή χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος.

Με τον όρο καθαρός σίδηρος εννοούμε, κατά κύριο λόγο, το κράμα εκείνο που αποτελείται μεταξύ άλλων από άνθρακα και άλλα κραματικά στοιχεία, σε ποσοστό κάτω του 0.05%. Αντιθέτως, ο Χάλυβας Οπλισμού Σκυροδέματος είναι το κράμα σιδήρου – άνθρακα (Fe-C), που ενέχει άνθρακα σε ποσοστό 2% καθώς γίνεται προσθήκη άλλων στοιχείων.

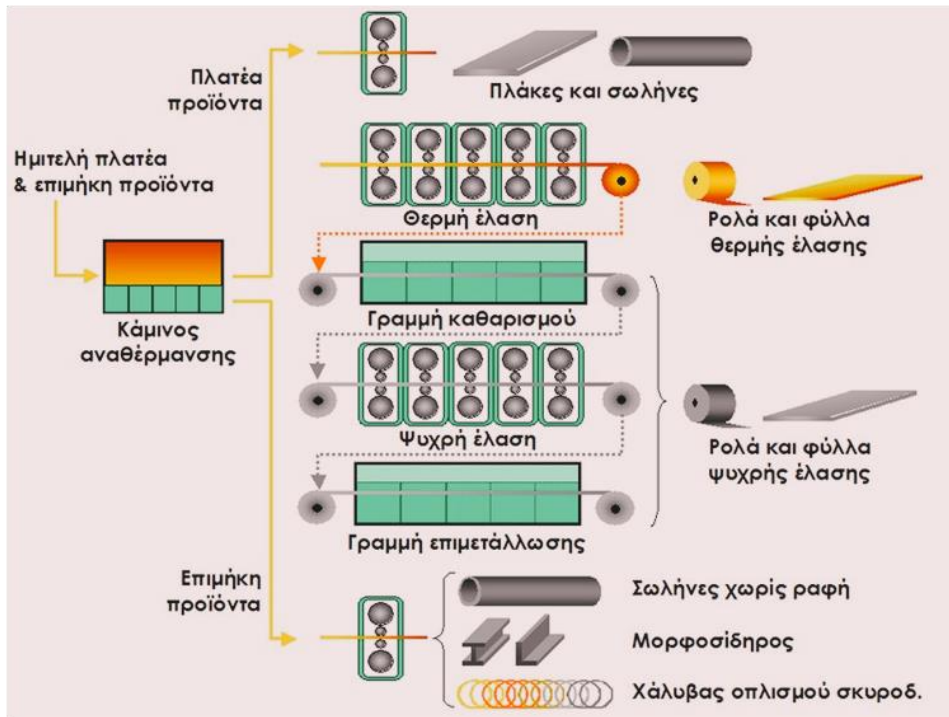
Η κύρια προέλευση των χαλύβων οπλισμένου σκυροδέματος που βγαίνουν σε παραγωγή στις μέρες μας, στην Ελλάδα αλλά και σε όλο τον κόσμο, είναι κατά το πλείστον η διαδικασία τήξης παλαιοσιδήρου (scrap) εντός ηλεκτρικών καμίνων (Electric Arc Furnace – EAF). Προς περαιτέρω επεξεργασία της χύτευσης και της θερμικής κατεργασίας, συμπεριλαμβάνοντας τη δευτερογενή μεταλλουργία, γίνεται ανάλογη επιλογή προς εξασφάλιση των επιθυμητών χαρακτηριστικών στα τελικά προϊόντα (6).

Για να παραχθούν οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος, πρέπει να περάσουν από τα ακόλουθα τρία στάδια, που περιγράφονται συνοπτικώς (3);

- i Χαλυβοποίηση: Πρόκειται για την αναγκαία διαδικασία που γίνεται προς παραγωγή κράματος σιδήρου με περιεκτικότητα σε άνθρακα λιγότερη από 2%.
- ii Συνεχής χύτευση: Γίνεται χύτευση του τήγματος χάλυβα και στερεοποίηση σε ορισμένη μορφή που, την οποία λαμβάνει το ημιτελικό προϊόν (Σχήμα 1.1).
- iii Θερμή έλαση: Γίνεται αναθέρμανση του ημιτελικού προϊόντος σε κατάλληλη θερμοκρασία, με συνέπεια να χαρακτηρίζεται ως ελάσιμο, υποβιβάζοντας συνεχώς τη διατομή του. Έτσι, γίνεται η παραγωγή του τελικού προϊόντος σε κατάλληλη διάσταση και μορφή (Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.1 Σχηματική παρουσίαση της παραγωγής χυτοσιδήρου και ημιτελών προϊόντων χάλυβα (3).



Σχήμα 1.2 Σχηματική παρουσίαση της παραγωγής τελικών προϊόντων χάλυβα (3).

1.2.2 Ποιότητες του χάλυβα

Ο χάλυβας ως υλικό μπορεί να διακριθεί σε πλήθος κατηγοριών, αναλόγως της χημικής του σύστασης, της περαιτέρω κατεργασίας του, της κρυσταλλικής του δομής και της τελικής του χρήσης.

Σε επίπεδο χημικής σύστασης, η ταξινόμηση του χάλυβα γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο (14):

- **Κοινός ή ανθρακούχος χάλυβας (carbon steels):** Η περιεκτικότητά του σε άνθρακα αγγίζει μέχρι το 2.06% , σε μαγγάνιο μέχρι 1.65%, σε πυρίτιο μέχρι το 0.6% και σε χαλκό μέχρι το 0.6%. Γίνεται πολύ χρήση του και εύκολη συγκόλλησή του. βάσει της ποσότητας άνθρακα που περιέχει, η υποκατηγοριοποίηση του χάλυβα είναι η εξής:
- χάλυβας χαμηλού άνθρακα ή μαλακός χάλυβας (*mild steels* $C < 0,30\%$)
- χάλυβας μετρίου άνθρακα (*medium carbon steels* $0,30\% < C < 0,60\%$)
- χάλυβας υψηλού άνθρακα (*high carbon steels* $0,60\% < C < 1,00\%$)
- χάλυβας πολύ υψηλού άνθρακα (*ultra-high carbon steels* $1,00\% < C < 2,00\%$)
- **Κραματωμένος χάλυβας (alloy steels):** Πρόκειται για κράμα σιδήρου και άλλων μετάλλων σε μεγάλη περιεκτικότητα. Ακολουθούν κάποια παραδείγματα:
- Χάλυβας που έχει ελαφρώς κρατωθεί ή έχει υποστεί χαμηλή κραμάτωση, και περιλαμβάνει τις περισσότερες φορές σε ποσοστό που δεν ξεπερνά το 10% κ.β στοιχεία χρωμίου, μολυβδαινίου, βαναδίου, νικελίου κ.α.
- Χάλυβας που έχει κραματωθεί πολύ χάλυβας που έχει υποστεί υψηλή κραμάτωση, όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας, ο ταχυχάλυβας κ.α.

Αξίζει να σημειωθεί ότι συχνά ο καθορισμός του χάλυβα γίνεται βάσει της χημικής σύστασης, του βαθμού που επηρεάζεται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος (διάβρωση).

Αναλόγως της κατεργασίας τους, η διάκριση του χάλυβα γίνεται σε (χάλυβας 0Βικιπαίδεια):

- Χάλυβας διαμόρφωσης που επεξεργάζεται περαιτέρω μηχανικά (έλαση, διέλαση κ.α.).
- Χυτοχάλυβας, η παραγωγή του οποίου γίνεται άμεσα μέσα από χύτευση, σε μορφή πλινθώματος, και ακολούθως γίνεται επαναχύτευση προς κατασκευή διαφόρων εξαρτημάτων.

Ακόμη, λόγω της κύριας κρυσταλλικής φύσης τους, πολλές φορές γίνεται λόγος για φερριτικό, περλιτικό, μαρτενσιτικό, μπαινιτικό χάλυβα .

Τα είδη του χάλυβα ονοματοποιούνται βάσει διαφόρων συστημάτων τυποποίησης, όπως DIN, ASTM, ΕΛΟΤ κ.λπ. Συχνά, υπάρχει αντιστοιχία του ονόματος που φέρει μια κατηγορία χάλυβα, βάσει της αντοχής που έχει η συγκεκριμένη κατηγορία χάλυβα σε εφελκυσμό. Επί παραδείγματι,

στο πρότυπο ΕΛΟΤ 142 -13, κρίνεται αναγκαίο το όριο διαρροής του χάλυβα B500C να είναι πιο μεγάλο από 500 MPa (500 N/mm).

1.3 Οπλισμένο σκυρόδεμα

1.3.1 Ιδιότητες σκυροδέματος

Ορίζοντας το οπλισμένο σκυρόδεμα λη μπετόν αρμέ, γίνεται σαφές πως πρόκειται για ένα σύνθετο υλικό που δημιουργείται ενισχύοντας το σκυρόδεμα με κάποιο άλλο υλικό, πιο ανθεκτικό, που αποκαλείται οπλισμός. Το πιο συνηθισμένο υλικό προς χρήση είναι ο χάλυβας, που έχει μορφοποιηθεί σε ράβδους ή ίνες, και σπανίως σε ίνες γυαλιού, πολυμερή υλικά κ.α. Απώτερος σκοπός είναι ο συνδυασμός των ιδιοτήτων των προαναφερθέντων υλικών του σκυροδέματος και του χάλυβα σε ένα τελικό προϊόν, που θα αρμόζει στο σύνολο των αναγκών κατασκευής κάθε έργου (14).

Όπως προαναφέρθηκε, το σκυρόδεμα όντας ένα κράμα από αδρανή υλικά (χαλίκι), τσιμέντο και νερό, μετατρέπεται σε στερεό σώμα κατόπιν χημικών αντιδράσεων. Κατά συνέπεια, έχει πολλά πλεονεκτήματα στο κατασκευαστικό κομμάτι. Επί παραδείγματι, σχηματοποιείται εύκολα αν τοποθετηθεί σε κάποιο καλούπι, έχει μεγάλη αντοχή στη θλίψη, στον χρόνο και σε περίπτωση πυρκαγιάς, και παράλληλα δεν κοστίζει πολύ. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η μικρή σχετικά κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για να παραχθεί, κάτι που συνεπάγεται μικρότερη επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Το βασικότερο όμως μειονέκτημά του είναι η υψηλή αντοχή του στον εφελκυσμό (14).

1.3.2 Ιδιότητες οπλισμού

Το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί με την ιδιότητα του οπλισμού πρέπει να παρέχει κάλυψη του μειονεκτήματος που φέρει το σκυρόδεμα, με άλλα λόγια να χαρακτηρίζεται για την μέγιστη δυνατή αντοχή του στον εφελκυσμό. Επιπλέον, για να μπορεί να συνεργαστεί με το σκυρόδεμα, κατά την θερμοκρασιακή μεταβολή, θα πρέπει να έχει παρόμοιο συντελεστή θερμικής διαστολής.

Οι δυο προαναφερθείσες ιδιότητες αποτελούν χαρακτηριστικά του χάλυβα. Ο χάλυβας, βασικά, υστερεί ως προς την ευαισθησία του στις διαβρώσεις και τις πυρκαγιές, κάτι που είναι υπό διερεύνηση στην συγκεκριμένη εργασία. Συνέπεια της οξείδωσης είναι η σκουριά. Ωστόσο, το σκυρόδεμα προβαίνει στον σχηματισμό αλκαλικών περιβαλλόντων, που δεν αφήνουν την οξείδωση του χάλυβα, και σε περίπτωση που έχει αρκετό πάχος, μπορεί να προφυλαχθεί από πυρκαγιά και εν γένει υψηλές θερμοκρασίες. Ως εκ τούτου, παρατηρείται αλληλοκάλυψη των δυο

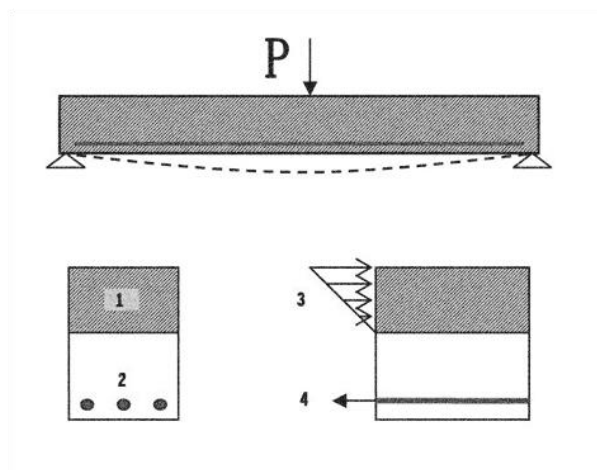
υλικών, όσον αφορά τις αδυναμίες τους. Βέβαια, πρέπει να σημειωθεί ότι ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες μπορεί να επιφέρουν υπονόμηση της προστατευτικής δράσης του σκυροδέματος, με συνέπειες που θα σχολιαστούν πιο κάτω (14).

1.3.3 Σύντομη αναφορά στη λειτουργία του οπλισμένου σκυροδέματος

Τοποθέτηση οπλισμού επί του σκυροδέματος, είτε με ράβδους σε καθορισμένες θέσεις που τις υπαγορεύει η στατικότητα της κατασκευής, είτε με ίνες που ανακατεύονται στο μείγμα του (ινοπλισμένο σκυρόδεμα). Κατά βάση, η τοποθέτηση των ράβδων γίνεται σε θέσεις όπου παρουσιάζεται κάποια εφελκυστική τάση ή που δεν έχει επαρκή αντοχή το σκυρόδεμα. Λόγω του αυξημένου κόστους του σκυροδέματος αυτής της διαδικασίας, γίνεται χρήση όπου είναι αναγκαίο (5).

Επί παραδείγματι, στο Σχήμα 1.3 παρατηρούμε μια δοκό, η στήριξη της οποίας γίνεται στα άκρα της, και φέρει στο μέσο της ένα συγκεντρωμένο φορτίο. Βάσει της θεωρίας της κάμψης, επέρχεται καμπύλωση της δοκού από το φορτίο (διακεκομμένη γραμμή). Το φορτίο προκαλεί συμπίεση του πάνω μέρους της δοκού (γραμμοσκιασμένη περιοχή 1 στην τομή), εν αντιθέσει με το κάτω μέρος που παρουσιάζεται εφελκυστική τάση, τείνοντας προς το άνοιγμά του. Στην περίπτωση έλλειψης οπλισμού, θα επερχόταν ρωγμή στο κάτω μέρος της δοκού, λόγω του ότι το σκυρόδεμα δεν αντέχει πολύ στον εφελκυσμό. Κάτι τέτοιο θα είχε ως συνέπεια να σπάσει η δοκός. Προς αντοχή της δοκού στις εφελκυστικές τάσεις, γίνεται τοποθέτηση μιας σειράς από ράβδους χάλυβα, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.3 με κόκκινο χρώμα. (5).

Πρόκειται για μια εκ των κύριων λειτουργιών του κάτω οπλισμού, που είναι ο πιο βασικός για αυτή τη διαδικασία. Πολλές φορές στην δοκό γίνεται τοποθέτηση και άλλου οπλισμού για αντισεισμικούς λόγους, και παράλληλα υπάρχει περιορισμός των ρωγμών και πιο μεγάλη αντοχή σε κάθετες δυνάμεις (5).



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) (5).

1.3.4 Συνάφεια οπλισμένου σκυροδέματος

Ουσιαστική προϋπόθεση προς δημιουργία ενός λειτουργικά οπλισμένου σκυροδέματος είναι ο χάλυβας να είναι συναφής με το σκυρόδεμα. Συναφές υλικό χαρακτηρίζεται το σύνθετο υλικό που έχει ενιαία συμπεριφορά και αντοχή σε καταπονήσεις θλιπτικής, εφελκυστικής και διατμηματικής φύσεως.

Πάντα υπάρχει συσχέτιση της ιδιότητας της συνάφειας του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος με το σκυρόδεμα που γίνεται η ανάμειξη.

Στην περίπτωση ενσωμάτωσης μιας σειράς ράβδων οπλισμού στο σκυρόδεμα με επακόλουθη ανάληψη φορτίων, τότε παρατηρείται σταδιακή ανάπτυξη συνάφειας με το σκυρόδεμα. Η τάση συνάφειας εξαρτάται από πέντε βασικές παράμετροι, που είναι (5):

- i Το επιβαλλόμενο φορτίο.
- ii Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος.
- iii Οι μηχανικές ιδιότητες που έχουν οι ράβδοι οπλισμού.
- iv Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που έχει η επιφάνεια των ράβδων οπλισμού.
- v Η κατάσταση της επιφάνειας που έχουν οι ράβδοι οπλισμού.

Η αντοχή συνάφειας εξαρτάται από το κατά πόσο αναπτύσσονται αντιστάσεις τριβής, πρόσφυσης, αλλά και αυτών που έχουν άμεση σχέση με τη διάρθρωση των ραβδώσεων που έχει η ράβδος. Έτσι, λοιπόν, έχει γίνει καθορισμός ειδικών απαιτήσεων για α γεωμετρικά χαρακτηριστικά που έχουν οι ραβδώσεις στις επιφάνειες των Χ.Ο.Σ. (5).

Κρίνεται απαραίτητο και η λήψη μέτρων για την απουσία γράσου, λίπους, αλλά και για να μην δημιουργηθεί μεγάλη διάβρωση στην επιφάνεια οπλισμού, προτού γίνει ανάμειξη με το σκυρόδεμα. Λόγος ύπαρξης εκ των υστέρων διάβρωσης (αποσάρθρωση επικάλυψης, οξείδωση οπλισμού κ.λπ.) μπορεί να είναι η ύπαρξη καθορισμένων περιβαλλοντικών συνθηκών, που φέρουν απομείωση της συνάφειας σκυροδέματος και οπλισμού, με αποτέλεσμα την μείωση αντοχής του σύνθετου στοιχείου (απ' την ολίσθηση της ράβδου δεν είναι επιτρεπτό να αναπτυχθούν μηχανισμοί που περιγράφηκαν πιο πάνω) (5).

2^ο Κεφάλαιο: Ενανθράκωση Σκυροδέματος

2.1 Μηχανισμός Ενανθράκωσης και δράση των χλωριόντων

2.1.1 Ενανθράκωση

Ένα εκ των βασικών χαρακτηριστικών που έχει το οπλισμένο σκυρόδεμα, αναφορικά με την ανθεκτικότητα, είναι η διάβρωση των οπλισμών. Αυτό γίνεται καθώς στην χώρα μας, εν αντιθέσει με άλλες χώρες, η σταδιακή αποσύνθεση του σκυροδέματος γίνεται σπανίως, καθώς γίνονται εναλλαγές τήξεως – πήξεως στο νερό των πόρων, ή επειδή η αλκαλικότητα του τσιμεντοπολτού που έχει σκληρύνει προσβάλλει τα αδρανή. Η προστασία από τη διάβρωση των ράβδων οπλισμού γίνεται από ένα πολύ λεπτό επιφανειακό στρώμα ένυδρου οξειδίου του σιδήρου, που παράγεται από την υψηλή αλκαλικότητα του σκυροδέματος που περιβάλλει τις ράβδους (10).

Η τιμή pH της αλκαλικότητας αυτής είναι κάπου στο 12.5, και αντιστοιχεί με τη θερμοκρασία συγκέντρωσης ισορροπίας που έχει το υδροξείδιο του ασβεστίου Ca(OH)_2 στο νερό των πόρων. Βέβαια, σε περίπτωση πτώσης της τιμής του pH κάτω από το 9.0, επέρχεται αποπαθητικοποίηση του χάλυβα των οπλισμών, με συνέπεια τη διάβρωση του οπλισμού. Στην εν λόγω συνθήκη καταλήγουμε μέσα από δυο αλληλένδετες διαδικασίες, την ενανθράκωση και την επίδραση χλωριόντων (10).

Η μείωση του pH κάτω από το 9.0 γίνεται επειδή αντιδρά το Ca(OH)_2 του νερού των πόρων με το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) που υπάρχει στην ατμόσφαιρα, του οποίου η σταδιακή διασπορά γίνεται στο εσωτερικό του σκυροδέματος μέσα από τους πόρους που είναι σε αέρια μορφή. Η συγκεκριμένη διαδικασία που καταλήγει στην μετατροπή του Ca(OH)_2 σε ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) ονομάζεται ενανθράκωση σκυροδέματος (11).

Η συνύπαρξη του Ca(OH)_2 με άλλα υδροξείδια (σε πιο μικρές ποσότητες) δύναται να προσφέρει στους οπλισμούς την εξασφάλιση ενός προστατευτικού, ιδιαίτερα αλκαλικού περιβάλλοντος (pH~12.5). Όπως έχει προαναφερθεί, σε αυτό το περιβάλλον την εγγύηση της προστασίας του χάλυβα από το ενδεχόμενο να διαβρωθεί φέρει ένα λεπτό στρώμα οξειδίων και υπεροξειδίων. Η διάβρωση δεν αποκλείεται λόγω αυτού του στρώματος, αλλά είναι εφικτός ο περιορισμός του ρυθμού της εξέλιξής της. Ωστόσο, η μετατροπή του Ca(OH)_2 σε ασβεστόλιθο, με επήρεια από το ανθρακικό οξύ, που παράγεται ενώνοντας το CaO με H_2O , έχει ως συνέπεια να μειωθεί σταδιακά η αλκαλικότητα στο περιβάλλον του οπλισμού, ακόμη και σε επίπεδα όπου παρατηρείται αναίρεση της παθητικής προστασίας του επικαλπτικού στρώματος. Η τιμή του pH

που συνεπάγεται αυτή την μεταβολή είναι κάπου στο 9.0, ενώ για ένα πλήρες ενανθρακωμένο σκυρόδεμα είναι κάπου στο 8.0 (11).

Η ενανθράκωση δεν είναι πρόβλημα για το σκυρόδεμα. Αντιθέτως, η μετατροπή του υδροξειδίου του ασβεστίου σε ασβεστόλιθο δίνει ένα πυκνότερο υλικό (χαμηλό πορώδες), με μεγαλύτερη αντοχή στη θλίψη. Το πρόβλημα έγκειται με το αν παρέχεται προστασία του οπλισμού, καθώς πρόκειται για κρίσιμο σημείο σε περίπτωση διάβρωσης. Ως εκ τούτου, κατατάσσεται στις χημικές διεργασίες φθοράς και απαξίωσης του οπλισμού σκυροδέματος, εν συγκρίσει με άλλες κατηγορίες, όπως οι μηχανικές, οι βιολογικές, οι φυσικές. Σημειώνεται, ότι όπου υπάρχει πιθανότητα να υπάρχουν χλωριούχες ενώσεις, το να συνδυάζεται η ενανθράκωση με τα χλωριόντα μπορεί να έχει μεγάλες επιπτώσεις.

Με τον όρο ενανθράκωση νοείται η διαδικασία εκείνη που αναδεικνύει πιο πολύ από οποιαδήποτε άλλη το ότι το οπλισμένο σκυρόδεμα υπόκειται σε φθορές και γερνάει. Είναι γεγονός, πως οι δαπάνες που γίνονται προς δομική αντικατάσταση μεγάλων έργων, όπως γέφυρες, είναι τεράστιες. Μελλοντικά, θα υπάρξει ακόμα μεγαλύτερη εκτόξευση των ποσών. Η μείωση αυτής της τάσης να επέλθει από τη στιγμή που η λήψη μέτρων θα αρχίσει να αποδίδει καρπούς, όσον αφορά την προστασία κατασκευών με χρήση οπλισμένου σκυροδέματος (11).

2.1.1.1 Παράμετροι που επηρεάζουν την ενανθράκωση

- **Περιβαλλοντικές συνθήκες:** Παρατηρείται η μέγιστη ενανθράκωση για υγρασία 50% έως 70%.
- **Ποιότητα και πάχος επικάλυψης**
 - Χαμηλή διαπερατότητα: Μείωση και αναστολή της διείσδυσης του CO₂.
 - Ύπαρξη ρωγμών: Επιτάχυνση της διαδικασίας ενανθράκωσης.
 - Μικρές τιμές N/T (Νερό/ Τσιμέντο): Αυξημένος περιορισμός της διείσδυσης υγρασίας και του CO₂.
- **Είδος τσιμέντου**
 - Σύμφωνα με τον U. Ludwig (1890), τα τσιμέντα εκείνα που εμπεριέχουν σκωρίες υψικαμίνων και ποζολάνες ενανθρακώνονται πιο γρήγορα από το Portland.
 - Σύμφωνα με τον Matthews (1984), λόγω του ότι προστίθενται ιπτάμενα τέφρα στο τσιμέντο γίνεται επιτάχυνση της ενανθράκωσης σκυροδεμάτων, με αντοχή μικρότερη από 30 έως 35 MPa.

- Σύμφωνα με τους A. Zhu (1982), και X. Tan (1982), στη περίπτωση προσθήκης λιγνοσουλφόνης στο σκυρόδεμα σε ποσότητα 0,25% κ.β., επέρχεται μείωση της ταχύτητας ενανθράκωσης κατά 10% έως 30%.
- Επειδή προστίθεται πυριτική παιπάλη, επέρχεται επιτάχυνση της ενανθράκωσης (11).

2.1.2 Η δράση και οι πηγές των χλωριόντων

Η διατήρηση του προστατευτικού στρώματος οξειδίου μπορεί να γίνει σε καθορισμένα σημεία από ιόντα χλωρίου, Cl^- , ενώ η συγκέντρωσή του μπορεί να είναι από 0.4% έως 0.6% του βάρους που έχει το τσιμέντο. Τα χλωριόντα μπορεί να προέρχονται είτε από το εσωτερικό είτε από το έξω περιβάλλον του σκυροδέματος (Σπανός κ.α., 2001).

Το προστατευτικό στρώμα διατηρείται όταν τα χλωριόντα προέρχονται από το εσωτερικό του σκυροδέματος, στην περίπτωση, βέβαια, χρήσης για το σκυρόδεμα συλλεκτών αδρανών από παραλίες ή θαλασσινό νερό (πρακτική που ακολουθείται στα νησιά), ή από κάποιο πρόσθετο βελτιωτικό του σκυροδέματος το οποίο εμπεριέχει χλωριούχο αλάτι (9).

Ο εντοπισμός χλωριόντων απ' το εξωτερικό περιβάλλον είναι εύκολος σε παραθαλάσσια μέρη, όπου ακόμα κι αν είμαστε αρκετά απομακρυσμένοι από τη θάλασσα, στον ατμοσφαιρικό αέρα υπάρχουν χλωριούχα άλατα, κατά κύριο λόγο αν επικρατούν άνεμοι που κατευθύνονται από τη θάλασσα προς την ξηρά. Σε μέρη όπου πέφτει συχνά χιόνι, οι κύριες πηγές χλωριόντων είναι τα χλωριούχα άλατα, η διάχυση των οποίων γίνεται στους δρόμους για τη διαδικασία τήξης του χιονιού (Εικόνα 2.1). επίσης, τα χλωριόντα μπορεί να προέρχονται από την ύπαρξη κάποιου επιταχυντικού πήξεως, η χρήση του οποίου γίνεται τους χειμερινούς μήνες, καθώς η διαδικασία πήξης για το σκυρόδεμα δεν είναι γρήγορη ή δεν γίνεται καν (9).



Εικόνα 2.1 Γέφυρα πεζών στο δεύτερο όροφο νοσοκομείου, πριν και μετά από τη διάβρωσή της, λόγω χλωριόντων από εκχιονιστικά άλατα (9).

Οι διαδικασίες της ενανθράκωσης και της διείδυσης των χλωριόντων αλληλοεξαρτώνται, αφού η ενανθράκωση προκαλεί σημαντική επιτάχυνση της δράσης των χλωριόντων. Έτσι, μπορεί να επέλθει αντίδραση του Ca(OH)_2 του τσιμέντου με τα χλωριόντα, και να επέλθει δέσμευση αυτών. Ακόμη, επέρχεται περιορισμός της ποσότητας όσων ενσωματώνονται στον οπλισμό (από 0.4%-0.6%), μια αναγκαία διαδικασία για να διατηρηθεί το προστατευτικό οξειδίου. Αντιδρώντας όμως το Ca(OH)_2 κατά την ενανθράκωση, επέρχεται απελευθέρωση των δεσμευμένων χλωριόντων, με συνέπεια την προσβολή του χάλυβα (9).

2.1.2.1 Παράμετροι που επηρεάζουν τη διάβρωση του χάλυβα από χλωριόντα

- **Ποιότητα και πάχος της επικάλυψης:** Η μικρή ποσότητα νερού/τσιμέντου οδηγεί στην εξασφάλιση πυκνού σκυροδέματος σε μικρή διαπερατότητα.
- **Περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο-πρόσθετα:** Κρίνεται αναγκαίο, η περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε C_3A κ.β. τσιμέντου να είναι μεγαλύτερη του 8%, προκειμένου να επέρχεται δέσμευση των χλωριόντων. Για να δεσμευτούν τα χλωριόντα και για να μπορέσει το σκυρόδεμα να φέρει εις πέρας αυτή τη διαδικασία, σημαντικό ρόλο έχουν οι προσμίξεις του σκυροδέματος.
- **Είδος και συγκέντρωση των χλωριόντων:** Το CaCl_2 οδηγεί σε μεγαλύτερο αριθμό διαβρώσεων στον χάλυβα, εν συγκρίσει από το NaCl . Με την αύξηση της συγκέντρωσης των χλωριόντων μεγαλώνουν και οι πιθανότητες να διαβρωθεί ο χάλυβας, μέχρι ενός σημείου. Βέβαια, αν μειωθεί η διάβρωση του χάλυβα, αυξάνονται περισσότερο τα χλωριόντα.
- **Περιβάλλον:** Η διείδυση των χλωριόντων είναι ευκολότερη σε ξηρό περιβάλλον ή όταν υπάρχει αυξημένη υγρασία. Επιπλέον, γίνεται διείδυση των χλωριόντων σε υγρό περιβάλλον, κάτι που είναι σύνηθες και από τις πιο σοβαρές μορφές διείδυσης (Τάσιος & Αλιγιζάκη 1993).

2.2 Η σημασία του νερού στους πόρους

2.3 Έλεγχος και διαδικασίες επισκευής ενανθράκωσης

Προκειμένου να αρχίσει και να επεκτείνεται η διάβρωση, κρίνεται απαραίτητο το μερικό γέμισμα με νερό, και όχι το ολοκληρωτικό, των πόρων του σκυροδέματος, ώστε να παρέχεται

συνεχώς αέρας και να γίνεται διάχυση του οξυγόνου στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Έτσι, λοιπόν, τα μέρη του σκυροδέματος που βρίσκονται συνέχεια εντός του υδάτινου στοιχείου ή βρέχονται ακατάπαυστα δεν διαβρώνονται (10).

Κρίνεται ουσιώδης η ύπαρξη νερού εντός των πόρων, τόσο στο στάδιο προπαρασκευής της διάβρωσης, όπου γίνεται η μεταφορά των χλωριούδων από το εξωτερικό περιβάλλον στις ράβδους, όσο και κατά τη διαδικασία αντίδρασης του CO₂ με το Ca(OH)₂, η διάλυση του οποίου γίνεται κατά την ενανθράκωση. Η μεταφορά των χλωριόντων είναι ταχύτερη με το γέμισμα των πόρων με νερό, όταν δηλαδή το περιβάλλον έχει σχεδόν 100% υγρασία, ή άμα υπάρχει σχετική βύθιση του δομικού στοιχείου στο νερό, με συνέπεια να παρατηρείται σχεδόν πάντα γέμισμα των πόρων στο υπόλοιπο, εξαιτίας της τριχοειδούς ανύψωσης. Απ την άλλη πλευρά, η διαδικασία της ενανθράκωσης προϋποθέτει να υπάρχουν μερικώς γεμάτοι πόροι, ούτως ώστε να διεισδύει το CO₂ στο εσωτερικό. Κατά συνέπεια, ο ρυθμός με τον οποίο γίνεται η ενανθράκωση είναι ο μέγιστος δυνατός για σχετική υγρασία κάπου στο 50% (10).

Καθώς το σκυρόδεμα είναι ένα κλασικό πορώδες υλικό, γίνεται δυσκολότερα η αποβολή νερού από αυτό που απαιτείται προς απορρόφηση. Κατά συνέπεια, στην περίπτωση αυξομείωσης της σχετικής υγρασίας που έχει το περιβάλλον ή περιοδικής βροχής, η μέση ποσότητα του νερού των πόρων του είναι μεγαλύτερη από την μέση υγρασία του περιβάλλοντος. Η παραπάνω ποσότητα νερού επιφέρει επιβάρυνση της ενανθράκωσης, κι έτσι στην περίπτωση εξωτερικών συνθηκών γίνεται μικρότερη ενανθράκωση του σκυροδέματος εν συγκρίσει με την ενανθράκωση που γίνεται υπό συνθήκες εσωτερικού χώρου (10).

Στην χώρα μας, η ξηρασία δεν λειτουργεί βοηθητικά στη διάβρωση του οπλισμού. Το αποτέλεσμα που παρατηρείται τις περισσότερες φορές είναι να εναλλάσσεται η διαβροχή με τη ξήρανση (υψηλή – χαμηλή σχετική υγρασία) (13).

Ο έλεγχος του σκυροδέματος γίνεται ψεκάζοντας φαινολοφθαλεΐνη σε φρεσκοθραυσμένες επιφάνειες. Από τον χρωματισμό της επιφάνειας γίνεται αντιληπτή η κατάσταση του σκυροδέματος (Εικόνα 2.2). στην ουσία, γίνεται προσπάθεια ελέγχου το pH που έχει το σκυρόδεμα. Σημειώνεται πως το pH ενός υγιούς σκυροδέματος είναι 12.5, όταν αρχίζει η ενανθράκωση είναι 9 και στην περίπτωση πλήρους ενανθράκωσης είναι 8.

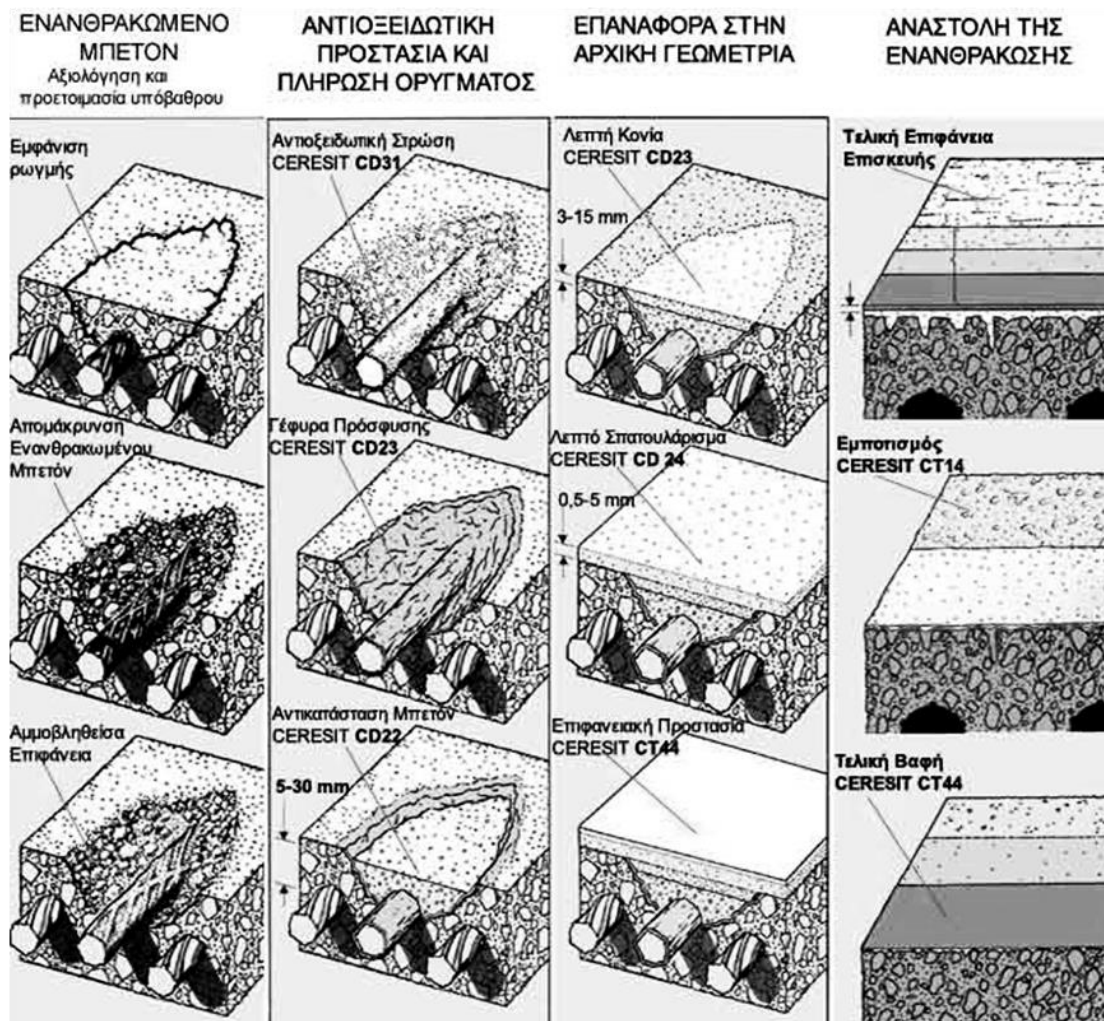
Κατόπιν εκτιμήσεως της κατάστασης που βρίσκεται το σκυρόδεμα, ακολουθούνται οι διαδικασίες προς επισκευή και αποκατάσταση (Εικόνα 2.3).

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

Όπου υπάρχει κάποια ένδειξη για ενανθράκωση, μπορεί να απομακρυνθεί μηχανικά το μη λειτουργικό μπετόν (Εικόνα 2.4). Επιπλέον, απαιτείται η λήψη δειγμάτων μπετόν για να γίνει ο προσδιορισμός του βάθους της ζώνης της ενανθράκωσης. Στη διαδικασία αυτή λειτουργεί εποικοδομητικά η χρήση διαλύματος φαινολοφθαλεΐνης. Μετά τον προσδιορισμό του βάθους ενανθράκωσης, γίνεται έλεγχος μήπως η επικάλυψη του οπλισμού το ξεπερνά.



Εικόνα 2.2 Δοκίμιο σκυροδέματος το οποίο έχει ψεκασθεί με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης. Το τμήμα στο οποίο δεν παρατηρούμε αλλαγή χρώματος (δεξιά) είναι ενανθρακωμένο. Το αριστερό τμήμα (χρώματος ροζ-βυσσινί) δεν έχει ενανθρακωθεί. (13).



Εικόνα 2.3 Διαδικασία αναστολής ενανθράκωσης σε ήδη ενανθρακωμένο δοκίμιο από Μπετόν (13).



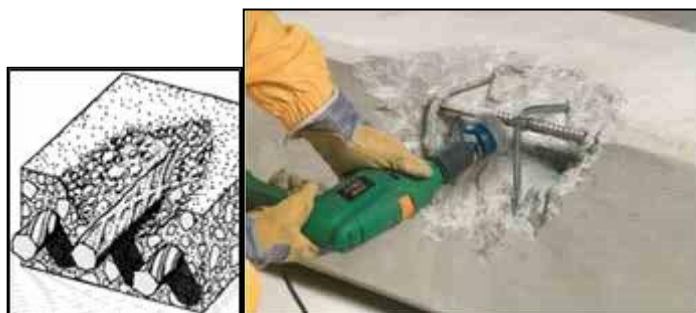
Εικόνα 2.4 Εμφάνιση ρωγμής – Απομάκρυνση ενανθρακωμένου μπετόν (13).

Ο έλεγχος του οπλισμού γίνεται μέσα από μαγνητόμετρα, ή από σημειακές αποκαλύψεις. Μετά την ολοκλήρωση της εξέτασης του μπετόν, μπορεί να γίνει αφαίρεση των επισφαλών τμημάτων του. Στην περιοχή γύρω απ' τον οπλισμό, γίνεται χειρονακτική αφαίρεση με χρήση καλεμιού. Απώτερος σκοπός είναι να αποκαλυφθεί περιμετρικά ο οπλισμός, ούτως ώστε να

απομακρυνθεί πλήρως η ενανθρακωμένη ζώνη. Το εξοργυμένο περίγραμμα του τμήματος δεν πρέπει να σβήνει στο μηδέν, τουναντίον θα πρέπει να συμβάλλει στη δημιουργία ενός «σκαλοπατιού» και συνθηκών πυρακτώσεως για τα μετέπειτα υλικά σφράγισης (13).

II. Επιμελής αφαίρεση της σκουριάς από την επιφάνεια του οπλισμού

Εν αρχή, κρίνεται απαραίτητο, ο επιμελής καθαρισμός του οπλισμού που εξέχει, αξιοποιώντας κατάλληλες μεθόδους, όπως η αμμοβολή, η συρματοβούρτσα κ.λπ. (Εικόνα 2.5). Μέσω επιμελούς καθαρισμού εξασφαλίζεται η μόνιμη αποκατάσταση του οπλισμού. Πρέπει πάντα να γίνεται καθαρισμός του οπλισμού, βάσει του κανονισμού DIN 55 928, ούτως ώστε ο βαθμός καθαρότητας που έχει η επιφάνεια οπλισμού να είναι Sa 2 ½. Συστήνεται η απομάκρυνση της σκουριάς σε περίπτωση ξηρού καιρού, και η υγρασία του μπετόν να μην υπερβαίνει το 4%. Η θερμοκρασία της επιφάνειας κρίνεται απαραίτητο να είναι κάτω των 30°C πάνω απ' το σημείο συμύκνωσης των υδρατμών. Η ολοκλήρωση των προετοιμασιών γίνεται με το καθάρισμα όλης της ευρύτερης περιοχής, με χρήση σκούπας, βούρτσας, απορρόφησης ή φυσήματος με πεπιεσμένο αέρα άνευ ελαίων λίπανσης (13).

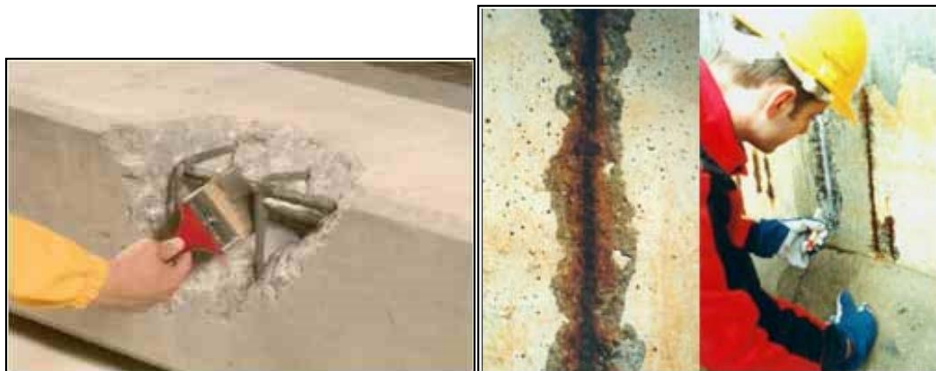


Εικόνα 2.5 Αμμοβληθείσα επιφάνεια – Αφαίρεση σκουριάς. (13).

III. Εφαρμογή εποξειδικής αντιοξειδωτικής στρώσης για την προστασία του οπλισμού

Μετά το πέρας δυο με τριών ωρών από την απομάκρυνση της σκουριάς και της σκόνης, επαλείφεται για πρώτη φορά όλη η επιφάνεια του οπλισμού με ειδικό εποξειδικό αντιδιαβρωτικό υλικό (Εικόνα 2.6). Αν έχει γίνει περιμετρική αποκάλυψη του οπλισμού, ενδείκνυται να επαλειφθεί μόνο το μέταλλο. Το αντιδιαβρωτικό μπορεί να διεισδύσει ηλεκτροχημικά στο μπετόν επί του καλυμμένου και οξειδωμένου οπλισμού στο πίσω μέρος, επιφέροντας αδρανοποίηση. Εν συνεχεία, επαλείφεται για δεύτερη φορά το σημείο όπου περάστηκε το πρώτο χέρι, λόγω αρχής πήξης, μετά

το πέρας δηλαδή δύο ωρών, που δεν έχει χαθεί τελείως το χαρακτηριστικό της κολλητικότητας. Μετά το πέρας είκοσι λεπτών από τη δεύτερη επάλειψη, γίνεται επίταση ή συμπιέζεται άμμος. Η καταλληλότερη άμμος είναι η χαλαζιακή 0.2-0.7 mm, καθώς είναι τελείως ξηρή.



Εικόνα 2.6 Αντιοξειδωτική στρώση (13).

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

Κατόπιν σκλήρυνσης της αντιοξειδωτικής στρώσης, γίνεται διαβροχή της επιφάνειας, προκειμένου να έχει λιγότερη απορροφητικότητα και η εμφάνισή της να είναι υγρή ματ. Ακολούθως, επαλείφεται ένα υλικό, που έχει τη λειτουργία γέφυρας πρόσφυσης ανάμεσα στο παλιό και το νέο υλικό. Η επάλειψη γίνεται με πινέλο ή βούρτσα (10).

V. Πλήρωση του κενού με χονδρόκοκκο κονίαμα

Σε περίπτωση μεγάλου πάχους, (5-30 mm), αντικαθίσταται το αφαιρεμένο μπετόν με χονδρόκοκκο υλικό επισκευής, το οποίο τοποθετείται απευθείας κατευθείαν πάνω στη νωπή γέφυρα πρόσφυσης (Εικόνα 2.7). Με τη χρήση του χονδρόκοκκου υλικού, είναι σχεδόν ακριβώς στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Σε περιπτώσεις οπτικής καθαρότητας του σκυροδέματος, μπορεί να επιτευχθεί η κατάλληλη επιφάνεια, με το άπλωμα μιας στρώσης από λεπτόκοκκο υλικό (γέφυρα πρόσφυσης) (13).



Εικόνα 2.7 Πλήρωση κενού (Φαρδής,2005).

VI. Δημιουργία φράγματος ενανθράκωσης με την επάλειψη ειδικών υλικών

Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών αποκατάστασης, και αφού σκληρύνουν ολοκληρωτικά τα κονιάματα επισκευής, δύναται η επάλειψη των φραγμάτων ενανθράκωσης που αδρανοποιούν τη διεργασία στο στάδιο όπου έχει περιέλθει κατόπιν της διαδικασίας επισκευής. Σημειώνεται πως η πρώτη στρώση γίνεται με χρήση υλικού προεπάλειψης, δηλαδή γίνεται χρήση μιας στρώσης με βούρτσα ακρυλικής ρητίνης (13).

Ακολούθως, γίνεται ένα χέρι με χρήση ειδικού χρώματος, που συνήθως καταλήγει σε ένα δραστικό φράγμα CO_2, SO_2 , χλωριδίων και νερού, άνευ επιρροής στη διαπνοή. Γίνεται αραιώση τέτοιων υλικών με νερό, ανάλογα με τις προδιαγραφές που έχει η εταιρεία παρασκευής. Η επάλειψη γίνεται εύκολα, με χρήση βούρτσας, πιστολιού, ρολού ή πιστολιού airless.

Έτσι, δύναται η αναχαίτιση μελλοντικών ενανθρακώσεων. Μάλιστα, ο συνδυασμός συγκεκριμένων υλικών μπορεί να συνεπάγεται μέχρι και την υπέρβαση των προδιαγραφών του DIN άνω του 400%. (13).

Αξίζει να σημειωθεί, ότι η χρήση ειδικών χρωμάτων, όπως τα προαναφερθέντα υλικά, δεν χαρακτηρίζονται μονάχα για τις θεραπευτικές ικανότητες, μετά από σχετική βέβαια αποκατάσταση, αλλά και για το ότι λειτουργούν προληπτικά, με αποτέλεσμα να μην χρειαστεί μελλοντικά να γίνουν αυτές οι τόσο εκτεταμένες και συχνά πολυδάπανες εφαρμογές. Μέσα από την πρόληψη εξασφαλίζεται ότι το βάθος της ζώνης ενανθράκωσης είναι μηδαμινό ή δεν έχει υπερβεί το πάχος επικάλυψης του οπλισμού.

Άπαξ και επικαλυφθεί η επιφάνεια με τα υλικά αυτά, γίνεται ανακοπή του φαινομένου στο σημείο που εκείνη τη στιγμή βρίσκεται. Μάλιστα, υπάρχει πλήρης ομοιοτυπία της εφαρμογής με αυτή της αποκατάστασης (13).

3^ο κεφάλαιο: Διάβρωση από την υγρασία

3.1 Σημασία και οικονομικές επιπτώσεις διάβρωσης

3.2 Παράμετροι και παράγοντες που επιδρούν στην διάβρωση

Με τον όρο διάβρωση από υγρασία γίνεται αναφορά σε ένα σύνολο φυσικοχημικών δράσεων, που λαμβάνουν χώρα στα συστατικά μιας κατασκευής, και επιφέρουν μείωση της αντοχής και της λειτουργικότητάς τους, καθώς και αλλαγή επί της αισθητικής τους εμφάνισης. Ως εκ τούτου, ο κάθε πολιτικός μηχανικός πρέπει να δίνει ιδιαίτερη προσοχή. Όταν γίνεται αναφορά σε διάβρωση των στοιχείων μιας κατασκευής, στην ουσία γίνεται αναφορά στη διάβρωση που έχει ο ίδιος ο οπλισμός. Στην περίπτωση διάβρωσης του σιδήρου του οπλισμού, μπορεί να τεθούν υπό απειλή τόσο η ασφάλεια όσο και η καταλληλότητα που χαρακτηρίζει τις κατασκευές. Κάτι τέτοιο βέβαια είναι ένα σημαντικό πρόβλημα, παγκοσμίως, καθώς βάσει πρόσφατων μελετών, οι ετήσιες δαπάνες για αυτή τη διαδικασία στην Αμερική αγγίζουν τα 200 με 500 εκ. δολάρια, ούτως ώστε να ελεγχθούν, να καταγραφούν, αλλά και να επισκευαστούν οι διάφορες διαβρώσεις. Όσον αφορά την Αυστραλία, βάσει πρόσφατης εκτίμηση για την επισκευή της διάβρωσης του σιδήρου οπλισμού, οι δαπάνες ανέρχονται στο 3-% του ΑΕΠ (2).

Η διάβρωση του χάλυβα στο οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένα παγκόσμιου βεληνεκούς θέμα, που είναι δυνατό να οδηγήσει σε καταστροφή, η οποία μπορεί να είναι μια απλή παραμόρφωση και να φτάνει μέχρι την καθολική δομική καταστροφή. Παρά την ιδιαίτερη σοβαρότητα του φαινομένου, ουδείς μπήκε σε ιδιαίτερο προβληματισμό πριν τη διεξαγωγή του πρώτου συνεδρίου γι' αυτό το ζήτημα, το 1978, στο οποίο υπήρξε μεγάλος αριθμός συμμετεχόντων. Μάλιστα, υιοθετήθηκε από το Ινστιτούτο Πολιτικών Μηχανικών (Institute of Civil Engineers), την Ομοσπονδία Τσιμέντου (Concrete Society), καθώς και τη Συνομοσπονδία Μηχανικών Διάβρωσης (NACE) (2).

Από πρακτικής απόψεως, δυστυχώς, δεν είναι εφικτή η παραγωγή σκυροδέματος που να είναι σε θέση να προκαλέσει ολοκληρωτική αποτροπή της διάβρωσης οπλισμού. Αυτό συμβαίνει είτε λόγω των ειδικών κατασκευαστικών αναγκών, που προκαλούν διακλαδώσεις, είτε λόγω αποκλίσεων των προδιαγραφών παρασκευής, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται διάλυτοι διεϊσδυσης οξυγόνου και υγρασίας, που οδηγούν στον σχηματισμό προϋποθέσεων διάβρωσης του χάλυβα. Ακολούθως, η διάβρωση μπορεί να καταλήξει ακόμη και στην αποκάλυψη του χάλυβα, στη μείωση της μάζας του, καθώς και της αντοχής που διακρίνει το σύνθετο σύστημα σκυροδέματος, δηλαδή το σίδηρο του οπλισμού (2).

Σε επίπεδο κατασκευών, δίνεται μεγαλύτερη προσοχή στην αντοχή και όχι στο πόσο διαρκεί το έργο. Έτσι, γίνεται σαφές πως όταν κατασκευάζεται ένα έργο με χρήση οπλισμένου σκυροδέματος, καλώς εχόντων των πραγμάτων δεν θα είναι απαραίτητο ο έλεγχος και η επισκευή. Ωστόσο, αν δεν ληφθεί υπόψη η πιθανότητα να γίνουν έλεγχοι ή επισκευές σε ένα έργο, ενόσω σχεδιάζεται, τότε η εξέλιξη των πραγμάτων μπορεί να δυσκολέψει και να προκληθούν μεγάλες δαπάνες. Σε πλήθος περιπτώσεων διάβρωσης οπλισμού, λόγω έλλειψης προσβασιμότητας, επήλθε κατεδάφιση ενός ολόκληρου κτιρίου, λόγω υψηλού κόστους και δυσκολιών στο να απομακρυνθούν τα απομακρυσμένα διαβρωμένα στοιχεία (10).

Η διάβρωση γίνεται κατά κύριο λόγο επειδή εισέρχεται το νερό στο σκυρόδεμα. Το νερό μπορεί, βασικά, να προέλθει από τις εξής πηγές (11):

- i. Υγρασία λόγω φυσικών φαινομένων (βροχή, χαλάζι, χιόνι).
- ii. Υγρασία του εδάφους.
- iii. Υπέργεια νερά (νερά που ρέουν και λιμνάζουν).
- iv. Υπόγεια νερά
- v. Υγρασία στους εσωτερικούς χώρους (υδρατμοί που συμπυκνώνονται, αέρας και νερά στις σωληνώσεις).

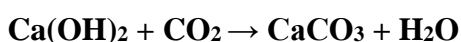
Η είσοδος νερού στο σκυρόδεμα γίνεται λόγω ρωγμών στην επιφάνεια του σκυροδέματος, ή επειδή αυξάνονται οι πόροι (Εικόνα 3.1). μπορεί να επέλθει αύξηση του πορώδους στο σκυρόδεμα λόγω γήρανσης, και κατά κύριο λόγο επειδή τα συστατικά του σκυροδέματος δεν έχουν καλή ποιότητα, και δεν συντηρούνται κατάλληλα. Ως εκ τούτου, καθώς κινείται το νερό στους πόρους που έχει το σκυρόδεμα, σχηματίζονται κυψέλες κατακράτησης.



Εικόνα 3.1 Νερό στους πόρους του σκυροδέματος (10).

Επειδή το σκυρόδεμα παρουσιάζει μεγάλη αλκαλικότητα, οδηγούμαστε στον σχηματισμό ενός πολύ λεπτού στρώματος ένυδρου οξειδίου στο σίδηρο που έχουν οι επιφάνειες των ράβδων οπλισμού. Το συγκεκριμένο φαινόμενο αποκαλείται παθητικοποίηση του χάλυβα. Στην ουσία, με αυτό τον τρόπο υπάρχει προστασία από τις διαβρώσεις και διατηρείται ανέπαφος για πολύ καιρό από οποιαδήποτε εξωτερική προσβολή. Η αλκαλικότητα του σκυροδέματος προκαλείται λόγω της συγκέντρωσης ισορροπίας του Ca(OH)_2 στο νερό των πόρων, με το pH να κυμαίνεται μεταξύ του 12.5 και 13.2. Το αλκαλικό προϊόν που δημιουργείται ενυδατώνοντας το τσιμέντο, υπό την προϋπόθεση ύπαρξης οξυγόνου και υγρασίας, οδηγεί στο Ca(OH)_2 . Οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να επέλθει η αποπαθητικοποίηση του χάλυβα, που σημαίνει την καταστροφή του λεπτού προστατευτικού στρώματος ένυδρου οξειδίου του σιδήρου, είναι οι ακόλουθοι (4):

- Τοπικά από ιόντα χλωρίου. Όπως έχει προαναφερθεί, τα ιόντα χλωρίου προέρχονται κατά κύριο λόγο από αδρανή υλικά, η συγκέντρωση των οποίων γίνεται μέσω παραλιών και νερού θαλάσσης, από πρόσμικτο βελτιωτικό του μπετόν, μέσω του ατμοσφαιρικού αέρα (κατά βάση των παράκτιων περιοχών), και από το χλωριούχο αλάτι.
- Από την ενανθράκωση του σκυροδέματος. Η ενανθράκωση του σκυροδέματος προκαλείται από τις χημικές αντιδράσεις που κάνει το διοξείδιο του άνθρακα, που είναι στην ατμόσφαιρα, με το υδροξείδιο του ασβεστίου, που υπάρχει στο σκυρόδεμα. Έτσι, λοιπόν:



Οι δυο τρόποι που οδηγούν στην αποπαθητικοποίηση του άνθρακα αλληλοεξαρτώνται, αφού η διαδικασία της ενανθράκωσης προξενεί ραγδαία επιτάχυνση στο να διεισδύσουν τα χλωριόντα στο σκυρόδεμα.

3.3 Μορφές διάβρωσης

Γενική ή ομοιόμορφη διάβρωση.

Η ομοιόμορφη σχεδόν κάλυψη όλης της επιφάνειας του μετάλλου γίνεται μέσω του προϊόντος της διάβρωσης. Άπαξ και επέλθει καταστροφή του προστατευτικού στρώματος, αρχίζει η διάβρωση, κάτι που συμβαίνει με τη διάχυση της αλκαλικότητας του σκυροδέματος σε ευρύ φάσμα. Το pH μπορεί να μειωθεί σε μεγάλη περιοχή καθώς (4):

- Το μαλακό νερό επιδρά, προκαλώντας απόπλυση του υδροξειδίου του ασβεστίου Ca(OH)_2 που υπάρχει στο σκυρόδεμα.
- Γίνεται ενανθράκωση του σκυροδέματος.
- Πιθανότατα επιδρούν τα θειικά ή ανθρακικά άλατα.

Τοπική διάβρωση.

I. Διάβρωση κατά βελονισμό.

Αποκλειστικός λόγος πρόκλησης του συγκεκριμένου είδους διάβρωσης είναι το γεγονός ότι τα χλωριόντα που βρίσκονται εξαρχής στο σκυρόδεμα ασκούν κάποια επίδραση, ή εξαιτίας της μετέπειτα διάχυσης που συμβαίνει λόγω των εξωτερικών συνθηκών του περιβάλλοντος, το πλήρες ή μερικό γέμισμα των πόρων με νερό αποτελεί τον λόγο που τα χλωριόντα διεισδύουν στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Μεγάλη επικινδυνότητα χαρακτηρίζει την εναλλασσόμενη διαβροχή, καθώς και το ενδεχόμενο να ξεραθεί η επιφάνεια του μπετόν από νερό, στο οποίο υπάρχει μεγάλη ποσότητα από άλατα. Γίνεται δέσμευση ενός ποσού χλωριόντων από το τσιμέντο του σκυροδέματος, ενώ τα υπόλοιπα είναι ελεύθερα προκαλώντας το φαινόμενο της διάβρωσης (3).

Τα χλωριόντα δύναται να φτάσουν το 0.4-0.6% του συνολικού βάρους που έχει το τσιμέντο. Έτσι, γίνεται ο σχηματισμός του άλατος Friedell [$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$], το οποίο δεν βλάπτει τον οπλισμό. Συνεπώς, τα θειικά άλατα που υπάρχουν και η ενανθράκωση του σκυροδέματος διασπών τα άλας Friedell, κι έτσι γίνεται απελευθέρωση των χλωριόντων. Έτσι, λοιπόν, κατόπιν της διαδικασίας της ενανθράκωσης, είναι πιο εύκολο να διαβρωθεί το σίδηρο του οπλισμού σκυροδέματος, ακόμη και στην περίπτωση που τα χλωριόντα δεν είναι τόσο πολλά (3).

II. Μικρορρηγματώδης διάβρωση.

Ο συγκεκριμένος τύπος διαβρώσεων βρίσκεται σε αντιστοιχία με τη διάβρωση κατά βελονισμό. Το σημείο που διαφοροποιούνται είναι ότι το εν λόγω είδος δεν παρουσιάζεται σε «καθαρή» επιφάνεια, αλλά στην επιφάνεια μικρών ρωγμών και μικρών κοιλοτήτων που έχει ο χάλυβας.

III. Διάβρωση μεταξύ των κόκκων.

Η εν λόγω διάβρωση παρουσιάζεται στα μεταλλικά, κατά κύριο λόγο σε κράματα, και αν υπάρχει διαφορά δυναμικού. Αυτή η διάβρωση επιτυγχάνεται από μια μικρή ποσότητα άνθρακα (πιο μικρή από 0.05%) (3).

Διάβρωση λόγω ανάπτυξης εξωτερικής διαφοράς δυναμικού. I.

Γαλβανική δράση.

Στην περίπτωση επαφής ενός μετάλλου με κάποιο διαφορετικό, γίνεται ανάπτυξη ηλεκτροχημικών δράσεων, που αποκαλούνται γαλβανικές. Κάθε μέταλλο χαρακτηρίζεται από διαφορετικό κανονικό δυναμικό. Στην περίπτωση επαφής δυο μετάλλων με μικρή ποσότητα υγρασίας, παρατηρείται η δημιουργία μικρών ηλεκτροστοιχείων διαβρώσεων. Αν παρατηρηθεί υπέρβαση των 50 mV της διαφοράς δυναμικού, τότε η ύπαρξη πιθανοτήτων διαβρώσεων είναι μεγαλύτερη. Επίσης, στην περίπτωση ύπαρξης χλωριόντων ή θεικών αλάτων, υπάρχει μεγαλύτερο ενδεχόμενο να υπάρξουν διαβρώσεις (3).

II. Ηλεκτρολυτική διάβρωση.

Καθώς το ρεύμα στις κατασκευές εφαρμόζεται άμεσα μέσω των εξωτερικών πηγών, προξενείται ηλεκτρολυτική διάβρωση, η οποία δύναται να περιοριστεί με τους ακόλουθους τρόπους:

- i. Συστήνεται η χρήση πολύ καλής ποιότητας σκυροδέματος, που δεν περιέχει χλωριόντα.
- ii. Κρίνεται ουσιώδης η ύπαρξη ηλεκτρικής μόνωσης ανάμεσα στις κατασκευές και τις εξωτερικές πηγές ρεύματος (π.χ. διάφραγμα πολυαιθυλενίου) (3).

III. Διάβρωση από τριβή.

Ονομάζεται η προσβολή που μπορεί να επέλθει μεταξύ δυο επιφανειών, από τη στιγμή που σε κατάσταση φόρτισης γίνονται ελαφριές σχετικά ολισθήσεις, κατά κύριο λόγο παλμικού τύπου, η μιας προς την άλλη.

IV. Διάβρωση από κόπωση.

Προξενείται λόγω των συνδυασμένων δράσεων των κυκλικών τάσεων, καθώς και εξαιτίας των διαβρωτικών προσβολών, τουτέστιν λόγω ταχέων εναλλασσόμενων θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων. Αυτός ο τύπος διαβρώσεων μπορεί να συμβεί και λόγω χαμηλών τάσεων, που είναι πιο μικρές από το όριο κόπωσης (3).

Διάβρωση υπό μηχανική τάση.

Η εμφάνιση των συγκεκριμένων διαβρώσεων γίνεται σε χάλυβα που παρουσιάζει υψηλή αντοχή, σε τάση που υπερβαίνει τα $0.8f_{py}$. Η διάβρωση που γίνεται σε συνθήκες μηχανικών τάσεων χαρακτηρίζεται για την πολυπλοκότητά της. Μάλιστα, δεν έχει γίνει πλήρης αποσαφήνιση, καθώς στις κατασκευές δεν φαίνεται σκουριά ούτε υπάρχουν απώλειες διατομής. Σχηματίζεται επειδή υπάρχει διαβρωτικό περιβάλλον, και παρατηρείται ανάπτυξη πρόσθετης διαφοράς δυναμικού. Οι διαβρώσεις στους χάλυβες υπό μηχανικές τάσεις μπορούν να συνοδευτούν από ψαθυροποίησή του λόγω έκλυσης υδρογόνου. Ο χάλυβας που μπορεί να ξεπεράσει την απειλή των διαβρώσεων, που δημιουργούνται από τα χλωριόντα είναι εκείνος που έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε νικέλιο (10).

Σπηλαιώδης διάβρωση.

Οι συγκεκριμένες διαβρώσεις γίνονται επειδή σχηματίζονται φυσαλίδες ατμού, νλεσα σε ένα ρευστό που βρίσκεται σε ταχεία κίνηση. Πλησίον του οπλισμού παρατηρείται σπάσιμο των φυσαλίδων, με αποτέλεσμα να προκαλείται ένα κύμα συγκρούσεων.

Άλλες μορφές διάβρωσης.

- i. Θερμογαλβανική διάβρωση.
- ii. Διάβρωση από ρεύματα διαφυγής.
- iii. Ρευστομηχανική διάβρωση.
- iv. Περικρυσταλλική διάβρωση.

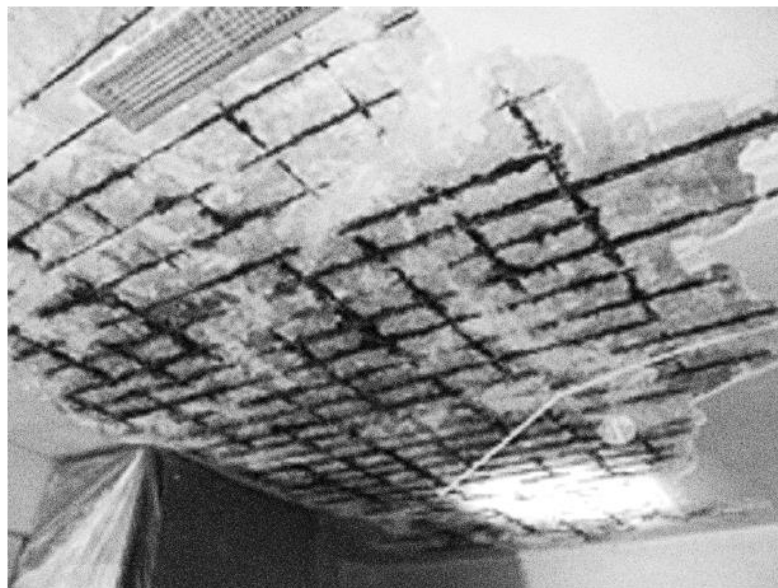
Συνήθως, οι πολιτικοί μηχανικοί έρχονται αντιμέτωποι με την ομοιόμορφη διάβρωση και την τοπική. Ο εντοπισμός των συγκεκριμένων διαβρώσεων είναι εύκολος, καθώς μπορούν να παρατηρηθούν εύκολα. Η βασική διαφορά τους έγκειται στην εμφάνιση της ομοιόμορφης διάβρωσης που γίνεται κατά μήκος της ράβδου οπλισμού, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2 Ομοιόμορφη διάβρωση (10).

Ο εντοπισμός της ομοιόμορφης διάβρωσης γίνεται στην περίπτωση βαθιάς ενανθράκωσης του σκυροδέματος, εκεί όπου έχει τοποθετηθεί η χαλύβδινη ράβδος και υπάρχει υγρασία σε μικρή ποσότητα. Έτσι, υπάρχει φθορά της επιφάνειας των δομικών στοιχείων, εμφανιζόμενη μέσω μιας λεπτής σχισμής (ρηγμάτωση) παράλληλης στον οπλισμό (Εικόνα 3.2).

Απ' την άλλη, η εμφάνιση των τοπικών διαβρώσεων γίνεται σε καθορισμένες θέσεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3, όπου η πλάκα διαβρώνεται λόγω συσσώρευσης υγρασίας ακριβώς πάνω από τη συγκεκριμένη θέση.



Εικόνα 3.3 Τοπική διάβρωση (10).

Αποτέλεσμα των τοπικών διαβρώσεων είναι η μείωση της διατομής στα σημεία που έχουν διαβρωθεί, ενώ η επιφάνεια της υπόλοιπης ράβδου μπορεί να παραμείνει ανέπαφη. Όπως προαναφέρθηκε, στην περίπτωση συσσώρευσης υγρασίας και αύξησης της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου, δημιουργείται επί των κατασκευών τέτοιας μορφής διάβρωση. Συνέπεια αυτού είναι η μείωση της διατομής των ράβδων και η ικανότητα τους στην αντοχή φορτίου. Σε κάποιες περιπτώσεις, λόγω των τοπικών διαβρώσεων προκαλείται ευθραυστότητα στις ράβδους, με αποτέλεσμα την απουσία ορατής προειδοποίησης για την ελάχιστη αντοχή της κατασκευής. Σε άλλες πάλι περιπτώσεις, το πρόβλημα είναι εμφανές, καθώς παρουσιάζεται κάποια ρηγμάτωση επί της επιφάνειας του σκυροδέματος. (10).

3.4 Ατμοσφαιρική διάβρωση

3.4.1 Διάβρωση γάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος

Η ατμοσφαιρική διάβρωση εμφανίζεται καθώς η ατμόσφαιρα επιδρά στην κατασκευή, κάτι που έχει μελετηθεί επιμελώς, αφού το περιβάλλον επιδρά στα κτίρια, τις γέφυρες, τους πυλώνες κ.α. Η ατμοσφαιρική διάβρωση θεωρείται ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο, η εμφάνιση του οποίου γίνεται ως ένα γαλβανικό στοιχείο. Οι επιφανειακοί ηλεκτρολύτες που παρουσιάζονται επιτρέπουν στην αντίδραση να προχωρήσει. Η ατμοσφαιρική διάβρωση επιταχύνεται καθώς (4):

- Υπάρχουν υγροσκοπικά άλατα
- Υπάρχει σχετική υγρασία
- Λόγω του pH
- Λόγω των ατμοσφαιρικών ρύπων
- Υπάρχει ομίχλη σε ρυπογόνο περιβάλλον

Στις περιοχές που παρατηρείται σωρεία ρύπων, έχει παρατηρηθεί πως το pH είναι κοντά στο 3. Επιπλέον, στις επιφάνειες που γίνεται απόθεση εν ξηρώ, μεταξύ των περιόδων βροχής μπορεί να γίνει συγκέντρωση όξινων διαβρωτικών ρυπαντών. Ακόμη, έχει παρατηρηθεί συγκέντρωση χλωριόντων $0.35\text{g Cl}^- / \text{l}$ και $0.20\text{g SO}_4^{2-} / \text{l}$. Πρόκειται για ποσότητες που είναι εκατό φορές πιο μεγάλες των κανονικών, που συνηθίζεται να εντοπίζουμε στο βρόχινο νερό. Το προαναφερθέν φαινόμενο δημιουργεί φθορές στις στέγες που έχουν γαλβανιστεί, εντός διαστήματος τριών χρόνων. Η δροσιά αφήνει στις επιφάνειες περίπου 10 g/m^2 νερό, ενώ η βροχή περίπου 100 g/m^2 . Την ίδια στιγμή μάλιστα οι ρύποι ξεπλένονται. Για το λόγο αυτό, το χρονικό διάστημα που μια επιφάνεια μένει υγρή σε σχέση με την διάρκεια που απαιτείται για να παραμείνει στεγνή έχει επίδραση στο φαινόμενο.

Το να υπολογιστεί πειραματικά το χρονικό διάστημα που μια επιφάνεια είναι υγρή έχει αρκετές δυσκολίες, καθώς παρατηρείται αναίρεση του αποτελέσματος λόγω μετεωρολογικών μετρήσεων.

Η δράση που έχει ένας ρυπαντής σε κάποιο σημείο, καθώς και οι αρνητικές συνέπειες της δράσης του είναι σε άμεση εξάρτηση με (4):

- ο Τη φύση του δέκτη της ρύπανσης
- ο Το κλίμα που επικρατεί
- ο Το πόσο απέχει το σημείο από το μέρος που εκπέμπονται οι ρύποι

Οι πορείες των ατμοσφαιρικών όξινων ρυπαντών προτού επιδράσουν στο περιβάλλον είναι (4):

- i. Εκπομπή – Διασπορά – Ξηρή απόθεση.
- ii. Εκπομπή – Χημικός μετασχηματισμός / διασπορά – Ξηρή απόθεση.
- iii. Εκπομπή – Χημικός μετασχηματισμός / διασπορά – Υγρή κατακρήμνιση

Η ξηρή απόθεση είναι πιο βαρυσήμαντη πλησίον της πηγής που εκπέμπονται οι ρυπαντές, και έχει εμβέλεια μέχρι και 300χλμ. Αντιθέτως, η υγρή κατακρήμνιση, με τη μορφή της όξινης βροχής, έχει πιο μεγάλη σημασία σε πιο μακρινές αποστάσεις. Σε κάποιο περιοχή, που δεν εκπέμπονται πολλοί ρυπαντές και παρουσιάζονται συχνές βροχοπτώσεις, η υγρή κατακρήμνιση αποτελεί το 65-80% της όξινης κατακρήμνισης. Όσον αφορά τη διαδικασία της ξηρής απόθεσης, αυτή πλεονάζει τους καλοκαιρινούς μήνες.

Οι εναέριοι ρύποι εκπέμπονται από φυσική ή ανθρωπογενή πηγή. Οι εναέριοι ρύποι εναποτίθενται στα ποτάμια, στο έδαφος, στη βλάστηση και κατά κύριο λόγο στη θάλασσα.

Οι παράμετροι που επηρεάζουν δυσμενώς λόγω του μολυσμένου αέρα αποκαλούνται αποδέκτες. Η μεταφορά των ρυπογόνων στοιχείων μπορεί να γίνει και μέσω του αέρα, από τις πηγές στους αποδέκτες. Παράμετροι που επηρεάζουν τότε θετικά και τότε αρνητικά όταν διασπείρονται οι ρυπογόνες ουσίες είναι το ύψος εκπομπής του ρύπου, καθώς και η διαφορά της ταχύτητας που χαρακτηρίζει το ρυπογόνο αέριο και τον άνεμο. Ακολούθως, (Πίνακας 3.1) γίνεται παρουσίαση των πηγών και των ιόντων των ρύπων.

Πίνακας 3.1: Οι ρύποι και οι πηγές τους (4).

<i>ΠΗΓΗ</i>	<i>ΧΑΡΑΚΤΗΡΑΣ</i>	<i>ΙΟΝΤΑ</i>
ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΗΣ	ΟΞΙΝΟΣ	H ⁺ , NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ⁻²
ΘΑΛΑΣΣΑ	ΟΥΔΕΤΕΡΟΣ	Na ⁺ , K ⁺ , Mg ⁺ , Ca ⁺² , SO ₄ ⁻² , Cl ⁻

ΕΛΑΦΟΣ	ΑΛΚΑΛΙΚΟΣ	Mg ₊₂ , Ca ₊₂
ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΔΡΑΣΗ	ΑΛΚΑΛΙΚΟΣ	NH ₄₊

Τα στοιχεία του θειικού και του νιτρικού οξέος που είναι απόρροια της ανθρώπινης δραστηριότητας θεωρούνται η βασικότερη πηγή ισχυρών οξέων. Στις ευρωπαϊκές χώρες, οι εκπομπές των ανθρωπογενών πηγών ξεπερνούν το 90% των συνολικών εκπομπών SO₂, εν αντιθέσει με τις εκπομπές σε οξείδια του αζώτου που κυμαίνονται κοντά στο 50%. Σε επίπεδο βιομηχανιών, οι εκπομπές SO₂ σε ποσοστό 63% προέρχονται από τις καύσεις, και μόνο το 37% είναι απόρροια της παραγωγικής διαδικασίας. Ακόμη, αξιοσημείωτες πηγές ρυπαντών είναι η θέρμανση των κτιρίων και η κυκλοφορία των οχημάτων. Σε γενικές γραμμές, συγκεντρώνονται μεγάλες ποσότητες οξειδίων του αζώτου στις μεγαλουπόλεις, και πιο μικρές στις επαρχίες (3).

Δυστυχώς, κατά την μεταφορά του χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος, αλλά και κατά την αποθήκευσή του στα εργοτάξια, είναι εκτεθειμένος στα χλωριόντα του νερού της θαλάσσης, του βρόχινου νερού και των ρυπογόνων ουσιών της ατμόσφαιρας για εκτεταμένο χρονικό διάστημα. Εκτιθέμενος στα προαναφερθέντα στοιχεία, δημιουργούνται προϊόντα διάβρωσης επί της επιφάνειάς του.

Σύμφωνα με πειραματικές μελέτες, έχει διαπιστωθεί ότι ο σχηματισμός διαβρώσεων μέσω βελονισμού στην επιφάνεια του χάλυβα γίνεται λόγω των χλωριόντων του νερού της θαλάσσης. Η διαδικασία αυτή έχει αυξητική τάση όσο παρατηρείται αύξηση της συγκέντρωσης των χλωριόντων, κατά την εξάτμιση του νερού. ε

Ο βελονισμός που έγινε στην επιφάνεια του χάλυβα παραμένει ενεργό κέντρο διαβρώσεων, σε συνθήκες διάβρωσης, καθώς δεν είναι εφικτή η αφαίρεσή του. Ακόμη, στην εσοχή αυτή συγκεντρώνεται τάση, κατά τη μηχανική φόρτιση, με κίνδυνο να παρουσιαστεί ψαθυρή θραύση του χάλυβα.

Είναι εφικτή η αύξηση της ταχύτητας της διάβρωσης του χάλυβα (3):

- Στην περίπτωση μείωσης του pH.
- Στην περίπτωση αύξησης της υγρασίας και της θερμοκρασίας.
- Στην περίπτωση ύπαρξης χλωριόντων Cl.
- Στην περίπτωση επαφής με το έδαφος.
- Βάσει της περιεκτικότητας της ατμόσφαιρας σε διοξείδιο του θείου SO₂ και οξείδια του αζώτου NO_x.
- Στην περίπτωση ενεργών κέντρων στην επιφάνεια του χάλυβα.

- Στην περίπτωση ύπαρξης αρχικής διάβρωσης.
- Στην περίπτωση ύπαρξης διαφορετικών ειδών χαλύβων και διαφορετικού ηλεκτροχημικού δυναμικού.
- Στην περίπτωση ύπαρξης διαβρωμένων χαλύβων.

Για τους προαναφερθέντες λόγους, κρίνεται σκόπιμο η αποθήκευση των οπλισμών και η διεξαγωγή της διαδικασίας να γίνεται σε χώρο που έχει στεγανοποιηθεί. Σε γενικές γραμμές, θα πρέπει να απουσιάζουν τυχόν αλλοιώσεις ή παραμορφώσεις πριν τη χρήση του χάλυβα, που επιφέρουν την ταχύτερη διάβρωσή του.

Η διαδικασία της διάβρωσης μπορεί να δώσει σε κάποιο μέρος του χάλυβα τον χαρακτηρισμό του ανοδικού και σε κάποιο άλλο τον χαρακτηρισμό του καθοδικού, καθώς πρόκειται για μια διεργασία ηλεκτρολυτικού τύπου, η οποία επιτυγχάνεται από τη στιγμή που τα μέταλλα έρθουν αντιμέτωπα με ηλεκτρολύτες (διάλυμα ιόντων), ή με πιο ηλεκτροθετικά μέταλλα, ούτως ώστε να επιτευχθεί η δημιουργία ενός ηλεκτρολυτικού ζεύγους ανόδου – καθόδου. Σε ένα τέτοιο ζεύγος είναι εφικτή η ύπαρξη μετασχηματισμών μεταξύ δυο σημείων του ίδιου μετάλλου, στην περίπτωση ύπαρξης διαφορών στη χημική κατάσταση, στη μορφή ή και μεταξύ των μετάλλων και των οξειδίων τους (3).

Μπορεί να γίνει διάκριση των ζευγών ανόδου – καθόδου, που σχηματίζονται πάνω στα μέταλλα, σε τοπικά και μακροσκοπικά γαλβανικά στοιχεία.

Ο χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος είναι ένα κράμα, το οποίο από τη στιγμή που δημιουργείται φέρει στην επιφάνειά του οξειδία, ενώ η σύστασή του είναι ανομοιομορφή. Οι αιτίες αυτές συμβάλλουν στο να δημιουργηθούν τοπικά γαλβανικά στοιχεία, τα οποία διαφοροποιούνται σε ένταση, σε σύγκριση με άλλα που έχουν γειτονικές περιοχές. οι διαφορές επί της έντασης δύναται να οδηγήσουν στη δημιουργία διαφορετικών ηλεκτρικών δυναμικών της τάξεως μερικών δεκάδων mV.

Τα μακροσκοπικά γαλβανικά στοιχεία στην επιφάνεια των μετάλλων μπορεί να δημιουργηθούν είτε λόγω της επαφής με χάλυβα διαφορετικής σύστασης, είτε επειδή υπάρχουν περιοχές με διαφορετική τιμή pH ή διαφορετική ποσότητα χλωριόντων, είτε επειδή υπάρχουν καλά και μη αεριζόμενες περιοχές. Σημειώνεται, πως το δυναμικό που έχουν τα γαλβανικά μακροσκοπικά στοιχεία δύναται να αγγίξει και την τάξη των εκατοντάδων mV (3).

Και στις δυο προαναφερθείσες περιπτώσεις προβαίνουμε στη δημιουργία κάποιου προϊόντος οξείδωσης στην επιφάνεια της ράβδου, είτε κάποιο οξείδιο, είτε κάποιο υδροξείδιο, είτε κάποια χημική ένωση. Μετά το πέρας κάποιου χρονικού διαστήματος, γίνεται αύξηση του πάχους που έχει το προϊόν αυτό, με συνέπεια το δημιουργηθέν στρώμα να βλάπτει τον οπλισμό, και ακολούθως όλη την κατασκευή (3).

Βάσει του «Κανονισμού Τεχνολογίας Χαλύβων», τα προϊόντα που δημιουργήθηκαν από διαβρώσεις στην επιφάνεια του χάλυβα δεν μπορούν να θεωρηθούν επιβλαβή, τουναντίον θεωρείται ότι αν είναι λίγα παίζουν βαρυσήμαντο ρόλο στη συνάφεια του οπλισμού με το σκυρόδεμα. Μπορεί να επέλθει μείωση της συνάφειας σε περίπτωση που τα οξειδία είναι πολλά σε αριθμό. Η προαναφερθείσα παρατήρηση αναφέρεται στους οπλισμούς που έχει επέλθει ατμοσφαιρική διάβρωση, και όχι διάβρωση με βελονισμό.

Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί πως κομμάτια χάλυβα, τα οποία έχουν τοποθετηθεί σε διάλυμα υδροξειδίων του ασβεστίου το πολύ για διάστημα τεσσάρων εβδομάδων, έχουν πιο μεγάλες προσφύσεις εν συγκρίσει με το καθαρό χάλυβα (3).

Επιπλέον, είναι εφικτή η χρήση χάλυβα που έχει οξειδωθεί, όταν μπορεί να γίνει αφομοίωση των προϊόντων των διαβρώσεων στο νωπό σκυρόδεμα, και να επέλθει έτσι μετατροπή αυτών των οξειδίων σε φερίτική φάση (Ca_4AF). Τα ποσά αυτά βρίσκονται σε άμεση εξάρτηση με το πορώδες του σκυροδέματος, τη σύσταση του τσιμέντου, καθώς και το ποσοστό που έχει σε C_3A . αν ωστόσο δεν γίνεται αφομοίωση των οξειδίων απ' το σκυρόδεμα, σχηματίζονται τοπικά γαλβανικά στοιχεία, που προκαλούν επιτάχυνση των διαβρώσεων στον οπλισμό (3).

Κρίνεται επίσης αξιοσημείωτο να αναφερθεί η επιρροή που ασκείται επί των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα, λόγω των οξειδίων, τα οποία προκαλούν μεταβολή στη διατομή του. Καθώς υπάρχει οξείδωση, μπορεί να επέλθει μείωση της αντοχής και της ολκιμότητας του, με αποτέλεσμα η κατασκευή να παρουσιάζει ανεπάρκειες στατικής φύσεως.

Όσον αφορά το πόσο ανθεκτικός είναι ο χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος σε συνθήκες ατμοσφαιρικών διαβρώσεων, αυτό εξαρτάται από το είδος του, τουτέστιν τη χημική του σύσταση και τις νευρώσεις του, καθώς και από τις συνθήκες του περιβάλλοντος, και από τις τάσεις που απορρέουν από την μέθοδο που παράχθηκε. Σε γενικές γραμμές, θεωρείται πως (3):

- Ο χάλυβας θερμικής έλασης έχει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα από τον χάλυβα θερμικής κατεργασίας και ψυχρής έλασης.
- Ο χάλυβας αποκτά μεγαλύτερη ανθεκτικότητα όσο πιο μικρή περιεκτικότητα έχει στα στοιχεία του θείου (S), του αζώτου (N) και του φωσφόρου (P).
- Όσο αυξάνεται η τραχύτητα της επιφάνειας του χάλυβα τόσο μεγαλώνει και η ανθεκτικότητά του.

Επιπλέον, επισημαίνεται ότι σε περίπτωση που ο χάλυβας υπόκειται σε μηχανικές τάσεις, παρουσιάζει μεγαλύτερη επιρρέπεια στις διαβρώσεις, και σίγουρα αυτές είναι πιο δυνατές, καθώς η το σημείο του χάλυβα που έχει πλαστικώς παραμορφωθεί εν ψυχρώ, (κάμψη, κοπή, αναδίπλωση) θεωρείται ανοδικό, με συνέπεια να διαβρώνεται χωρίς κανένα εμπόδιο.

4^ο Κεφάλαιο: Επίδραση Πυρκαγιάς

4.1 Συμπεριφορά δομικών υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες

Κρίνεται πως οι πολιτικοί μηχανικοί έχουν αρκετά παραμελήσει τη διαδικασία που απαιτείται για να σχεδιαστεί μια κατασκευή ανθεκτική σε πυρκαγιά. Αυτό συμβαίνει καθώς υπερτερεί η άποψη ότι ο οπλισμός σκυροδέματος παρέχει σε πρακτικό επίπεδο μεγάλη προστασία σε περίπτωση πυρκαγιάς. Σε περίπτωση πυρκαγιάς, η έλκυση της αυξημένης θερμότητας ασκεί σημαντική επιρροή επί των μηχανικών χαρακτηριστικών που έχουν οι κατασκευές, όπως και επί της συνάφειας του σκυροδέματος με τον οπλισμό (11).

Έτσι, λοιπόν, κατά τον σχεδιασμό μιας κατασκευής, οι πολιτικοί μηχανικοί οφείλουν να την σχεδιάσουν επαρκώς ασφαλή (ενεργητική και παθητική προστασία). Η ενεργητική προστασία αντιστοιχεί σε κάποιο μέτρο, που αποσκοπεί στην μείωση της πιθανότητας να εκδηλωθεί και να εξαπλωθεί μια πυρκαγιά. Αυτό εξαρτάται από τη θέση που έχει το κτίριο και το πώς έχει διαταχθεί, από το πώς αξιοποιείται σωστά, από τη θέση των αντιπυρικών χωρισμάτων, τη θερμική μόνωση, και το πόσο αποδοτικά είναι τα συστήματα πυρανίχνευσης και πυρόσβεσης (11).

Όσον αφορά την παθητική προστασία, αυτή αφορά το κατά πόσο είναι ανθεκτική η κατασκευή. Με τον όρο ανθεκτικότητα νοείται α) η ικανότητα να αναληφθούν φορτία, β) το να διατηρηθεί η αντιπυρική ακεραιότητα (χρήση διαχωριστικών στοιχείων που αποτελούν εμπόδιο στις φλόγες να διαπεράσουν την κατασκευή), και γ) η διατήρηση της θερμομονωτικής ικανότητας (ενίσχυση με χρήση διαχωριστικών στοιχείων που αποτελούν εμπόδιο στη θερμότητα, κι έτσι δεν μεταφέρεται σε επιφάνεια που δεν αποκαλύπτεται, και δεν γίνεται εξάπλωση της πυρκαγιάς σε γειτονικές περιοχές) (11).

4.2 Το σκυρόδεμα σε υψηλές θερμοκρασίες

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

Για τη διεξαγωγή της μεταγενέστερης έρευνας, αναφορικά με την απομένουσα αντοχή που έχουν τα δομικά στοιχεία, κρίνεται βαρυσήμαντο να προβλεφθεί σωστά η θερμοκρασία, η οποία εμφανίζεται σε ποικίλα τμήματα του κτιρίου.

Όσο βρίσκεται σε εξέλιξη μια φωτιά, και αναλόγως της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται, το σκυρόδεμα παίρνει μια σειρά από χρώματα. Βάσει πειραματικών μελετών, όταν η θερμοκρασία φτάσει τους 300^ο- 600^οC, το μπετόν κοκκινίζει ή ροζίζει. Αντιθέτως, φτάνοντας η θερμοκρασία

τους 600°- 800°C , το σκυροδέμα μπορεί να λάβει γκρι χρώμα. Συνεπώς, μια ένδειξης της αντοχής του σκυροδέματος σε θερμοκρασία, κατόπιν πυρκαγιάς, είναι τα χρώματα. Επί παραδείγματι, σε θερμοκρασία 600°- 800°C, η αντοχή του σκυροδέματος χάνεται κατά 50 – 80% (11).

4.2.2 Συμπεριφορά του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες

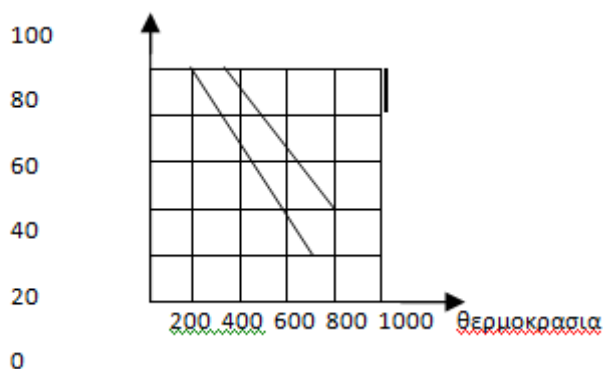
Η συμπεριφορά του σκυροδέματος, σε περίπτωση πυρκαγιάς, είναι πολύ καλύτερη εν συγκρίσει με τα υπόλοιπα δομικά υλικά, για τους ακόλουθους λόγους:

- i. Τα δομικά στοιχεία που παράγονται από μπετόν έχουν σε γενικές γραμμές πολύ πιο μεγάλη μάζα σε σχέση με άλλα στοιχεία από ξύλο ή χάλυβα. Ως εκ τούτου, στο εσωτερικό του στοιχείου, είναι εφικτό να μην αυξηθεί η θερμοκρασία.
- ii. Ακόμα και σε συνθήκες ξηρών περιβαλλόντων, το σκυρόδεμα εμπεριέχει νερό, κάτι το οποίο δικαιολογεί ότι στους 600°C η αποσύνθεση του τσιμέντου, που βρίσκεται στις εξωτερικές στρώσεις, είναι αναμενόμενη. Σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών, γίνεται εξάτμιση του νερού πρωτίστως από την επιφάνεια, και σταδιακά, όσο διατηρείται η φωτιά, από τα βαθύτερα στρώματα. Όσο εξατμίζεται, γίνεται απορρόφηση θερμότητας, με αποτέλεσμα να επιβραδύνεται η θέρμανση των στρωμάτων στο εσωτερικό του σκυροδέματος.
- iii. Επιπλέον, τα αδρανή υλικά επηρεάζουν σημαντικά το βαθμό ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε πυρκαγιές. Επί παραδείγματι, τα ασβεστολιθικά αδρανή, η χρήση των οποίων γίνεται κατά βάση στη χώρα μας, είναι πολύ ανθεκτικά, αφού χάνουν την αντοχή τους στους 900°C. Εξίσου καλά συμπεριφέρονται και οι σκωρίες υψικαμίνων. Με την θέρμανση των πυριτικών αδρανών στους 500°C, επέρχεται διόγκωση και θρυμματισμός τους. Έτσι, υπόκειται σε αλλαγές το σύστημα κρυστάλλωσης του χαλαζιού, και επέρχεται διόγκωση (11).

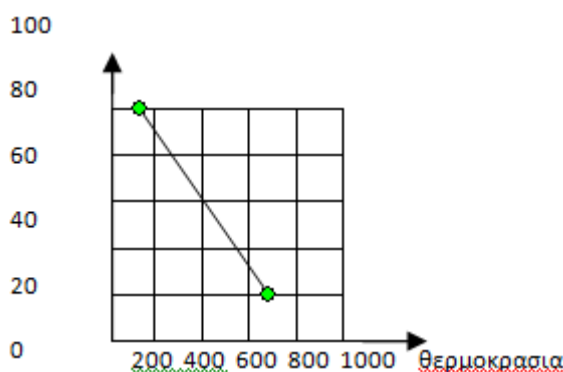
4.2.3 Επίδραση της πυρκαγιάς στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος

Συνέπεια της φωτιάς είναι ότι μεταβάλλεται η θλιπτική αντοχή, η εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος, και παράλληλα δημιουργούνται παραμορφώσεις λόγω θερμοκρασίας. Η παρουσίαση των ακολούθων γραφικών παραστάσεων (Σχήματα 4.1 έως 4.4) αποτελεί πρόταση του CEB, ως πρακτικές καμπύλες για να υπολογιστούν τα προαναφερθέντα μεγέθη.

Στα Σχήματα 4.1 και 4.2 αποτυπώνεται το πόσο ανθεκτικό είναι το σκυρόδεμα, όπως και ο βαθμός της θλιπτικής και εφελκυστικής του αντοχής, αντίστοιχα. Όσον αφορά τη θλιπτική αντοχή με ασβεστολιθικά αδρανή, προτείνεται ο σχεδιασμός και μιας «ενδιάμεσης» ευθείας μεταξύ των δυο εικονιζόμενων, που παρουσιάζονται και αναφέρονται σε ελαφρά σκυροδέματα και σε σκυροδέματα με περιεκτικότητα πυριτικών αδρανών. Η μοναδική ευθεία στο Σχήμα 4.2 αναφέρεται στα αδρανή με πυριτική σύσταση. Βέβαια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για σκυρόδεμα με ασβεστολιθικά αδρανή, η χρήση των οποίων στην χώρα μας είναι συνήθης.. βάσει των δυο Σχημάτων, μπορεί να επέλθει μείωση της αντοχής του σκυροδέματος κατά 20% σε θερμοκρασιακές συνθήκες των 700 °C, κάτι που συνεπάγεται ότι η εκδήλωση πυρκαγιάς μπορεί να εμφανίσει αστοχίες της κατασκευής.



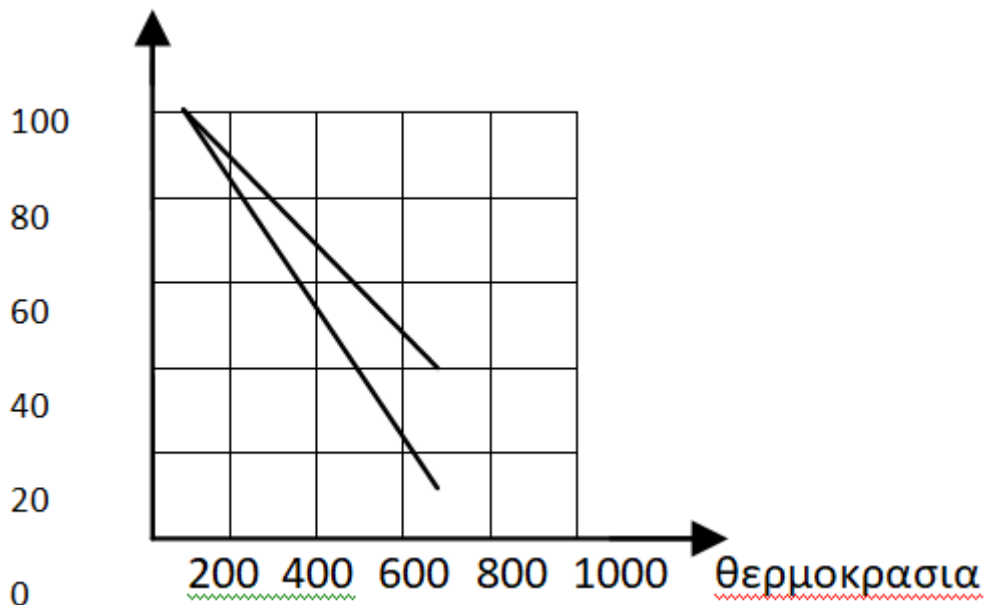
- **Σχήμα 4.1** Επίδραση της υψηλής θερμοκρασίας στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (11).



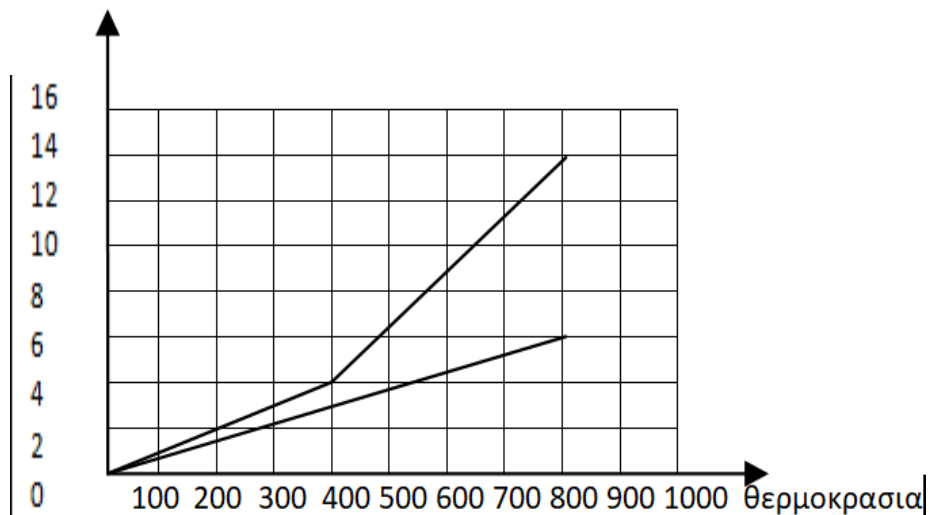
Σχήμα 4.2 Επίδραση της υψηλής θερμοκρασίας στην εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος (11).

Είναι προφανές πως υπάρχει αντίστοιχη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής (Σχήμα 4.3). Όσον αφορά τη θερμική επιμήκυνση, σε θερμοκρασία πάνω 400 °C,

αυξάνεται αξιοσημείωτα η κλίση, κάτι που δείχνει ότι πάνω από την τιμή αυτή η εκδήλωση του φαινομένου μπορεί να γίνει σε πολύ πιο έντονα.



Σχήμα 4.3 Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος με την αύξηση της θερμοκρασίας (11).



Σχήμα 4.4 Μεταβολή της επιμήκυνσης λόγω θερμότητας του σκυροδέματος με την αύξηση της θερμοκρασίας (11).

Ακολούθως, γίνεται παρουσίαση ενός πίνακα, όπου γίνεται σύγκριση των χαρακτηριστικών τιμών τόσο για τα σκυροδέματα με πυριτικά αδρανή όσο και για τα ασβεστολιθικά αδρανή. Ειδικότερα:

- Ο βαθμός αντοχής σε θλίψη σε μέση θερμοκρασία $f_c(20\text{ }^\circ\text{C})$
- Η ανάλογη ανθεκτικότητα σε υψηλή θερμοκρασία θ $f_c(\theta)$ και η παραμόρφωση $\varepsilon_{c1}(\theta)$

Γίνεται σαφές, πως τα ασβεστολιθικά αδρανή πλεονεκτούν σε σχέση με τα πυριτικά, καθώς η αντοχή που παρουσιάζει το σκυρόδεμα σε πολύ υψηλή θερμοκρασία ($\sim 900\text{ }^\circ\text{C}$) είναι αυξημένη έως και 10% από αυτή που παρουσιάζει το σκυρόδεμα με πυριτικά αδρανή.

Πίνακας 4.1 Μεταβολή της αντοχής του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες (11).

θερμοκρασία σκυροδέματος ($^\circ\text{C}$)	$f_c(\theta) / f_c(20\text{ }^\circ\text{C})$		$\varepsilon_{c1}(\theta) / 10^{-3}$
	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 χάλυβας σε υψηλές θερμοκρασίες

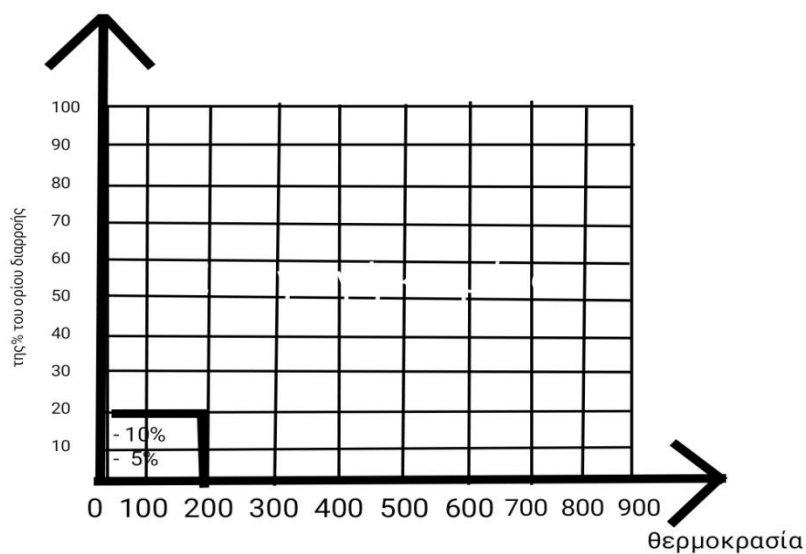
4.3.1 Επίδραση της πυρκαγιάς στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα

Αν και ο χάλυβας είναι άκαυστος, δεν αντέχει όταν εκτίθεται για πολύ ώρα σε θερμοκρασίες όπως αυτές που παρουσιάζονται όταν εκδηλώνεται μια πυρκαγιά. Βάσει εργαστηριακών δοκιμών

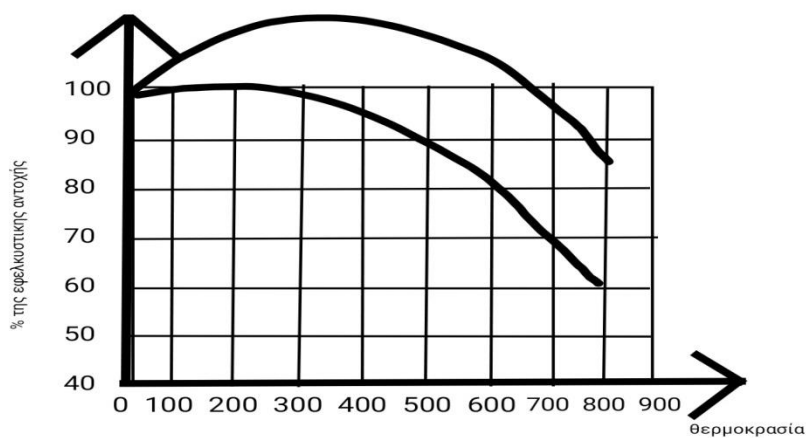
σε συνήθη μαλακό χάλυβα, παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό αρχικά σε θερμοκρασία μέχρι 250°C , και επανέρχεται στα αρχικά επίπεδα αντοχής στους 400°C απ' όπου πέφτει πάλι. Βάσει των συνηθισμένων συντελεστών ασφάλειας, στους 550°C αγγίζει την επιτρεπόμενη τάση. Η κατηγορία εκείνη των χάλυβων που χαρακτηρίζονται για τα υψηλά επίπεδα αντοχής με ψυχρή έλαση παρουσιάζουν γρηγορότερη πτώση, καθώς η ανόπτηση οδηγεί σε απώλεια της πρόσθετης αντοχής, με συνέπεια η κρίσιμη θερμοκρασία να κυμαίνεται στους 400°C με 500°C . Ο οπλισμός του σκυροδέματος φέρει το σύνολο των ιδιοτήτων που έχει ο χάλυβα. Όπως, προς αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων του σκυροδέματος, κρίνεται απαραίτητη η κάλυψή του, βάσει των κανονισμών που ισχύουν (11).

Όπως συμβαίνει και με το σκυρόδεμα, η πυρκαγιά ασκεί επιρροή και επιφέρει μεταβολή του ορίου διαρροής, της εφελκυστικής αντοχής, του μέτρου ελκυστικότητας του χάλυβα, και οδηγεί στη δημιουργία θερμικών παραμορφώσεων. Τις ακόλουθες γραφικές παραστάσεις τις προτείνει το CEB, ως πρακτικές καμπύλες για να υπολογιστούν τα μεγέθη αυτά.

Η μείωση που επέρχεται στο όριο διαρροής που έχουν οι ράβδοι οπλισμού σε συνάρτηση με τις θερμοκρασιακές συνθήκες είναι πρακτικώς γραμμική, ξεκινώντας απ' τους 250°C . Επίσης, ο παράγοντας του είδους του χάλυβα καθορίζει με τη σειρά του αυτή την μείωση επί του ορίου διαρροής, καθώς είναι πιο έντονη σε χάλυβες προερχόμενοι από εν ψυχρώ κατεργασία. Όσον αφορά την εφελκυστική αντοχή, αυτή βρίσκεται σε άμεση εξάρτηση με τις παραμέτρους της ιστορίας φορτίσεως και του είδους του χάλυβα. Έτσι, λοιπόν, στους χάλυβες που έχουν υποστεί εν θερμώ κατεργασία είναι πιθανή η εμφάνιση αυξημένων αντοχής. Βέβαια, δεδομένου ότι το όριο διαρροής μειώνεται σημαντικά, η εκδήλωση υψηλών αντοχών μάλλον αντιστοιχεί σε μεγάλες παραμορφώσεις ράβδων, και συνεπώς και των δομικών μελών. Εν αντιθέσει, η κατηγορία των χάλυβων, που προέρχεται από εν ψυχρώ κατεργασία, οι περισσότεροι χάλυβες δηλαδή, δεν παρουσιάζει λόγω της ανόδου της θερμοκρασίας ουδεμία αύξηση στην αντοχή (11).



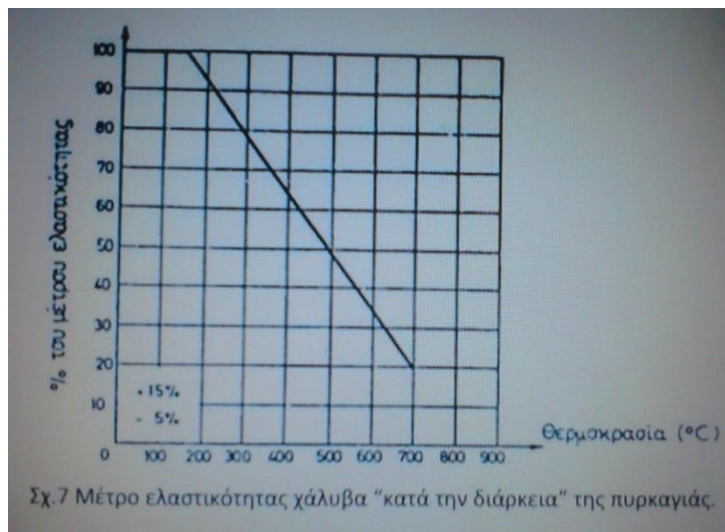
Σχήμα 4.5 Επίδραση πυρκαγιάς στο όριο διαρροής του χάλυβα (11).



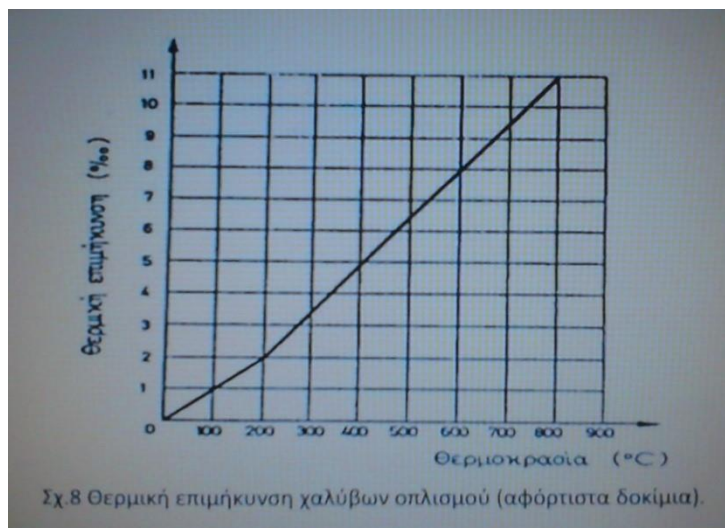
Σχήμα 4.6 Επίδραση πυρκαγιάς στην εφελκυστική αντοχή του χάλυβα (11).

Αναφορικά με το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα, σε περίπτωση που ξεσπά πυρκαγιά και παρουσιάζονται συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών, η μείωση στην τιμή του μέτρου ελαστικότητας αντιστοιχεί με αυτή του ορίου διαρροής όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Επιπροσθέτως, η θερμική επιμήκυνση του χάλυβα βρίσκεται σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Έτσι, όταν η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη των 200 °C, η θερμική επιμήκυνση εμφανίζεται πιο έντονα.

επισημαίνεται, πως τα προαναφερθέντα και τα αντίστοιχα διαγράμματα αναφέρονται σε χάλυβες που παράγονται τόσο από εν θερμώ κατεργασία όσο και από εν ψυχρώ.



Σχήμα 4.7 Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του χάλυβα με την αύξηση της θερμοκρασίας (11).



Σχήμα 4.8 Επιμήκυνση λόγω θερμότητας του χάλυβα με την αύξηση της θερμοκρασίας (11).

4.3.2 Επιρροή της πυρκαγιάς στη συνάφεια χάλυβα – σκυροδέματος

Η συνάφεια του σκυροδέματος με τις ράβδους οπλισμού είναι ένα εκ των βασικότερων χαρακτηριστικών του οπλισμένου σκυροδέματος, και βρίσκεται σε συνάρτηση με ποικίλους παράγοντες, οι οποίοι συνυπολογίζονται όταν υπολογίζεται το μήκος αγκυρώσεως. Συγκεκριμένα, οι παράγοντες είναι οι ακόλουθοι (11):

- Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος (θλιπτική και εφελκυστική αντοχή).
- Το είδος και το μέγεθος που έχουν τα αδρανή εντός του σκυροδέματος.

- Το είδος της επιπόνησης που καταβάλλεται στο σκυρόδεμα.
- Η επικάλυψη που διακρίνει τον οπλισμό.
- Η παρουσία εγκάρσιου οπλισμού.
- Η επιφάνεια που έχει η ράβδος οπλισμού.
- Η θερμοκρασία που επικρατεί.

Σημειώνεται, πως ιδιαίτερος η παράμετρος της θερμοκρασίας ασκεί άμεση επιρροή επί της συνάφειας του οπλισμού του σκυροδέματος, καθώς διαφοροποιούνται οι συντελεστές θερμικής διαστολής μεταξύ του χάλυβα του σκυροδέματος. Ως εκ τούτου, η φωτιά ασκεί την επιρροή της στην κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο οπλισμός σκυροδέματος, αφού αποτελεί την αιτία που η θερμοκρασία αυξάνεται. Σε τέτοια ύψη θερμοκρασιών, στον χάλυβα αλλά και στο σκυρόδεμα που τον περικλείει παρουσιάζονται διάφοροι τύποι παραμορφώσεων, με αποτέλεσμα να υπάρχει σχετική ολίσθηση μεταξύ των δυο υλικών, και μην μπορούν πλέον να «συνεργαστούν» καλά προς ανάληψη φορτίων από τα δομικά μέρη (7).

4.4 Βλάβες μελών οπλισμένου σκυροδέματος έπειτα από πυρκαγιές

Προτού αρχίσουν οι διαδικασίες για να αποκατασταθεί κάποια βλάβη, κρίνεται ουσιώδης η σωστή εκτίμηση των αιτιών που προξένησαν τη βλάβη, αλλά και ο διαχωρισμός του σε φέροντα και μη στοιχεία των κατασκευών, καθώς αυτά στα οποία αρχικώς εστιάζεται η προσοχή είναι τα φέροντα.

Οι ζημιές προκαλούνται συνήθως από τους εξής λόγους (7):

- Η θέρμανση προκαλεί επιμήκυνση του οπλισμού σε υπέρμετρο βαθμό, και συνάμα ο οπλισμός παύει να αντέχει.
- Η θερμική διαστολή που έχει το σκυρόδεμα είναι πιο μικρή από αυτή που έχει ο οπλισμός, με αποτέλεσμα τη δημιουργία τάσεων εξαναγκασμού, που επιφέρουν θραύση του σκυροδέματος.
- Η μεγάλη ογκομετρική μεταβολή στα μέλη του σκυροδέματος οδηγεί στο να εκρηχθεί.
- Καθώς ο χάλυβας επιμηκύνεται υπερβολικά δημιουργείται αστοχία στη θλιβόμενη ζώνη των φορέων που κάμπτονται.
- Εξαιτίας της επιρροής που έχει το νερό κατάσβεσης, αναπτύσσονται στο σκυρόδεμα ανομοιόμορφες θερμικές τάσεις, και επίσης φθείρεται μερικώς.

Βάσει των προαναφερθέντων, η εικόνα που παρουσιάζει ο φέροντας οργανισμός, το σύνολο δηλαδή των βλαβών που εμφανίζονται ύστερα από τη φωτιά είναι η ακόλουθη (7):

- Ποικίλα στοιχεία, και κατά κύριο λόγο, οι πλάκες του σκυροδέματος βρίσκονται σε κατάσταση αποσύνθεσης – ασβεστοποίησης.
- Το σκυρόδεμα αποφλοιώνεται σε μια σειρά στοιχείων.
- Εμφάνιση επιφανειακών ρηγματώσεων σε δοκούς ποικίλων ειδών και βαθμών, σε υποστυλώματα, καθώς και στις πλάκες σκυροδέματος.
- Αποκόπτονται γωνίες από υποστυλώματα και δοκούς.
- Το σκυρόδεμα αποφλοιώνεται σε διάφορα στοιχεία.
- Ο οπλισμός αχρηστεύεται καθώς το σκυρόδεμα διαστέλλεται και αποκόπτεται.
- Προβολές, κλίμακες και πλάκες παρουσιάζουν σημαντικό βέλος κάμψης.

4.4.1 Αναλυτική αναφορά στη συμπεριφορά δομικών στοιχείων σε υψηλές θερμοκρασίες

Στην ενότητα αυτή θα γίνει ενδελεχής παρουσίαση της μορφής που θα έχει η βλάβη ύστερα από την εκδήλωση φωτιάς στα δομικά μέλη του οπλισμένου σκυροδέματος. Κρίνεται αναγκαία ή περιγραφή και η κατανόηση των βλαβών αυτών, προκειμένου να γίνουν αντιληπτά τα μέτρα και οι τεχνικές επισκευών.

i. Υποστυλώματα

Σε περίπτωση πυρκαγιάς, ένας εκ των βασικότερων κινδύνων είναι να αποσχισθεί/αποφλοιωθεί το σκυρόδεμα, ειδικά στις γωνίες, με συνέπεια την έκθεση του οπλισμού, και αν η θερμοκρασία ξεπερνά τους 600°C, να αγγίζει στα πλαίσια των συνηθισμένων φορτίσεων, το όριο διαρροής του. Κατά κύριο λόγο, τα υποστυλώματα προστατεύονται λόγω των διαστάσεων τους, και λόγω της επικάλυψης των οπλισμών με μεγάλη ποσότητα σκυροδέματος, κάτι το οποίο οδηγεί στην αναστολή της θέρμανσης στο εσωτερικό του. Ως εκ τούτου, λαμβάνοντας υπόψη διάφορα πειράματα [3], [4], και βάσει της εμπειρίας μας, αποδεικνύεται ότι η αντοχή των υποστυλωμάτων 40x40 εκ. διαρκεί για πυρκαγιά 90 λεπτών, λόγω του φορτίου του στατικού υπολογισμού. Αντιστοίχως, η αντοχή των υποστυλωμάτων 25x25εκ. διαρκεί υπό συνθήκες πυρκαγιάς για διάστημα μίας ώρας.

Για υποστυλώματα με πλευρά 20εκ. υπάρχει ενδεχόμενο να δημιουργηθεί θέμα, όχι επειδή υπερβαίνεται η ανθεκτικότητα σε θλίψη, αλλά λόγω ενδεχόμενου λυγίσματος. Βάσει πειραμάτων, έχει διαπιστωθεί ότι υποστυλώματα μικρότερα των 25 εκ. απαιτούνται πρόσθετες επενδύσεις. Αν παρουσιαστεί αυξημένη ανθεκτικότητα, δύναται να τυλιχτεί ο οπλισμός με ελαφρύ πυκνό δομικό πλέγμα, προκειμένου να αποτελέσει εμπόδιο στο να αποφλοιωθεί το σκυρόδεμα, και επιπροσθέτως

να συμβάλλει ούτως ώστε να διπλασιαστεί η αντοχή στα λεπτά υποστυλώματα, σε περίπτωση πυρκαγιών (-30 εκ) (7).

ii. Δοκοί

Τα κύρια χαρακτηριστικά που έχει μια δοκός είναι το πλάτος που έχει η διατομή, το βάθος του οπλισμού, ο πυκνός επιφανειακός οπλισμός, όπως και το σύστημα στατικής λειτουργίας.

Ο κίνδυνος αποφλοιώσης του σκυροδέματος μπορεί να ελαττωθεί ιδιαίτερος σε περιπτώσεις ξηρασίας, όπου αποφεύγεται να συμπυκνωθούν οι υδρατμοί. Ακόμη, ο κίνδυνος ξεπερνιέται στην περίπτωση ασβεστολιθικών αδρανών ή πυρίμαχου σκυροδέματος, ή στην περίπτωση που το πλάτος της διατομής υπερβαίνει τα 20 εκ., ή οι οπλισμοί επικαλύπτονται περισσότερο.

Όπως έχει προαναφερθεί, ένα εκ των κυριότερων χαρακτηριστικών της δοκού είναι το σύστημα στατικής λειτουργίας. Μεγαλύτερη ευπάθεια έχουν η αμφιέριστη δοκός ή τα πλαίσια ενός ανοίγματος. Βάσει μελετών, έχει διαπιστωθεί [3, [4], ότι μεγαλύτερη ασφάλεια επιδεικνύουν οι περιπτώσεις των συνεχόμενων δοκών στα κτίρια, όπως και των πολύστυλων πλαισίων, καθώς η θερμοκρασία δύναται να επιδράσει στον κάτω οπλισμό, εν αντιθέσει με τον οπλισμό στις στηρίξεις, που είναι πλησίον του δαπέδου του υπερκείμενου ορόφου, όπου η θερμοκρασία είναι πιο χαμηλή.

Επίσης, αξίζει να γίνει αναφορά στην περίπτωση των παραμορφώσεων, που σημαίνει ότι αν υπάρξει εμπόδιο από τα μέλη που είναι δίπλα στα φέροντα στοιχεία που επιμηκύνονται, τότε παρουσιάζεται πρόβλημα, όπως η εμφάνιση λυγίσματος και το στραβώματος.

iii. Πλάκες

Σύμφωνα με τους κανονισμούς, οι πλάκες πάχους 8εκ και 9 εκ προκαλούν αναστολή της πυρκαγιάς για μισή ώρα το πολύ, εν αντιθέσει με τις πλάκες πάχους 10εκ.. και άνω, οι οποίες κρίνεται ότι έχουν αντοχή στις πυρκαγιές το λιγότερο για μιάμιση ώρα. Προς αύξηση της ανθεκτικότητας στις συνεχόμενες πλάκες, γίνεται τοποθέτηση οπλισμού και στα ανοίγματα, στο πάνω μέρος και τις στηρίξεις του οπλισμού, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση των δοκών.

iv. Γενική μορφολογία βλαβών

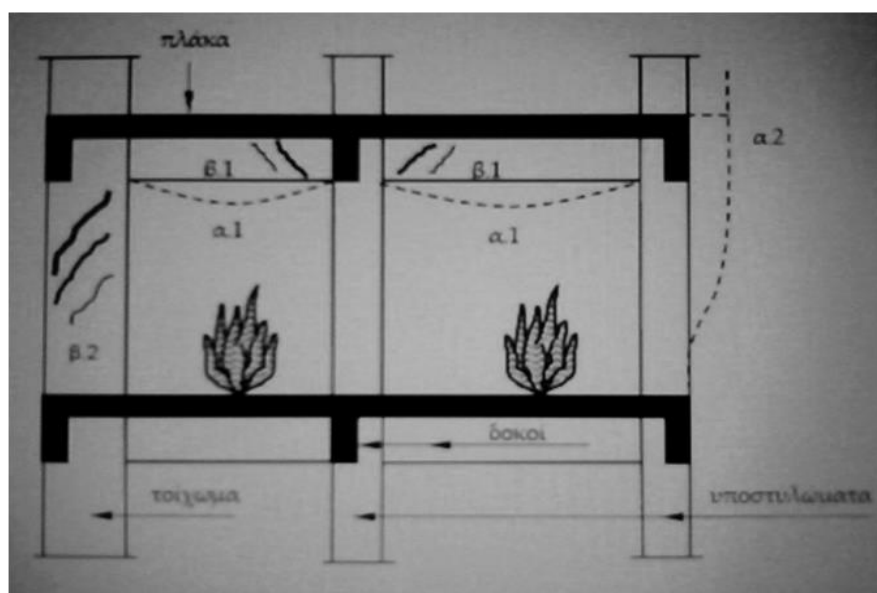
Όπως έχει προαναφερθεί, οι πυρκαγιές αλλοιώνουν αρκετά τα υλικά, λόγω τήξης και καύσης. Ακολούθως, παρουσιάζονται οι κύριες και οι τυπικές «γεωμετρικές» βλάβες (7):

- Λόγω πλημμελούς πρόσφυσης και αυξημένου πάχους προκαλούνται φαινόμενα πρόωρης αποκόλλησης και κατάπτωσης επιχρίσματος, όπως και οροφοκονιάματος.

- Απομειώνεται η διατομή στα φέροντα στοιχεία, καθώς παρουσιάζεται απολέπιση, αποφλοιώση και αποκόλληση στις εξωτερικές στοιβάδες. Ακόμη, η μάζα του σκυροδέματος ή του κονιάματος αποσυντίθεται.
- Η παραμόρφωση που εκδηλώνεται τόσο επί του οριζόντιου φορέα όσο και επί του κατακόρυφου στοιχείου παραμένει. Μάλιστα, πολλές από τις θερμικές παραμορφώσεις σε μεγάλο βαθμό μονιμοποιούνται (έως και 50%).
- Καθώς η παραμόρφωση παρουσιάζεται σε μεγάλο βαθμό, με ταυτόχρονη απομείωση των διατομών και της αντοχής, είναι έκδηλο το φαινόμενο των ρωγμών, δηλαδή της κρίσιμης καμπτικής και διατμητικής σειρά βλαβών. Η συνηθέστερη διατμητική βλάβη είναι λοξή ρωγή, που εκδηλώνεται στις μεσαίες εδράσεις που έχουν οι συνεχόμενες δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος. Επίσης, παρατηρείται συχνά και η έντονη λοξή ρωγή επί ισχυρού και δύσκαμπτου κατακόρυφου στοιχείου.

Η εκδήλωση έντονων και συνεχών πυρκαγιών επιφέρει συνήθως βαριά βλάβη στα δομικά στοιχεία κάποιο ορόφου ή όλου του κτιρίου, σε τοπικό ή μη επίπεδο.

Ακολούθως (Σχήμα 4.9), γίνεται παρουσίαση ενός τυπικού σκαριφήματος ενός κτιρίου οπλισμένου σκυροδέματος με εκδήλωση εσωτερικής φωτιάς.



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 (7).

Μπορεί να παρατηρηθεί ταχεία αύξηση του βέλους κάμψης δομικών στοιχείων, καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Στην περίπτωση δε των παριών ων δομικών στοιχείων, το μήκος αυξάνεται και η καμπυλότητα επιβάλλεται. Επιπροσθέτως, γίνεται απομείωση των

χαρακτηριστικών που έχουν τα υλικά, και ως εκ τούτου παρατηρείται και μείωση των δυσκαμψιών.

Όσον αφορά τους ισοστατικούς φορείς, παρουσιάζεται αύξηση των παραμορφώσεων άνευ τροποποίησης της έντασής τους. Στους υπερστατικούς, δε, φορείς (κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος) παρουσιάζεται αύξηση των παραμορφώσεων σε στοιχεία που καίγονται, ενώ την ίδια στιγμή γίνεται ανακατανομή της έντασής τους (ανακούφιση των ανοιγμάτων και επιβάρυνση των στηριγμάτων).

Ακόμη, η υψηλή θερμοκρασία προκαλεί μείωση των αντοχών χάλυβα και σκυροδέματος στα ανοίγματα, με αποτέλεσμα την μείωση της ροπής αντοχής. Αντιθέτως, σε επίπεδο στηριγμάτων, ασκείται σε μικρότερο βαθμό και όχι τόσο έντονα επιρροή στη ροπή αντοχής (7).

Λόγω αυτών των δυο συζευγμένων φαινομένων, είναι εφικτή η εκδήλωση παραμορφώσεων και ρηγματώσης, είτε καμπτικής (στα ανοίγματα) είτε διατμητικής (στα στηρίγματα).

Συνεπώς, κατά βάση, παρουσιάζονται στο παραπάνω σχήμα:

A.1: Καμπτικές βλάβες, οι πλάκες «κοιλιάζουν» και εμφανίζονται έντονες ρωγμές, λόγω των συζευγμένων φαινομένων.

B.1: Τα συζευγμένα φαινόμενα, για άλλη μια φορά, προκαλούν διατμητικές βλάβες και έντονες ρωγμές, κατά κύριο λόγο, στις συνεχόμενες δοκούς των ενδιάμεσων στηρίξεων.

A.2: Φαινόμενα καμπτικών βλαβών, απλών ρηγματώσεων και «φουσκωμάτων» στους στύλους, που προκαλούνται από τη θερμοκρασία, η οποία αποτελεί αιτία της επιμήκυνσης του ζυγώματος. Αν υπάρχουν στύλοι μικρής διατομής και δύσκαμπτοι, τότε η επιμήκυνση του ζυγώματος δύναται να μην οδηγήσει σε ρηγματώσεις στα υποστυλώματα.

B.2: Φαινόμενα διατμηματικών βλαβών, έντονης λοξής ρωγμής σε ισχυρά και με δυσκαμψία τοιχώματα και θερμικών «λακτισμάτων», τα οποία προκαλούνται από την επιμήκυνση στο καίόμενο σύστημα πλακών και δικών.

Γ: Φαινόμενα διαμπερών ρωγμών επί των πλακών στους εξώστες (προβολές). Μάλιστα, παρατηρείται επέκταση της βλάβης αυτής στους κορμούς των δοκών, που βρίσκονται περιμετρικά του κτιρίου. Οι εξερχόμενες απ' το κτίριο, μέσα από ένα κορύφωμα, φλόγες αυξάνουν έντονα τη θερμοκρασία και επιμηκύνουν τις υπερκείμενες δοκούς και προβολές, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολλαπλών ρωγμών, κάθετων προς την όψη.

Προκειμένου να αποκατασταθεί και να αναβαθμιστεί η ασφάλεια των κατασκευών από τις προαναφερθείσες βλάβες, απαιτείται η πραγματοποίηση επεμβάσεων στους φέροντες οργανισμούς (Σελούντος & Παπαϊωάννου, 2000). Για την επίτευξη αυτού του στόχου γίνονται προτάσεις διαφόρων μέτρων και τεχνικών, τα οποία θα παρουσιαστούν στο ακόλουθο κεφάλαιο (7).

5^ο Κεφάλαιο: Μέτρα προστασίας κατασκευών

5.1 Μέτρα προστασίας εκ των προτέρων

5.1.1 Από το φαινόμενο της διάβρωσης

Οι διαβρώσεις αντιμετωπίζονται εξαρχής, χρησιμοποιώντας κατάλληλα μέτρα που θα περιορίζουν ή θα απαλείψουν το φαινόμενο, που θα διογκωνόταν περνώντας ο χρόνος. Προφανώς, η λήψη μέτρων προς αποφυγή του προβλήματος είναι προτιμότερη, από κατασκευαστικής και οικονομικής απόψεως, από τα να αντιμετωπίζεται το πρόβλημα αφού δημιουργηθεί. Η μεγάλη διαφοροποίηση του κόστους των τρόπων αντιμετώπισης της κατάστασης, καθιστά αναγκαία τη λήψη μέτρων που αποσκοπούν στο να μειωθεί ο κίνδυνος διάβρωσης, κατά την κατασκευή.

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, αποφεύγεται να διαβρωθεί ο οπλισμός σκυροδέματος, με τη λήψη των ακόλουθων μέτρων (13):

- i. Το πάχος και η ποιότητα επικάλυψης του οπλισμού: Όσο μεγαλώνει η επικάλυψη του οπλισμού, τόσο η προστασία θα είναι πιο σίγουρη. Η ποιότητα της επικάλυψης βελτιώνεται μέσω
 - ο Της μείωσης του πορώδους του σκυροδέματος.
 - ο Της αύξησης της ποιότητας του τσιμέντου.
 - ο Της κατάλληλης συμπύκνωσης και ωρίμανσης.
- ii. Η σχετική υγρασία του σκυροδέματος: Η υγρασία που απαιτείται προς επίσπευση της διαδικασίας της ενανθράκωσης είναι κάπου στο 50-60%. Στην περίπτωση που η υγρασία φτάσει το 40%, ή ακόμα και το 85-90%, παρατηρείται επιβράδυνση της διαδικασίας, λόγω δυσκολίας στη διάλυση του CO₂. Ακόμη, αν η υγρασία είναι της τάξης το 20%, σε πρακτικό επίπεδο υπάρχει μηδενισμός της ενανθράκωσης.
- iii. Το περιβάλλον: Σημεία όπου παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας του αέρα σε CO₂ χαρακτηρίζονται ως «εύφορα» για να ενανθρακωθεί το σκυρόδεμα. Τέτοια σημεία μπορεί να βρίσκονται σε περιοχές βιομηχανικής ή αστικής ζώνης, όπου είναι έκδηλη η επιβάρυνση των χαμηλών ορόφων κατασκευής, καθώς και των παρκινγκ των αμαξιών από τις εκπομπές σε CO₂.
- iv. Ύπαρξη ρωγμών: Γίνεται έλεγχος του πλήθους και του εύρους των ρωγμών, τόσο στο νωπό σκυρόδεμα όσο και σε αυτό που έχει σκληρύνει. Επίσης, γίνεται καλύτερος έλεγχος και στην ίδια τη διαδικασία της ενανθράκωσης.

- v. Φράγματα κατά της ενανθράκωσης: Χρησιμοποιώντας βαφές εμποτισμού ή και λεπτών επιχρισμάτων, εμποδίζεται εποικοδομητικά η είσοδος του CO₂ εντός του σκυροδέματος
- vi. Ανοξειδωτοι χάλυβες: Προς κάλυψη των απαιτήσεων για να είναι προστατευμένοι οι οπλισμοί από τις διαβρώσεις, ακόμη και σε σημεία που θεωρούνται επιβλαβή για τις κατασκευές, γίνεται χρήση ανοξειδωτου χάλυβα. Το λεπτό επιφανειακό στρώμα οξειδίου του χρωμίου που σχηματίζεται προκαλεί παθητικοποίηση της επιφάνειας του χάλυβα, κάτι που ευθύνεται για την ανθεκτικότητα του ανοξειδωτου χάλυβα στις διαβρώσεις. Κάποιοι από τους τύπους ανοξειδωτου χάλυβα που κυκλοφορούν στην αγορά είναι οι ωστενιτικοί, οι φερριτικοί, οι μαρτενσιτικοί και οι duplex (συνδυασμός ωστενιτικών και φερριτικών). Η καταλληλότητα του ανοξειδωτου χάλυβα είναι συνάρτηση των απαιτήσεων και των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών των κατασκευών, των δαπανών, καιθώς και της δυνατότητας να παραχθεί ο χάλυβας στις απαιτούμενες διαστάσεις και με τις απαραίτητες διατομές.

5.1.2 Από το φαινόμενο της πυρκαγιάς

Η πυρκαγιά αποτελεί έναν ακόμα βαρυσήμαντο κίνδυνο για τις κατασκευές. Ο σχεδιασμός μιας κατασκευής αποσκοπεί στο να προσδιοριστεί ο χρόνος που παρεμβάλλεται από τη στιγμή που ξεσπά η πυρκαγιά μέχρι την κατάρρευση. Ο χρόνος αυτός που μεσολαβεί αποκαλείται δείκτης πυραντίστασης. Είναι σαφές πως στο ενδεχόμενο της μη λήψης μέτρων οι κατασκευές θα έχουν σημαντικά προβλήματα σε περίπτωση φωτιάς. Κατά συνέπεια, είναι ουσιώδης η λήψη μέτρων πυροπροστασίας, η ανάλυση των οποίων θα γίνει στο ακόλουθο κεφάλαιο. Εκ των μέτρων αυτών, η εφαρμογή κάποιων είναι γενικευμένη, όπως η χρήση χρωμάτων επάλειψης ειδικού τύπου, ενώ κάποια εφαρμόζονται σε κατασκευές, όπως η εφαρμογή χαλύβδινων στοιχείων.

Εκτοξευόμενες Προστατευτικές Επικαλύψεις

Υπάρχουν ποικίλα υλικά, τα οποία έχουν τη λειτουργία προστατευτικών στρωμάτων γύρω από τον χάλυβα, αν ξεσπάσει φωτιά. Ο διαχωρισμός των υλικών αυτών μπορεί να γίνει σε δυο κατηγορίες. Βασικό συστατικό της πρώτης είναι ο βερμικουλίτης, το οποίο συνδυάζεται με ένα συνδετικό υλικό, κατά κύριο λόγο το τσιμέντο. Η δεύτερη κατηγορία έχει ως κύριο συστατικό τις ορυκτές ίνες.

Γίνεται εκτόξευση των προαναφερθέντων υλικών πάνω στην επιφάνεια του χάλυβα. Ως εκ τούτου, δεν μπορεί να γίνει χρήση τους, αν ο κίνδυνος να εμφανιστούν διαβρώσεις είναι μεγάλος. Μπορεί όμως να γίνει η εφαρμογή τους σε χαλύβδινα στοιχεία, που υπάρχουν σε σημεία εντός των

κτισμάτων. Η πλειονότητα των υλικών παρέχει προστασία από την πυρκαγιά στα διάστημα τεσσάρων ωρών. Η εν λόγω διαδικασία, ως μέθοδος πυροπροστασίας, χαρακτηρίζεται για την ταχύτητά και το χαμηλό της κόστος (13).

Μηχανικά Στερεωμένες Επικαλύψεις

Ένα πλήθος επικαλύψεων μπορεί να προσφέρει κάλυψη στην επιφάνεια του χάλυβα, με αποτέλεσμα την αντοχή του σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών, διάρκεια μισής έως τεσσάρων ωρών. Διάφορες μηχανικές μέθοδοι, είτε κόλλες είτε κατάλληλα πλαίσια, είναι κατάλληλες για στερέωση στα χαλύβδινα στοιχεία του εκάστοτε κτιρίου.

Οι παράγοντες των ειδών στα υλικά και των χρονικών διαστημάτων προσδιορίζουν το πάχος που θα έχουν οι επικαλύψεις. Σε γενικές γραμμές, το πάχος κυμαίνεται μεταξύ των 6 με 80mm. Για την παραγωγή αυτών των υλικών, γίνεται χρήση ορυκτών ινών, όπως ο βερμικουλίτης, ή ανόργανων υλικών που σχηματίζουν φυλλίδια, όπως η μίκα. Για τα συνδετικά υλικά γίνεται χρήση ειδών τσιμέντου, ή γενικά πυριτικών συνδετικών μέσων. Η συγκεκριμένη επικάλυψη χρησιμοποιείται κατά βάση για να καλυφθούν τα υποστυλώματα, και ταυτόχρονα προστατεύει και έχει αισθητική αξία. Αυτές οι μέθοδοι πλεονεκτούν καθώς το σύνολο των διαδικασιών που λαμβάνει χώρα στα εργοτάξια γίνεται χωρίς να χρησιμοποιούνται υγρά μέσα (13).

Προκατασκευασμένα Προστατευτικά Περιβλήματα

Η χρήση του προκατασκευασμένου περιβλήματος από πλαίσιο χάλυβα ή κονίαμα βερμικουλίτη γίνεται προς παροχή πυροπροστασίας στο χαλύβδινο στοιχείο για διάρκεια έως τεσσάρων ωρών. Συνήθης πυροπροστατευτική επικάλυψη έχει περαστεί επί του χαλύβδινου πλαισίου. Ο χρόνος που απαιτείται για προστασία καθορίζει το πάχος που θα έχει η επικάλυψη. Συνήθως, δεν υπολογίζεται ο προστιθέμενος χρόνος προστασίας εξαιτίας του χαλύβδινου πλαισίου.

Αισθητικώς, η εμφάνιση του προκατασκευασμένου περιβλήματος μπορεί να αξίζει. Ωστόσο, κρίνεται αναγκαίο να δίνεται μεγάλη προσοχή στην επιλογή του σωστού μεγέθους. Επίσης, κρίνεται αναγκαίο το ενδιαφέρον να εστιάζεται στην πυροπροστασία που διαθέτουν οι σύνδεσμοι μεταξύ των προκατασκευασμένων προστατευτικών περιβλημάτων, καθώς και μεταξύ του περιβλήματος και του χάλυβα (13).

Διογκούμενα Χρώματα

Όπως έχει προαναφερθεί, ο χάλυβας μπορεί να προστατευτεί από τις διαβρώσεις μέσω των χρωμάτων και της οργανικής επικάλυψης. Επιπλέον, είναι εφικτό ο χάλυβας να διαθέτει πυροπροστασία. Στην περίπτωση υψηλών θερμοκρασιών, λόγω των χρωμάτων πυροπροστασίας προκαλείται η δημιουργία αέριων προϊόντων, που μπορούν να αυξηθούν μέχρι πενήντα φορές σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Όσο διογκώνεται το αέριο προϊόν παρατηρείται ο σχηματισμός σπογγώδους στρώματος, το οποίο έχει θερμομονωτική δράση. Η διάρκεια της προστασίας μπορεί να αγγίξει μέχρι ένα δίωρο. Το χρώμα πυροπροστασίας είναι μαύρο ή έχει σκούρα απόχρωση, και κατά συνέπεια κρίνεται απαραίτητη η κάλυψή του από ένα άλλο στρώμα χρώματος προς απόκτηση μιας καλής αισθητικής εικόνας.

Ακόμη και για να είναι προστατευμένο το προϊόν απ' την υγρασία, απαιτείται να επικαλύπτεται από ένα άλλο στρώμα χρώματος. Για χρώματα εφαρμόζονται επί τούτου με χρήση βούρτσας ή σπάτουλας.

Η χρήση χρωμάτων πυροπροστασίας θεωρείται μια απλή και καθόλου ακριβή μέθοδος προστασίας απ' τη φωτιά, ενώ μπορούν να συνδυαστούν με παροχή προστασίας κατά των διαβρώσεων (13).

Πλήρωση με Σκυρόδεμα (χαλύβδινα στοιχεία)

Η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου, όπως και της ακόλουθης, γίνεται μόνο στην περίπτωση κλειστής διατομής που περιέχει κενά π.χ. κοιλοδοκός. Εν αρχή, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε προς αύξηση της ακαμψίας της διατομής, αλλά εν συνεχεία διαπιστώθηκε και το πόσο ευνοϊκά συμπεριφέρθηκε στην παροχή πυροπροστασίας. Προσθέτοντας χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος παρατηρείται αύξηση των θετικών αποτελεσμάτων. Η σύνθετη κατασκευή πλεονεκτεί ως προς το ότι μεταβάλλεται το πάχος του χάλυβα, όπως και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος, κάτι που συνεπάγεται την αξιοσημείωτη αύξηση της αντοχής, χωρίς ταυτόχρονα να αυξάνονται οι διαστάσεις. Σε περίπτωση φωτιάς, έχει καλύτερη συμπεριφορά από ίδιες διατομές υποστλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος (10).

Πλήρωση με Νερό (χαλύβδινα στοιχεία)

Σε περίπτωση πυρκαγιάς, η προφύλαξη του χάλυβα επιτυγχάνεται μέσω της πλήρωσης κοιλοδοκών με χρήση νερού. Είναι εφικτή η μεταφορά θερμότητας μέσω νερού απ' το τμήμα του

χάλυβα που είναι εκτεθειμένο στην πυρκαγιά σε άλλο τμήμα που δεν είναι εκτεθειμένο. Ακόμη, μπορεί να επέλθει εξάτμιση του νερού σε κατάλληλη δεξαμενή. Το πόσο νερό θα βρίσκεται στη δεξαμενή εξαρτάται απ' τους παράγοντες του εμβαδού της επιφάνειας που έχει ο χάλυβας, της προβλεπόμενης ανόδου της θερμοκρασίας, καθώς και της διάρκειας της πυρκαγιάς. Σημειώνεται, πως κρίνεται αναγκαία η συμπλήρωση του εξατμισθέντος νερού απ' τη δεξαμενή.

Λόγω της ανάπτυξης μεγάλης υδροστατικής πίεσης, κρίνεται απαραίτητος ο χωρισμός ολόκληρης της κατασκευής σε τομείς, οι οποίοι εξυπηρετούνται μέσω κατάλληλης αντλίας κυκλοφορίας νερού. Προφανώς, το νερό που είναι αποθηκευμένο εντός της δεξαμενής δεν πρέπει να έχει την τάση ώστε τα άλατα να αποθέτονται. Μάλιστα, με τη χρήση σωστών προσθετικών παρέχεται η εξασφάλιση της μη διαβρωτικής του ικανότητας και αυξάνεται το σημείο ζέσεως (10).

5.2 Αποτίμηση διάβρωσης σε υπάρχουσες κατασκευές

Προς σωστή εκτίμηση της κατάστασης της κατασκευής, αναφορικά με την πλευρά διάβρωσης του οπλισμού της, κρίνεται αναγκαία μια αυτοψία, που αποσκοπεί στο να τεθούν υπόψη οι ιδιαιτερότητες της εν λόγω κατασκευής. Συνηθισμένες ενδείξεις ότι υπάρχουν διαβρώσεις στις κατασκευές είναι η εμφάνιση ρωγμών, παράλληλα των οπλισμών, πάνω στην επιφάνεια. Ειδικότερα, μια ρωγμή σε μεγάλο εύρος, κατά μήκος του υποστυλώματος ή της δοκού, είναι μια χαρακτηριστική ένδειξη ότι υπάρχουν διαβρώσεις στο σίδηρο οπλισμού.

Αφού ολοκληρωθεί η αυτοψία, αποσκοπώντας στο να εξετασθεί ο βαθμός διάβρωσης των ράβδων, γίνονται δοκιμές επί επιλεγμένων σημείων κατασκευής, προς μέτρηση της επικάλυψης, του βαθμού ενανθράκωσης (ψεκάζοντας με διάλυμα φαινολοφθαλείνης), καθώς και προς διαπίστωση ότι υπάρχουν χλωριόντα (ψεκάζοντας με κατάλληλο χρωματικό δείκτη) (10).

Απαιτείται να μελετάται η κατάσταση των διαβρώσεων στον χάλυβα σκυροδέματος, καθώς έτσι γίνεται χρήση των κατάλληλων μέσων προστασίας. Ο κίνδυνος να εμφανιστούν διαβρώσεις επί του χάλυβα ελέγχεται μέσω μετρήσεων του ελεύθερου δυναμικού του χάλυβα. Κατόπιν μέτρησης του δυναμικού του χάλυβα, καταλήγουμε στις κάτωθι διαπιστώσεις, όταν (10):

- $E > -200\text{mV}_{\text{cse}}$, κατά ποσοστό 90% δεν έχουμε διάβρωση.
- $E < -350\text{mV}_{\text{cse}}$, κατά ποσοστό 90% έχουμε διάβρωση.
- $-200\text{mV}_{\text{cse}} > E > -350\text{mV}_{\text{cse}}$, δεν είμαστε βέβαιοι αν έχουμε ή όχι διάβρωση.

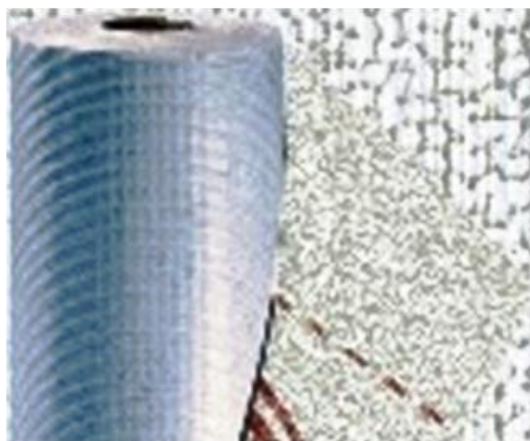
5.3 Μέτρα προστασίας υφιστάμενων κατασκευών από την διάβρωση

5.3.1 Προστατευτικές επενδύσεις.

Προς αντιμετώπιση του προβλήματος των διαβρώσεων στον οπλισμό, γίνονται πολύ μεγαλύτερες δαπάνες, σε σχέση με την εξαρχής λήψη κατάλληλων μέτρων, ανάλογων των κατασκευαστικών προδιαγραφών. Επιπροσθέτως, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι σε περίπτωση τέτοιων εργασιών, μπορεί να ασκηθεί επιρροή στη σωστή λειτουργία του κτιρίου, όπως σε ένα κέντρο υγείας, σε ένα νοσοκομείο, καθώς για τη διεξαγωγή των επισκευών είναι απαραίτητο να αφαιρεθεί η επικάλυψη, όπως και κάποια τμήματα του στοιχείου που έχει διαβρωθεί. Οι τρόποι επισκευών εξαρτώνται από το ενδεχόμενο περιορισμού της επικάλυψης από τις διαβρώσεις, από την περίπτωση οι διαβρώσεις να έχουν εισχωρήσει μέχρι τον οπλισμό της κατασκευής, καθώς και από το κατά πόσο οι οπλισμοί έχουν υποστεί φθορές.

Τα τελευταία χρόνια, διατίθεται στην αγορά ένα πλήθος υλικών, τα οποία επιβραδύνουν την εμφάνιση των διαβρώσεων σε κάποια νέα κατασκευή, αντίστοιχα άλλα προϊόντα που απευθύνονται σε υπάρχουσες κατασκευές, αλλά και υλικά που επαναπαθητικοποιούν τον οπλισμό, καθώς υπάρχουν χλωριόνται ή γίνεται ενανθράκωση. Ποικίλα υλικά υπάρχουν σε διάφορες μορφές, ανάλογα με τη χρήση τους. Συγκεκριμένα, λαμβάνουν την μορφή προσμίκτων απευθυνόμενα σε μια καινούρια κατασκευή, την μορφή διαλύματος προς επάλειψη στην επιφάνεια του σκυροδέματος, αποσκοπώντας στο διαποτισμό του, αλλά και σε μορφή υλικών επικάλυψης, αποσκοπώντας στην στεγανοποίηση της επιφάνειας από την ύπαρξη υγρών και αερίων που ευθύνονται για τις διαβρώσεις. Χρησιμοποιώντας τέτοια υλικά για χρόνια, διαπιστώνεται το κατά πόσο αποτελεσματικό είναι ένα υλικό, αφού οι εργαστηριακές δοκιμές δεν είναι αντιπροσωπευτικές (10).

Η μέθοδος και η διαδικασία που ακολουθείται προς αντιμετώπιση του φαινομένου των διαβρώσεων ή προς προστασία των υπαρχουσών κατασκευών από τις διαβρώσεις περιγράφονται ακολούθως:



Εικόνα 5.1 Υδατοστεγής μεμβράνη (10).

Τα προαναφερθέντα διατίθενται σε μορφή βιομηχανοποιημένων φύλλων, είτε σε υγρών υλικών. Αφενός διακρίνονται για το μεγάλο τους κόστος και αφετέρου για την ευχρησία τους. Η χρήση μεμβρανών είναι μια ιδιαίτερα οικονομική διέξοδος, καθώς προσφέρονται καλύτερες προσφύσεις, εμποδίζεται η είσοδος χλωριόντων και αποτρέπεται η υγρασία. Επίσης, δεν παρατηρείται αντίδραση των μεμβρανών με τα υλικά του σκυροδέματος.

Όταν τοποθετούνται οι μεμβράνες σκυροδέματος, απαιτείται να γίνεται αυστηρή τήρηση όλων των κατασκευαστικών ενδείξεων, και ακόμα καλύτερα να γίνεται η τοποθέτηση υπό κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες. Αίτια της δημιουργίας φυσαλίδων στην επιφάνεια του σκυροδέματος, που προκαλούν μείωση της λειτουργικότητας των μεμβρανών, αποτελούν οι μεταβολές των καιρικών συνθηκών, το πορώδες και η υγρασία που εμφανίζει το σκυρόδεμα.

Επιπροσθέτως, επισημαίνεται πως η αποδοτικότητα που παρουσιάζει η υδατοστεγής μεμβράνη δεν διαρκεί εσαεί. Συνεπώς, απαιτείται να αλλάζεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα (10).

Προστατευτικά επιστρώματα σκυροδέματος



Εικόνα 5.2 Τοποθέτηση προστατευτικού επιστρώματος (10).

Λειτουργία προστατευτικού επιστρώματος πάνω στο υφιστάμενο σκυρόδεμα, με αποτέλεσμα να μειώνεται η διαπερατότητά του, μπορεί να έχει το σκυρόδεμα με τσιμέντο υψηλών ποιοτικών χαρακτηριστικών, όπως το Portland ή αυτό με περιεκτικότητα σε πολυμερή. Προς σωστή κατασκευή των επιστρωμάτων, είναι απαραίτητη η πρόωρη διεργασία που εξασφαλίζει τη συνάφειά τους με το ήδη υπάρχον σκυρόδεμα.

Λόγος κατά κύριο λόγο γίνεται για επίστρωμα πάχους 40-50mm, η παρασκευή του οποίου γίνεται επιτοπίως, και πριν την τοποθέτησή του απαιτείται να έχει βραχεί πριν το σκυρόδεμα. Η συντήρηση του προστατευτικού επιστρώματος αφού τοποθετηθεί πρέπει να γίνεται το λιγότερο για 72 ώρες, καθώς σε συνδυασμό με τις ψηλές θερμοκρασίες του περιβάλλοντος δύναται να εμφανιστούν φαινόμενα ξηρασίας ή και συστολής της ξηρασίας στο υπόστρωμα, κάτι που έχει μεγάλη σοβαρότητα και επικινδυνότητα (10).

Εμποτισμός με πολυμερή στο σκυρόδεμα.

Τον εμποτισμό τον εφαρμόζουμε για μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος, κάτι που συνεπάγεται την απαραίτητη χρήση πιο δραστικών μέτρων, στην περίπτωση πολλών διαβρώσεων στο περιβάλλον. Έτσι, λοιπόν, γίνεται χρήση της μεθόδου πλήρωσης κάποιου κενού με πολυμερή σε βάθος 35-50mm. Πιο αναλυτικά:

- Καθαρισμός της επιφάνειας από τυχόν ξένες ουσίες, κατόπιν, απλώνεται άμμος στον οπλισμό του σκυροδέματος, αποσκοπώντας στην αποφυγή ενός θερμικού σοκ του σκυροδέματος, όταν εφαρμόζεται, ακολούθως, υψηλή θερμοκρασία.
- Ξήρανση του σκυροδέματος διατηρώντας υψηλές θερμοκρασίες για διάρκεια οχτώ ωρών.
- Βαθμιαία αποψύχεται το σκυρόδεμα πολύ προσεκτικά, προκειμένου να μην γίνει απορρόφηση της υγρασίας απ' το περιβάλλον (38° C για διάστημα 12 -36 ωρών).
- Αφαίρεση του αέρα απ' το σκυρόδεμα, εφαρμόζοντας κενά.
- Προσθήκη μονομερών.
- Προσθήκη αδιάβροχων μεμβρανών στην επιφάνεια, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εξατμιστεί το μονομερές.
- Ρύθμιση θερμικού καταλυτικού πολυμερισμού του μονομερούς στους 74° C, για διάστημα πέντε ωρών.

Συνήθως, για την μέθοδο του εμποτισμού γίνεται χρήση του μονομερούς μεθακλικού μεθυλίου, το οποίο μπορεί να έχει υψηλό κόστος, εντούτοις έχει μικρό ιξώδες, εύκολο πολυμερισμό, υψηλό σημείο βρασμού και δεν έχει τοξικότητα (10).

Η μέθοδος του εμποτισμού πλεονεκτεί ως προς την εφαρμογή της σε όλους τους τύπους σκυροδέματος, ανεξαρτήτως των συστατικών και της ποιότητάς του, παράλληλα δε, επιφέρει βελτίωση των ιδιοτήτων του. Αντιθέτως, η εν λόγω διαδικασία υστερεί στο ότι απαιτεί την μέγιστη προσοχή στη διαδικασία της ξήρανσης του σκυροδέματος, προκειμένου να μην εμφανιστούν ρωγμές. Ακόμη, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ειδικού εξοπλισμού και εξειδικευμένου προσωπικού (10).

Επαναλκαλοποίηση του σκυροδέματος.

Η μέθοδος της επαναλκαλοποίησης εφαρμόζεται σε σκυρόδεμα που έχει ενανθρακωθεί, με απώτερο σκοπό να αυξηθεί η αλκαλικότητα, που έχει μειωθεί καθώς το σκυρόδεμα ενανθρακώθηκε. Η εμφάνιση της ηλεκτροώσμωσης στο εξωτερικό δυναμικό είναι το βασικό χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης λειτουργίας. Η εφαρμογή της μεθόδου είναι η ακόλουθη: Εν αρχή, γίνεται τοποθέτηση επί της επιφάνειας του σκυροδέματος ενός αλκαλικού υλικού και ενός ηλεκτροδίου, που εξυπηρετεί ως άνοδος, εν αντιθέσει με τον οπλισμό του χάλυβα του σκυροδέματος που λειτουργεί ως κάθοδος. Εν συνεχεία, μετά την εφαρμογή ενός εξωτερικού ηλεκτρικού δυναμικού, επιτυγχάνεται να διεισδύσει το αλκαλικό υγρό στο εσωτερικό του οπλισμού, στο σκυρόδεμα, και ως εκ τούτου αυξάνεται άμεσα το pH του.

Με την εφαρμογή αλκαλικού υγρού ποσότητας περίπου $1,2 \text{ lt/m}^2$ είναι δυνατή η επίτευξη της επανααλκαλοποίησης του σκυροδέματος, πάχους 1 cm με πορώδες 12% . Η εφαρμογή αυτής της απλής μεθόδου γίνεται περίπου για διάστημα δυο εβδομάδων. Στα αρνητικά της έγκειται η πιθανότητα ύπαρξης περιοχής του σκυροδέματος, όπου δεν θα γίνει αύξηση του pH (10).

Αφαίρεση χλωριόντων από το σκυρόδεμα.

Πρόκειται για μια μέθοδο που εφαρμόζεται με σκοπό την αφαίρεση των χλωριόντων από ένα κατάστρωμα γέφυρας, απ' όπου είναι εφικτή η αφαίρεση των χλωριόντων σε ποσοστό μέχρι και 90% . Η συγκεκριμένη διαδικασία γίνεται βάσει της αρχής της ηλεκτροώσμωσης, καθώς τα χλωριόντα αφαιρούνται ηλεκτροχημικά. Ειδικότερα, τα χλωριόντα αφαιρούνται χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο ηλεκτρολύτη, μια ρητίνη ανταλλαγής ιόντων και ένα πλέγμα μετάλλου, το οποίο διαχέεται επί της επιφάνειας του σκυροδέματος, λειτουργώντας ως άνοδος, εν αντιθέσει με τον σπλισμό που λειτουργεί ως κάθοδος. Με την εφαρμογή του δυναμικού, γίνεται έλκυση των χλωριόντων από την άνοδο, που είναι φορτισμένη θετικά, κάτι που συνεπάγεται δέσμευση απ' την ρητίνη.

Η συγκεκριμένη διαδικασία κοστίζει ακριβά, και είναι αναγκαίο να εφαρμόζεται υψηλό που έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγάλων θερμοκρασιών εντός του σκυροδέματος, το οποίο έχει αυξημένο κίνδυνο να εμφανίσει ρωγμές. Επιπλέον, προκαλείται αύξηση κατά πέντε φορές της διαπερατότητας του σκυροδέματος, κι έτσι απαιτείται και η εφαρμογή της μεθόδου εμποτισμού του σκυροδέματος με χρήση πολυμερών. Ακόμη, η ανθεκτικότητα συνάφειας χάλυβα – σκυροδέματος κινδυνεύει να μειωθεί (10).

Αφαίρεση υγρασίας από το σκυρόδεμα.

Για την κατάλληλη εφαρμογή αυτής της μεθόδου, προϋποτίθεται η ρύθμιση της τιμής του pH ($\text{pH} > 8$), όπως και της περιεκτικότητας του κονιάματος σε άλατα (μικρή περιεκτικότητα). Τα άλατα σε υψηλή ή χαμηλή ποσότητα εμποδίζουν το πορώδες να ξηρανθεί. Ιδανικά η περιεκτικότητα σε άλατα κρίνεται σκόπιμο να κυμαίνεται μεταξύ του $2-5\%$. Παράλληλα, η ύπαρξη θεικών ιόντων διευκολύνει τη διαδικασία διάσπασης του νερού, κάτι που λειτουργεί αρνητικά κατά την εφαρμογή της διαδικασίας.

Η διαδικασία που ακολουθείται για να εφαρμοστεί η μέθοδος είναι αντίστοιχη με αυτή που εφαρμόζεται για την αφαίρεση των χλωριόντων από την επιφάνεια του σκυροδέματος. Μέσα απ' αυτή τη διαδικασία, η διαφορά στο δυναμικό υποχρεώνει τα ιόντα των αλάτων να οδηγηθούν προς

τα ηλεκτρόδια, και να μεταφερθεί έτσι το νερό. Για να έρθει εις πέρας η ξήρανση, είναι αναγκαία η δημιουργία ρεύματος έντασης το λιγότερο από 0.1-1.

Είναι μια διαδικασία που διαρκεί πολύ, κάτι που κάνει πιο εύκολα αντιληπτό ότι η υγρασία σε κάποιον τοίχο μπορεί να μειωθεί από το 50% στο 30% εφαρμόζοντας την εν λόγω μέθοδο για ένα εξάμηνο. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου γίνεται σε τοιχοποιίες, καθώς έχει μικρός κόστος και φέρει ικανοποιητικό αποτέλεσμα (10).

5.3.2 Αναστολείς διάβρωσης

Λόγω της μη δυνατότητας δημιουργίας προστατευτικών επιστρωμάτων με τον χάλυβα, κρίνεται απαραίτητη η κάλυψή τους με κάποιο επίστρωμα, προς αποφυγή σκουριάς από την ατμοσφαιρική έκθεση.

Προς αναστολή της διάβρωσης, μπορεί να γίνει χρήση οποιασδήποτε ουσίας που δεν αφήνει την έκθεση του χάλυβα στο οξυγόνο, την υγρασία ή τα χλωριόντα. Η τοποθέτηση του εν λόγω επιχρίσματος στον χάλυβα γίνεται όταν υπάρχει απόλυτη καθαριότητα στον χάλυβα, άνευ παρουσίας ελαιωδών ουσιών, σκόνης ή σκουριάς. Αναστολέας χαρακτηρίζεται εκείνη η χημική ουσία, η οποία αν προστεθεί σε ένα περιβάλλον σε μικρές ποσότητες, μπορεί να επιφέρει ικανοποιητική μείωση στον ρυθμό της διάβρωσης. Οι αναστολείς που χρησιμοποιούνται για να προστατευτούν τα μέταλλα πλεονεκτούν στο ότι η εφαρμογή, αλλά και η αλλαγή τους μπορεί να γίνει χωρίς να κωλύεται ή να προκαλείται αναστάτωση στη διαδικασία δόμησης ή κατά την επισκευή. Αξιοσημείωτη θεωρείται μια τυποποίηση που αναφέρει ότι η εφαρμογή συγκεκριμένων αναστολέων για την καταπολέμηση των αιτιών της διάβρωσης εξαρτάται από τον βαθμό ενανθράκωσης, το pH, το είδος του χάλυβα, καθώς και τη σύνθεση του σκυροδέματος (Σκουλικίδης, 1994).

Ο αναστολέας διάβρωσης δύναται να ασκήσει επιρροή στην ανοδική, στην καθοδική αντίδραση, ή και στις δυο. Κρίνεται σκόπιμο να γίνεται σαφής διάκριση των αναστολέων διάβρωσης από άλλα πρόσθετα του σκυροδέματος, προς μείωση της διείσδυσης των ιόντων χλωρίου, όπως π.χ. η πυριτική παιπάλη.

Βάσει του τρόπου δράσης των αναστολέων διάβρωσης, αυτοί κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- i. **Ανοδικός αναστολέας διάβρωσης:** Το συγκεκριμένο υλικό αναστέλλει τη διάβρωση, σταθεροποιώντας το προστατευτικό φιλμ του οπλισμού, το οποίο τείνει προς διάσπαση με την αύξηση της περιεκτικότητας σε χλωρίδια. Αυτός ο τύπος αναστολέα εμπεριέχει νιτρώδες ασβέστιο, και έχει χρήση σε κονιάματα επισκευής. Ωστόσο, το νιτρώδες ασβέστιο

δρα και σαν επιταχυντής της πήξης, με συνέπεια να απαιτείται η λήψη μέτρων προς αποφυγή φαινομένων άμεσης πήξης.

- ii. **Καθοδικός αναστολέας διάβρωσης:** Η απορρόφηση του συγκεκριμένου αναστολέα γίνεται από το οπλισμένο σκυρόδεμα, σχηματίζοντας στην επιφάνειά του ένα φράγμα, που αποσκοπεί στην μείωση του οξυγόνου, που είναι η βασική αιτία για την καθοδική αντίδραση του χάλυβα στο σκυρόδεμα. Βέβαια, η πλειονότητα των καθοδικών αναστολέων, όπως οι αμίνες και τα φωσφορικά, επιφέρουν σημαντική επιβράδυνση στην πήξη του σκυροδέματος.
- iii. **Οργανικός αναστολέας διάβρωσης (προσοροφητικός αναστολέας):** Δρα συνδυάζοντας την παροχή ανοδικής και καθοδικής προστασίας. Χαρακτηριστικά δείγματα αυτού του αναστολέα είναι οι οργανικές αμίνες, όπως οι αμινπαπθανόλες.
- iv. **Αναστολέας διάβρωσης φάσης ατμού:** Δρα παρόμοια με τον προηγούμενο αναστολέα, προκαλώντας όμως την εμφάνιση υψηλών πιέσεων υδρατμών, οι οποίοι, λειτουργώντας ως φράγμα, εμποδίζουν τις διαβρωτικές ουσίες να διαχέονται, μέσω της ατμόσφαιρας, στο σκυρόδεμα.
- v. **Οξειδωτικοί αναστολείς διάβρωσης:** Η δράση αυτών των ουσιών, όπως και του χρωμικού άλατος, είναι η αναστολή των διαβρώσεων, ποικιλοτρόπως. Η κύρια χρήση τους είναι η αναστολή των φαινομένων διάβρωσης σε επιφάνειες μετάλλων, που παρουσιάζουν ενεργητικές παθητικές μεταλλάξεις, όπως συμβαίνει με τον σίδηρο και τα κράματα αυτού.

Από τους προαναφερθέντες αναστολείς διαβρώσεων, αυτοί που φέρουν καλύτερα αποτελέσματα είναι οι οργανικοί αναστολείς, καθώς κάνουν διεύθυνση εντός του σκυροδέματος, που έχει υποστεί σκλήρυνση μέσω της διάχυσης (8).

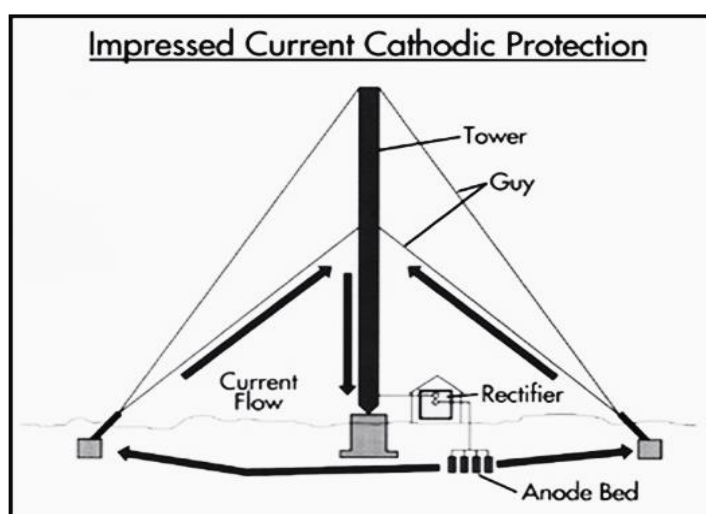
5.3.3 Καθοδική προστασία

Σκοπός της καθοδικής προστασίας είναι να επαναφέρει την αλκαλικότητα του σκυροδέματος και να αποφευχθεί η ενανθράκωση του οπλισμού. Με αυτή τη διαδικασία η εγκατάσταση που τίθεται προς προστασία λαμβάνει αρνητική φόρτιση. Έτσι, από ανοδική που ήταν η εγκατάσταση γίνεται καθοδική. Γίνεται, συνεπώς, αντιληπτό πως η εγκατάσταση εξακολουθεί να είναι αρνητικά φορτισμένη, όπως και προτού προστατευτεί, αλλά πλέον η δράση είναι αντίστροφη, έχοντας τάση για αναγωγή, και όχι για οξείδωση. Για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, μπορεί να γίνει χρήση είτε ηλεκτρικής τάσης από πηγή συνεχούς ρεύματος, είτε κάποιων ανόδων. Συνεπώς (8):

A) Σύστημα με εφαρμοζόμενο ρεύμα.

Η εφαρμογή της συγκεκριμένης διαδικασίας γίνεται προκειμένου να γίνει η σύνδεση του θετικού πόλου μιας πηγής συνεχούς ρεύματος με το σκυρόδεμα, και αντιστοίχως του αρνητικού πόλου με τον οπλισμό. Ως εκ τούτου, οι επιφάνειες αποκτούν άνοδο και οι οπλισμοί κάθοδο. Στην κάθοδο (χάλυβας) γίνεται ο σχηματισμός των ανιόντων υδροξυλίου (OH), τα οποία κάνουν αντίδραση με το νερό των πόρων, το οξυγόνο και με ελεύθερα ηλεκτρόνια της καθόδου. Η μετακίνησή τους εν συνεχεία γίνεται επί της επιφάνειας, αντί να γίνεται κατά μήκος των ράβδων. Ακόμη, υπό την τάση συνεχούς ρεύματος γίνεται και η μετακίνηση των χλωριόντων της μάζας του σκυροδέματος και του νερού των πόρων. Ως εκ τούτου, τα ανιόντα εξουδετερώνονται (φαινόμενο οξείδωσης) στην εξωτερική πλευρά του σκυροδέματος, και όχι στον χάλυβα, που θα διαβρωνόταν σε αυτή την περίπτωση.

Κρίνεται σημαντικό να δίνεται η μέγιστη δυνατή προσοχή όταν εφαρμόζεται αυτή η μέθοδος, καθώς στην περίπτωση λανθασμένων χειρισμών, θα παρουσιαστεί αύξηση της καθοδικότητας της εγκατάστασης, υπερβαίνοντας το καθορισμένο όριο (υπερπροστασία), με συνέπεια να επιταχύνεται υπερβολικά η διαδικασία της διάβρωσης. Έτσι, λοιπόν, τις περισσότερες φορές μεγάλα τμήματα της επιφάνειας του σκυροδέματος επαλείφονται με ένα συνεχές στρώμα μπογιάς ηλεκτρικά αγωγίμης (κατά βάση, με συστατικό τον άνθρακα), μέσω του οποίου γίνεται η σύνδεση σε κοντινή απόσταση ηλεκτρικών καλωδίων απ' το θετικό πόλο της ηλεκτρικής πηγής. Αρκεί να συνδεθούν οι ράβδοι οπλισμού ή η ράβδος να εφάπτεται με κάποιο σύρμα. Απαιτείται η απουσία συρμάτων μεταξύ του επιφανειακού αγωγίμου στρώματος και των ράβδων οπλισμού, όπως και οτιδήποτε άλλο μπορεί να αποτελέσει αιτία βραχυκυκλώματος στο ηλεκτρικό κύκλωμα.



Σχήμα 5.1 Σύστημα με εφαρμοζόμενο ρεύμα (Σκουλικίδης, 1994).

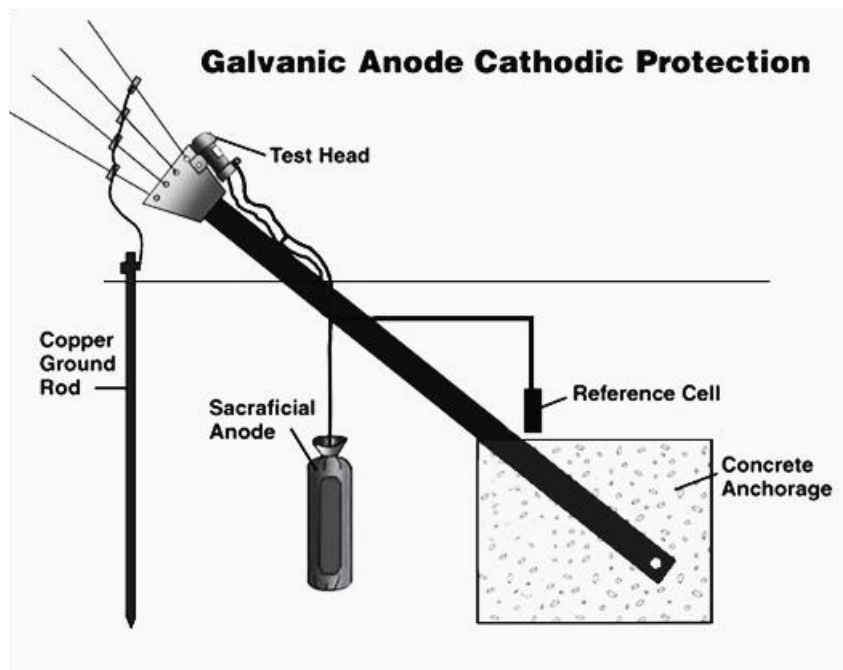
Γίνεται πολύ μεγαλύτερη εφαρμογή αυτής της μεθόδου εν συγκρίσει με την τεχνική των θυσιαζόμενων ηλεκτροδίων, ιδιαίτερος όταν:

- Επιδίωξη είναι η προστασία σωλήνων εντός του εδάφους σε γλυκό ή θαλασσινό νερό.
- Επιδίωξη είναι η κατασκευή πλωτών και μη.
- Επιδίωξη είναι η χρήση πλοίων.

B) Σύστημα θυσιαζόμενης ανόδου.

Σε αυτή την μέθοδο καθοδικής προστασίας γίνεται τοποθέτηση στους οπλισμούς μιας σειράς μεταλλικών πλακών ανοδικότερων του χάλυβα, οι οποίες έχουν λειτουργία θυσιαζόμενης ανόδου. Κατά κύριο λόγο, γίνεται χρήση ενός κράματος με Mg, Zn, Al. Γίνεται σύνδεση αυτής της πλάκας με τις κατασκευές, μέσω εξωτερικών μονωμένων αγωγών, ακόμη και στην περίπτωση παρεμβολής αντίστασης. Στα πιο ανοδικά μέταλλα, είναι εφικτή η αυθόρμητη απόκτηση αρνητικών δυναμικών, σε σχέση με τα διαβρωτικά περιβάλλοντα. Την ίδια αρνητική φόρτιση, σε σχέση με τα διαβρωτικά περιβάλλοντα, έχουν και οι κατασκευές που πρόκειται να προστεθούν (8).

Ωστόσο, επειδή το μέταλλο αυτό τείνει πολύ περισσότερο προς διάβρωση, γίνεται φόρτισή του πιο αρνητικά, σε σχέση με τις εξωτερικές συνθήκες, απ' ότι η φόρτιση του χάλυβα. Συνεπώς, μπορεί να γίνει θετική φόρτιση του χάλυβα ως προς τα μέταλλα αυτά. Απόρροια αυτής της μεθόδου είναι η δημιουργία ενός γαλβανικού στοιχείου με αρνητικό πόλο το μέταλλο και θετικό τον χάλυβα. Έτσι, μέσα από τα ανοδικότερα στοιχεία, γίνεται επιβολή στον χάλυβα ενός αντίστροφου δυναμικού, απ' αυτό της διάβρωσής του (ηλεκτρόνια ρέουν απ' τις μεταλλικές πλάκες προς τον χάλυβα). Παράλληλα, λόγω δημιουργίας του γαλβανικού στοιχείου, επέρχεται οξείδωση του ανοδικότερου μετάλλου (απώλεια ηλεκτρονίων και δημιουργία ιόντων) και η ανάλωση του είναι μεγαλύτερη απ' το να ήταν μόνο του. με άλλα λόγια, θυσιάζεται προς προστασία της κατασκευής (8).



Σχήμα 5.2 Σύστημα θυσιαζόμενης ανόδου (Σκουλικίδης, 1994).

Είναι προφανές, πως η μέθοδος αυτή όταν εφαρμόζεται ενέχει κινδύνους, καθώς η τοποθέτηση των ανόδων από μαγνήσιο (Mg), ή αλουμίνιο (Al) σε σκουριά και πλησίον εύφλεκτου υλικού, όπως το πετρέλαιο, δημιουργεί σπινθήρα απ' τις θερμικές αντιδράσεις. Σε επικίνδυνες συνθήκες, συστήνεται άνοδος Zn. Βέβαια, άνοδοι Zn δεν έχουν εποικοδομητική λειτουργία σε περιβάλλοντα παραθαλάσσια, που επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 60° C. (8).

6^ο Κεφάλαιο: Συμπεράσματα θεωρητικού μέρους

Αναφορικά με το πώς αλληλεπιδρά το οπλισμένο σκυροδέμα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες, συμπεραίνονται τα κάτωθι:

- Το κύριο πρόβλημα που παρουσιάζει ο οπλισμός του σκυροδέματος, όσον αφορά την αντοχή του, είναι οι διαβρώσεις. Η προστασία της ράβδου οπλισμού από τη διάβρωση επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ενός πολύ λεπτού επιφανειακού στρώματος από ένυδρο οξείδιο του σιδήρου. Κατά τη δημιουργία αυτού του στρώματος, η αλκαλικότητα έχει pH κάπου στο 12.5. Σε περίπτωση που η τιμή του pH είναι κάτω από 9.0, ο χάλυβας αποπαθητικοποιείται, κάτι που ευνοείται τόσο από τη διαδικασία της ενανθράκωσης όσο και από τα χλωριόντα που επιδρούν κατάλληλα.
- Η μείωση της τιμής του pH κάτω του 9.0 συμβαίνει καθώς το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ του νερού των πόρων αντιδρά με το CO_2 της ατμόσφαιρας, με συνέπεια την μετατροπή του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ σε CaCO_3 , μια διεργασία που φέρει το όνομα ενανθράκωση του σκυροδέματος. Οι παράγοντες που ασκούν επιρροή στην ενανθράκωση είναι οι συνθήκες του περιβάλλοντος, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά και το πάχος που έχει η επικάλυψη, όπως και ο τύπος του τσιμέντου.
- Λόγω των ιόντων χλωρίου, παρατηρείται διατήρηση του προστατευτικού στρώματος οξειδίου σε συγκεκριμένο σημείο, φαινόμενο που συμβαίνει συχνά κοντά στη θάλασσα, αφού στην ατμόσφαιρα η κυκλοφορία των ιόντων χλωρίου αποτελεί φυσικό φαινόμενο. Τα συλλεκτά αδρανή του σκυροδέματος, καθώς και το πρόσθετο βελτιωτικό με περιεκτικότητα σε χλωριούχο άλας αποτελούν μια ακόμη πηγή ιόντων χλωρίου. Οι παράμετροι των ποιοτικών χαρακτηριστικών και του πάχους της επικάλυψης, της περιεκτικότητας που έχει το σκυροδέμα σε τσιμέντο, του είδους και της συγκέντρωσης σε χλωριόντα, όπως και των συνθηκών του περιβάλλοντος ασκούν επιρροή στη λειτουργία που έχουν τα χλωριόντα.
- Γίνεται έλεγχος του σκυροδέματος, ως προς την ενανθράκωση που διενεργείται ψεκάζοντας φαινολοφθαλεΐνη σε φρεσκοθραυσμένη επιφάνεια, και από τον χρωματισμό που θα προκύψει γίνεται εκτίμηση της κατάστασης του σκυροδέματος, ώστε να ακολουθηθεί η κατάλληλη διαδικασία προς επισκευή.
- Συνήθως, όμως, γίνεται διάβρωση του χάλυβα στον οπλισμό του σκυροδέματος, κάτι που αποτελεί πρόβλημα παγκοσμίως, καθώς προκαλούνται καταστροφές της τάξεως των απλών παραμορφώσεων μέχρι της ολοκληρωτικής δομικής καταστροφής.

- Κατά κύριο λόγο, οι διαβρώσεις συμβαίνουν καθώς το νερό εισέρχεται στο σκυρόδεμα από τις ρωγμές που υπάρχουν στην επιφάνειά του, ή λόγω του ότι αυξάνεται το πορώδες.
- Η εμφάνιση των ομοιόμορφων διαβρώσεων γίνεται όταν η ενανθράκωση που έχει υποστεί το σκυρόδεμα έχει φτάσει στο βάθος, όπου έχει γίνει τοποθέτηση της ράβδου χάλυβα και παρουσιάζεται σε μικρό ποσοστό υγρασία. Το σύνολο των φθορών είναι εμφανές στην επιφάνεια των δομικών στοιχείων, με τη μορφή μιας λεπτής σχισμής (φαινόμενο ρηγμάτωσης) στον οπλισμό. Εν αντιθέσει, η εμφάνιση των τοπικών διαβρώσεων γίνεται σε συγκεκριμένη θέση, όπου οι πλάκες διαβρώνονται καθώς έχει συσσωρευτεί υγρασία ακριβώς πάνω απ' τις συγκεκριμένες θέσεις.
- Οι ατμοσφαιρικές διαβρώσεις είναι προκαλούνται από την επιρροή που ασκεί η ατμόσφαιρα στην κατασκευή. Πρόκειται για ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο, το οποίο συμβαίνει ως γαλβανικό στοιχείο με τους επιφανειακούς ηλεκτρολύτες να προχωράνε την αντίδραση.
- Στα αρνητικά έγκειται ότι κατά την μεταφορά και την αποθήκευση του χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος σε εργοτάξια, γίνεται έκθεσή του σε χλωριόντα θαλασσινού νερού, βρόχινου και στα ρυπογόνα στοιχεία του αέρα, για εκτεταμένο χρόνο. Εκτιθέμενος σε όλα τα προαναφερθέντα προκαλείται διάβρωση στην επιφάνειά του. Έτσι, λοιπόν, κρίνεται πως η κατάλληλη αποθήκευση των οπλισμών είναι οι στεγανοποιημένοι χώροι. Σε γενικές γραμμές, πριν τη χρήση του χάλυβα προτείνεται η μη εμφάνιση τυχόν αλλοιώσεων ή παραμορφώσεων στον χάλυβα, προκειμένου να μην επιταχύνεται η διάβρωσή του.
- Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί πως τα οξειδία επηρεάζουν την μηχανική ικανότητα του χάλυβα, αφού γίνονται αλλαγές επί της διατομής του. σημειώνεται, επίσης, ότι η οξείδωση προκαλεί μείωση της αντοχής και της δύναμής του, με συνέπεια η κατασκευή να χαρακτηρίζεται από στατική ανεπάρκεια.
- Προς περιορισμό των συνεπειών της φωτιάς σε κάποια κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος, απαιτείται να ληφθούν υπόψη τα εξής: α) ο υψηλός βαθμός αερισμού που οδηγεί στη δημιουργία υψηλών θερμοκρασιών, β) ο χάλυβας ψυχρής έλασης, που λόγω υψηλών θερμοκρασιών αποκτά αρκετές φθορές, γ) προτιμώνται οι συνεχόμενες δικοί και τα πολύστυλα πλαισίων για χρήση στατικού συστήματος, δ) είναι προτιμότερη η χρήση του ασβεστολιθικού αδρανές εν συγκρίσει με το πυριτικό, ε) σε περίπτωση μεγάλης διατομής, η θερμοκρασία που διεισδύει βραδέως αποτελεί εμπόδιο στο να χαθεί σε μεγάλο ποσοστό η αντοχή των στοιχείων, στ) οι πλάκες μπορεί να αυξήσουν την αντοχή τους σε περίπτωση επέκτασης μέρους των οπλισμών στα ανοίγματα του άνω πέλματος, ζ) απαιτείται να διαστρώνεται καλά το σκυρόδεμα, προκειμένου να μην υπάρχουν ανωμαλίες

επί των επιφανειών, και να αυξηθεί η ανθεκτικότητα, και η) λόγω των υψηλών θλιπτικών τάσεων αντοχής και των ράβδων με μεγάλη διάμετρο διατηρείται σε υψηλότερο βαθμό η ανθεκτικότητα και κατόπιν της θέρμανσης.

- Προς λήψη των κατάλληλων μέτρων για να αντιμετωπιστούν οι διαβρώσεις, κρίνεται αναγκαία η γνώση της ποσότητας των χλωριόντων, του βάθους που έχει εισέλθει η ενανθράκωση, των διαβρώσεων του χάλυβα, καθώς και των αντίστοιχων απωλειών διατομής, εξαιτίας της υγρασίας του σκυροδέματος και της διαπερατότητας. Κατά συνέπεια, λαμβάνοντας υπόψη τα άνω, είναι εφικτή η καταλληλότερη επιλογή λύσεων.
- Για τα δεδομένα μιας νέας κατασκευής, η οικονομικότερη και ασφαλέστερη λύση από κάθε άλλο προϊόν που προστατεύει από διαβρώσεις είναι να αυξηθεί το πάχος που έχει η επικάλυψη του οπλισμένου σκυροδέματος και να μειωθεί το πορώδες του.
- Το υλικό χρωματισμών που ουσιαστικά μειώνει τη διαπερατότητα του σκυροδέματος κοστίζει αρκετά. Εν αντιθέσει, το συνηθισμένο επίχρισμα, και ιδιαίτερος αυτό που εμπεριέχει ασβέστιο σε μεγάλο ποσοστό, αφού κάνει δέσμευση του CO₂ και των χλωριόντων, ελαττώνει τις πιθανότητες να προκληθεί διάβρωση. Επισημαίνεται πως ιδιαίτερα εποικοδομητικά είναι και τα επιχρίσματα που εφαρμόζονται, ακόμη και μετά το πέρας πολλών χρόνων, καθώς εμποδίζεται η διαδικασία της διάβρωσης.
- Αναφορικά με την παροχή προστασίας στον χάλυβα, η μόνη τεχνική που προστατεύει άμεσα τον οπλισμό είναι η καθοδική προστασία. Αν δεν είναι τόσες πολλές οι διαβρώσεις, τότε κρίνεται απαραίτητο η αντικατάσταση της επικάλυψης, ο καθαρισμός των ράβδων, και η προσθήκη εποξειδοτικής ρητίνης σε αυτές. Σε περίπτωση όμως που υπάρχουν εκτεταμένες διαβρώσεις, απαιτείται να ενισχυθούν ριζικά τα στοιχεία.

7^ο Κεφάλαιο: Πειραματικό μέρος – διάβρωση οπλισμένου σκυροδέματος σε παραθαλάσσια έργα

7.1 Αντικείμενο εργασίας

Είναι σαφές, πως το φαινόμενο διαβρώσεων ασκεί άμεση και δραστική επιρροή στη διάρκεια ζωής των μεταλλικών κατασκευών. Έχει ιδιαίτερη σημασία για την κατάλληλη και ασφαλή λειτουργία το γεγονός ότι οι διαβρώσεις μειώνουν την ανθεκτικότητα μιας κατασκευής. Ένας τρόπος προστασίας του μετάλλου είναι η χρήση αντιδιαβρωτικών χρωμάτων, δηλαδή οργανικών επικαλύψεων, όπως και των αναστολέων διάβρωσης επί του σκυροδέματος.

Στην προκείμενη εργασία, γίνεται διερεύνηση της κατάλληλης μεθόδου προστασίας, που παρέχουν οι επικαλύψεις, όπως και η χρήση αναστολέων διάβρωσης, εν συγκρίσει με την εμφάνιση διαβρώσεων στους οπλισμούς λόγω των χλωριόντων Cl και CO₂, σε περίπτωση ύπαρξης κατασκευών πλησίον θαλάσσιων περιβαλλόντων.

Στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος, χρησιμοποιείται επικάλυψη ειδικής εφαρμογής και βιομηχανικής χρήσης, όπως συμβαίνει σε περιπτώσεις δεξαμενών νερού, γεφυρών και πισινών.

Οι εν λόγω επικαλύψεις παρέχουν προστασία στον οπλισμό του σκυροδέματος και έχουν έμμεση δράση, δυσκολεύοντας τα χλωριόντα να διαχυθούν, τα οποία συνεισφέρουν και βοηθούν τον χάλυβα να παθητικοποιηθεί, και να προστατευθεί συνάμα το σκυροδέμα από την ενανθράκωση.

Ακολούθως, δόθηκε έμφαση σε δυο μεθόδους προστασίας του οπλισμού σκυροδέματος με αναστολείς διαβρώσεων, οι οποίοι επαλείφονται. Κρίθηκε, βέβαια, ουσιώδες να δημιουργηθούν τυφλές δοκιμές, άνευ αναστολέων διάβρωσης και οργανικών επικαλύψεων επί της επιφάνειας του οπλισμού.

Εν αρχή, δόθηκε έμφαση στην αντίδρασή τους στις διαβρώσεις μακράς διάρκειας, κάτι που έγινε μέσω μερικών εμβαπτίσεων των δοκιμίων σε διάλυμα 3.5% κ.β. NaCl, για διάστημα 236 ημερών. Το δυναμικό διαβρώσεων υπολογιζόταν τακτικά εντός αυτού του χρονικού διαστήματος. Τα προαναφερθέντα περιβάλλοντα αποτελούν προσομοίωση των διαβρώσεων σε παράκτιες και παραθαλάσσιες περιοχές, ή σε περιοχές όπου παρατηρείται μετακίνηση ιόντων χλωρίου.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για να εκτιμηθούν οι διαβρώσεις από ιόντα χλωρίων έκαναν χρήση ηλεκτροχημικών μετρήσεων, προκειμένου να προσδιοριστεί το δυναμικό, το ρεύμα των διαβρώσεων, η αντίσταση πόλωσης και ο ρυθμός διάβρωσης. Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων, έγινε μέτρηση της απώλειας της μάζας του εγκιβωτισμένου οπλισμού, και επιπροσθέτως ελέγχθηκε οπτικά.

7.2 Προετοιμασία

Προαπαιτούμενο βήμα της πειραματικής διαδικασίας είναι ο χάλυβας να προετοιμαστεί κατάλληλα πριν τον εγκιβωτισμό του στο σκυροδέμα, όπως και να καθαριστούν τα καλούπια, όπου θα χυτευτεί ο οπλισμός του σκυροδέματος.

Απαιτείται ο καθαρισμός της επιφάνειας της ράβδου από χάλυβα απ' τα οξείδια, με συνέπεια να ενεργοποιηθεί και να προσδεθεί καλύτερα με το τσιμεντοκονίαμα.

Έτσι, λοιπόν, έγινε εφαρμογή αναστολέων διάβρωσης σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος, το οποίο παρέμεινε για δέκα με δεκαπέντε λεπτά. Εν συνεχεία, χρησιμοποιώντας νερό από βρύση και απιονισμένο νερό προχωρήσαμε σε ξέπλυμα της ράβδου, και ακολούθως εμποτισμός σε διάλυμα ακετόνης. Μετά τον καθαρισμό της, τοποθετήθηκε σε ζυγό ακριβείας τεσσάρων δεκαδικών ψηφίων, για να ζυγιστεί.

Αντιστοίχως, έγινε καθαρισμός των καλουπιών και λείανση της εσωτερικής τους επιφάνειας, με συνέπεια να απομακρυνθούν τα υπολείμματα παλαιότερων χρήσεων, προκειμένου να διευκολυνθεί η αποκόλληση των δοκιμίων, αφού σκληρυνθούν.

7.3 Κατασκευή δοκιμίων

Στην προκείμενη εργασία έγινε κατασκευή δεκαοχτώ συνολικά δοκιμίων εκ των οποίων τα έξι εμπεριείχαν αναστολείς διαβρώσεων, και δεν έγινε εφαρμογή εξωτερικής επικάλυψης. Στα άλλα έξι δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος που εμπεριείχαν αναστολείς διάβρωσης τύπου Sika® FerroGard® -901+, έγινε χρήση επικαλύψεων, όπως και στα υπόλοιπα έξι δοκίμια αναφοράς, που δεν εμπεριείχαν ούτε αναστολείς διαβρώσεων ούτε ήταν εφικτή η εφαρμογή οργανικής επικάλυψης στο εξωτερικό μέρος,

Για το σύνολο των δοκιμίων έγινε χρήση τσιμέντου τύπου CEM II 32.5N, χημικής σύστασης που παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.1, ενώ ως αδρανή υλικά έγινε χρήση χαλικιών, ψηφίδων και άμμου σε αναλογίες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.3, όπου γίνεται προβολή αναλυτικής μελέτης σύνθεσης για τις κατασκευές των δοκιμίων. Έγινε χρήση πόσιμου νερού, ενώ η αναλογία νερού – τσιμέντου ήταν 0.62. Ο οπλισμός διαμέτρου 10mm ήταν τύπου B500C, ύψους 100mm, βάσει του προτύπου ΕΛΟΤ 1421 -3. Ακόμη, έγινε χρήση οπλισμών τύπου B500C χημικής σύστασης % που φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

		Ποσοστιαία συγκέντρωση	
SiO ₂	20.67		56.80
Al ₂ O ₃	4.99	C2S	16.49
Fe ₂ O ₃	3.18	C3A	7.85
CaO	63.60	C4AF	9.67
MgO	2.73		
K ₂ O	0.37		
Na ₂ O	0.29		
SO ₃	2.414		
CaO(f)	2.41		
LOI	2.52		

Πίνακας 7.1: % Ορυκτολογική Σύσταση τσιμέντου Portland (OPC) τύπου Π32.5N

			S		Si	Ni	Cr	Cu	V	Mo
%	0.22	1.24	0.044	0.032	0.28	0.10	0.10	0.52	0.075	0.028

Πίνακας 7.2: % Χημική σύσταση χαλύβων B500C

ΥΛΙΚΑ	ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ	
	1m ³	1kg
τσιμέντο	285	12825
χαλίκι	520	2340
ψηφίδα	290	13050
αμμος	1100	49500
νερο	185	8325
προσμικτο	5,2	67
συνολο	2380	

Πίνακας 7.3: Σύθεση υλικών δοκιμίων οπλισμένου σκυροδέματος

Η χρήση του δοκιμίου οπλισμένου σκυροδέματος έγινε προς εκτίμηση της διάβρωσης μακράς διάρκειας, ενώ έγινε μερικώς εμβαπτισμός του σε διάλυμα 3.5% κ.β. NaCl.

Έγινε χρήση οπλισμού τύπου B500C διαμέτρου 10mm, ύψους 10mm, βάσει του προτύπου ΕΛΟΤ 1421-3. Η αναλογία σε άμμο/τσιμέντο/νερό ήταν 1/3/0.55, ενώ τα δοκίμια ήταν κυλινδρικής μορφής, με διάμετρο 40mm και με μήκος 100mm. Η τοποθέτηση του χαλύβδινου οπλισμού ήταν ομοαξονική, και προτού εγκιβωτιστεί έγινε καθαρισμός βάσει του ISO/DIS 8407.3, και ζυγίστηκε ακριβώς 0.1mg.

Η τοποθέτηση του οπλισμού έγινε 20mm απ' τη βάση που είχαν τα δοκίμια. Η παραμονή των δοκιμίων στα καλούπια διήρκεσε ένα εικοσιτετράωρο, σε θερμοκρασία 20°C, και με σχετική υγρασία RH=100%, και κατόπιν βγήκαν από τα καλούπια.

Η ξήρανση και η σταθεροποίηση των δοκιμίων οπλισμένου σκυροδέματος έγινε σε εργαστήριο και διήρκεσε οχτώ ημέρες. Για τη λήψη ηλεκτροχημικών μετρήσεων, η υλοποίηση της ηλεκτρικής συνέχειας του οπλισμού έγινε με χάλκινα καλώδια περιμετρικά κάθε οπλισμού, καθώς και με τη χρήση ενός μείγματος δυο διαφορετικών εποξειδικών ρητινών, προς κάλυψη του εκτεθειμένου μέρους του οπλισμού και προστασίας από τις διαβρώσεις που προκαλούνται απ' την ατμόσφαιρα.

7.4 Σύστημα επικάλυψης

Για να επικαλυφθούν οι επιφάνειες δοκιμίων, έγινε χρήση και του αντίστοιχου ασταριού ως πρώτη στρώση, με απώτερο σκοπό την προετοιμασία της επιφάνειας και τη βελτίωση της πρόσφυσης, αφού έγινε η επικάλυψη.

Η εφαρμογή της επικάλυψης έγινε σε δυο στρώσεις με χρήση πινέλου, με την δεύτερη στρώση να ακολουθεί την πρώτη σε απόσταση ενός εικοσιτετράωρου. Μετά την ολοκλήρωση της δεύτερης στρώσης, τα δοκίμια αφήνονται στο εργαστήριο το λιγότερο για επτά ημέρες, προτού εκτεθούν σε περιβάλλον διάβρωσης.

Η επικάλυψη έγινε με ένα αστάρι οπλισμού (brushable steel protection primer EN 1504-7), που παρασκευάστηκε από την εταιρεία «*MARMOLINE – Προηγμένα οικοδομικά υλικά*», και ονομαζόταν «*MSTEEL 44, 100% ελληνικό προϊόν*». Το προϊόν αραιώθηκε με νερό βρύσης, σε αναλογία τσιμεντοχρώματος/νερού 2/1, σε αντίθεση με την αναγραφόμενη που όριζε 4/1. Η συγκεκριμένη παρέμβαση έγινε για να εφαρμοστεί το αστάρι φέροντας τα μέγιστα δυνατά αποτελέσματα.

7.5 Διαβρωτικό περιβάλλον έκθεσης δοκιμίων

Μετά την εφαρμογή και τη ξήρανση του ασταριού, γίνεται τοποθέτηση όλων των δοκιμίων σε διάλυμα από χλωριούχο νάτριο, αποσκοπώντας στην ταχύτερη διάβρωσή τους, στα πλαίσια διαβρωτικών συνθηκών. Η διάλυση της σκόνη NaCl έγινε κατά 3.5% κ.β. σε νερό βρύσης, και έγινε χρήση 2lt H₂O και 70gr NaCl για να παρασκευαστεί το αναγκαίο διαβρωτικό περιβάλλον. Η διάρκεια του πειράματος κράτησε γύρω στους έντεκα μήνες, λαμβάνοντας μετρήσεις για το δυναμικό και για το ρεύμα διάβρωσης πολύ συχνά.

8^ο Κεφάλαιο: Μέθοδοι εκτίμησης αντιδιαβρωτικών μέσων

Η εκτίμηση του κατά πόσο αποτελεσματική είναι η επικάλυψη έγινε με δυο τρόπους:

- i. Εφαρμόζοντας ηλεκτροχημικές μεθόδους (διάβρωση μακράς διάρκειας, γραμμική πόλωση).
- ii. Αποτιμώντας την απώλεια μάζας οπλισμού, αφού τα δοκίμια εκτέθηκαν σε διαβρωτικές συνθήκες.

8.1 Ηλεκτροχημικές μετρήσεις αποτίμησης διάβρωσης

8.1.1 Μέτρηση δυναμικού διάβρωσης (OCP)

Προς εκτίμηση της διαβρωτικής κατάστασης στην οποία βρίσκεται ο χάλυβας, ακολουθείται μια πολύ συνηθισμένη μέθοδος, που αποτυπώνει χρονικά το δυναμικό διάβρωσης (E_{corr}). Ωστόσο, η τεχνική αυτή χαρακτηρίζεται ως καταστροφική, αν και μέσω αυτής παρακολουθείται και χαρακτηρίζεται η κατάσταση που έχει το οπλισμένο σκυρόδεμα, σε συνάρτηση με τον χρόνο. Ένα εκ των μειονεκτημάτων της μεθόδου είναι η μη παροχή πληροφοριών στο ζήτημα της κινητικής διάβρωσης, με αποτέλεσμα να γνωστοποιείται μόνο η κατάσταση οπλισμού, και όχι με ποιόν ρυθμό προχωρά η εξέλιξη του φαινομένου.

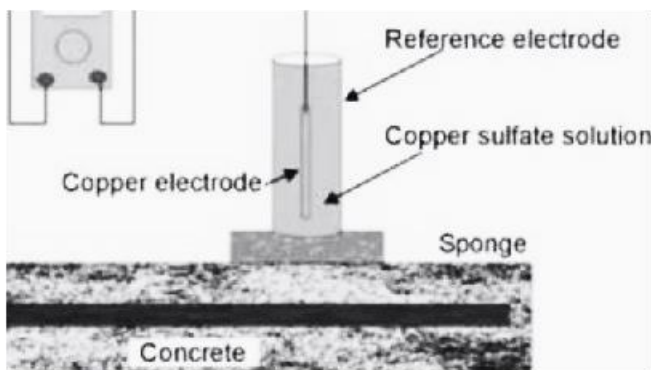
8.1.2 Αρχή μεθόδου

Με τους όρους δυναμικό διάβρωσης (E_{corr}) ή δυναμικό ισορροπίας ή δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος (EOCP) νοείται η διαφορά δυναμικού μεταξύ του χαλύβδινου οπλισμού (ημιστοιχείο) και του ηλεκτροδίου αναφοράς (ημιστοιχείο). Οι τιμές είναι αποτέλεσμα του ηλεκτροδίου αναφοράς και της κατάστασης που βρίσκεται ο χάλυβας.

Δεν γίνεται άμεση μέτρηση από την επιφάνεια του σκυροδέματος των τιμών του δυναμικού διάβρωσης (Σχήμα 8.1), εξαιτίας του πάχους της επικάλυψης που έχει το σκυρόδεμα. Ως εκ τούτου, παρατηρείται επίδραση στις τιμές α) από την πτώση του δυναμικού (iR drop) που απορρέει από την επικάλυψη του σκυροδέματος, κα β) από το δυναμικό συνένωσης/ επαγόμενα ρεύματα (junction potentials).

Για να συνδεθεί ηλεκτρολυτικά ο οπλισμός και το ηλεκτρόδιο αναφοράς κρίνεται βαρυσήμαντο τα ηλεκτρικά κυκλώματα να είναι κλειστά, και η μέτρηση των δυναμικών

διάβρωσης να μπορεί να γίνει με ένα βολτόμετρο μεγάλης εσωτερικής αντίστασης, ούτως ώστε το ρεύμα, όπως και το γινόμενο IR να είναι μηδέν.



Σχήμα 8.2: Μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα

8.1.3 Ηλεκτρόδια αναφοράς

Κάθε φορά κρίνεται αναγκαίο να αναφέρεται το είδος του ηλεκτροδίου αναφοράς που χρησιμοποιείται, για να μετρηθεί το δυναμικό διάβρωσης. Κατά βάση, στην πράξη, γίνεται χρήση των ηλεκτροδίων που περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα, όπου γίνεται προβολή και της τιμής τους, σύμφωνα με το πρότυπο ηλεκτροδίου του υδρογόνου (SHE).

Πίνακας 8.1: Συνήθη ηλεκτρόδια αναφοράς για μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης

ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	Δυναμικο εναντ ηλεκτροδίου υδ
κεκορεσμένου χαλου/θεικου χαλκου κεκορεσμένου καλομελινα	CSE	+ 0,318 vs SHE
(Hg/Hg ₂ Cl ₂)KCl	SCE	+ 0,241 vs SHE
χλωριουχου αργυρου(Ag/AgI)KCl	SSCE	+ 0,199 vs SHE

Για επιτόπια μέτρηση, γίνεται κυρίως χρήση ηλεκτροδίων κεκορεσμένου χαλκού/θεικού χαλκού, καθώς αντέχουν πολύ περισσότερο και προσφέρουν μεγάλη ακρίβεια και

επαναληψιμότητα στις μετρήσεις. Η χρήση των άλλων ηλεκτροδίων γίνεται κατά κύριο λόγο σε εργασιακές συνθήκες.

8.1.4 Κατάσταση σκυροδέματος σε σχέση με το δυναμικό διάβρωσης

Ένδειξη της κατάστασης στην οποία βρίσκεται το οπλισμένο σκυρόδεμα, που σημαίνει η ενεργητικότητα ή μη των χαλύβδινων οπλισμών, αποτελεί η τιμή που έχει το δυναμικό διάβρωσης σε συνάρτηση με τον χρόνο. Ωστόσο, υπάρχουν πολλές παράμετροι που καθορίζουν την τιμή του δυναμικού, όπως το πάχος που έχει η επικάλυψη, η αντίσταση που προβάλλει το σκυρόδεμα (περιεχόμενη υγρασία), καθώς και το οξυγόνο που διατίθεται.

Πίνακας 8.2: Κατάσταση σκυροδέματος και εύρος τιμών δυναμικού διάβρωσης

κατασταση σκυροδεματος		δυναμικο Cu/CuSO4
σκυροδεμα κορεσμενο σε νερο σε περιβαλλον απουσιας οξυγονου	-	0,9....- 1,0V
σκυροδεμα με υγρασια και χλωριοντα	-	0,4....- 0,6V
σκυροδεμα με υγρασια χωρις χλωριοντα	+	0,1....-0,2
ενανθρακωμενο σκυροδεμα με υγασια	+	0,1....-0,4
ξηρο ενανθρακωμενο σκυροδεμα	+	0,2....0V
ξηρο σκυροδεμα	+	0,2....0 V

Βάσει του προτύπου ASTM C876-87, η τιμή που έχει το δυναμικό διάβρωσης είναι ένδειξη της κατάστασης του οπλισμένου σκυροδέματος.

Πίνακα 8.3: Πιθανότητα διάβρωσης αναλόγως της τιμής του δυναμικού διάβρωσης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87¹

Δυναμικο διαβρωσης (mV)vsSCE	πιθανοτητα διαβρωσης
>-126	παθητικη κατασταση (90% πιθανοτητα,ο οπλισμος δε διαβρωνεται)
126 to - 276	ασαφης κατασταση
<-276	υψηλη (90% κινδυνος διαβρωσης)
<-426	διαβρωση σε εκτεταμενο βαθμο

8.2 Τεχνική γραμμικής πόλωσης (LPR)

Μια τεχνική που χρησιμοποιείται κατά το πλείστον για την μέτρηση των βασικών ηλεκτροχημικών παραμέτρων, κατά τη διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος, είναι η τεχνική της γραμμικής πόλωσης. Η διαδικασία που ακολουθείται σε αυτή την τεχνική αναφέρεται επακριβώς στο πρότυπο ASTM G59 -97(2009). Παρακάτω, γίνεται περιγραφή των βασικών θετικών χαρακτηριστικών της εν λόγω τεχνικής:

- i. Ιδιαίτερα χρήσιμη για πείραμα συγκριτικού τύπου, όπως η ποιοτική εκτίμηση διάφορων αναστολέων, είναι η ταχύτητα με την οποία γίνεται η μέτρηση.
- ii. Πρόκειται για μια μη καταστροφική μέθοδο, αφού γίνεται εφαρμογή μικρής πόλωσης και δεν ασκείται ιδιαίτερη επιρροή επί της επιφάνειας του δοκιμίου.
- iii. Για ακριβείς μετρήσεις, μπορεί να γίνει χρήση πολύ μικρού ποσοστού διαβρώσεως (πιο μικρή από 0.1 mpy), κάτι που δεν είναι εύκολο να γίνει κάνοντας εφαρμογή συμβατικών τεχνικών απώλειας βάρους ή τεχνικών αναλυτικής χημείας. Η μέτρηση χαμηλών ποσοστών διάβρωσης είναι ουσιαστικής σημασίας για κάποια βιομηχανία φαρμάκων, πυρηνικών, ή τροφίμων, καθώς ακόμη και εύρεση ιχνών από ακαθαρσίες και μολύνσεις αποτελούν πρόβλημα.
- iv. Οι μετρήσεις που προκύπτουν απ' την εν λόγω τεχνική μπορεί να αξιοποιηθούν και σε κατασκευές που δεν είναι εφικτός ο οπτικός έλεγχος ή οι δοκιμές απώλειας βάρους, όπως συμβαίνει στην περίπτωση ενός υπόγειου αγωγού και δεξαμενής ή σε κάποιο τμήμα ενός εργοστασίου.
- v. Κατά το πλείστον, η ωμική πτώση είναι ασήμαντη, και με την αρωγή της ηλεκτρονικής δύναται πρακτικώς ο μηδενισμός της.

8.2.1 Αρχή μεθόδου

Προτείνεται η εφαρμογή της τεχνικής γραμμικής πόλωσης όταν επιδιώκεται να σαρωθεί το δυναμικό σε περιοχές πόλωσης $\pm 20\text{mV}$ απ' το δυναμικό διάβρωσης και να καταγραφεί το αντίστοιχο ρεύμα. Το πείραμα γίνεται σε ένα ηλεκτροχημικό κελί, στο οποίο υπάρχουν τρία ηλεκτρόδια. Ένα εξ αυτών είναι ο χαλύβδινος οπλισμός, ο οποίος είναι αποτέλεσμα των ηλεκτροδίων εργασίας. Το δεύτερο ηλεκτρόδιο είναι το κεκορεσμένο καλομέλανα (SCE), το οποίο αναφέρεται στο ηλεκτρόδιο αναφοράς, ενώ το τρίτο είναι η ράβδος άνθρακα που είναι βοηθητικό. Όπως ορίζουν αυτές οι διατάξεις, διαμορφώνεται η κινητική της ηλεκτροχημικής δράσης ενός μετάλλου, που δύναται να υποστεί διάβρωση το λιγότερο για τρεις λόγους. Συγκεκριμένα, λόγω της πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης (i_{corr}), του δυναμικού διάβρωσης (E_{corr}) και της σταθερής

Tafel (βα και βc), δηλαδή της καμπύλης πόλωσης (E-i). Έτσι, λοιπόν, γίνεται ο προσδιορισμός των αντιστάσεων πόλωσης R_p , όπως και των ρυθμών διάβρωσης.

8.2.2 Κατάσταση χάλυβα συνάρτηση μετρήσεων γραμμικής πόλωσης

Παράγοντες που επηρεάζουν τον υπολογισμό που γίνεται στον ρυθμό διάβρωσης είναι η θερμοκρασία και το ποσοστό υγρασίας. Οι μετρήσεις αυτές δείχνουν τη συσχέτιση που υπάρχει στο ρεύμα διάβρωσης και στις αντιστάσεις πόλωσης με την κατάσταση που βρίσκεται το οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως προβάλλεται μέσω δεικτών στον παρακάτω πίνακα

ηξκ

Πίνακας 8.3 : Συσχέτιση των τιμών της πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης χαλύβδινων οπλισμών σε σκυρόδεμα και της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα.

$i_{corr}(\mu A/cm^2)$	$R_p(k\Omega \cdot cm^2)$	κατάσταση οπλισμού
<0.1	>260	παθητική κατάσταση χαμηλός έως μέτριος ρυθμός διάβρωσης
0.1-0.5	52-260	μέτριος έως υψηλός βαθμός διάβρωσης
0.5-1	26-52	υψηλός ρυθμός διάβρωσης
>1	<26	υψηλός ρυθμός διάβρωσης

8.3 Απώλεια μάζας χαλύβδινων οπλισμών

Για τον υπολογισμό της απώλειας μάζας του χάλυβα σε οπλισμένο σκυρόδεμα, γίνεται μέτρηση του αρχικού βάρους που έχει ο οπλισμός, δηλαδή προτού εκτεθεί σε περιβάλλον διάβρωσης, εν αντιθέσει με το τελικό βάρος, που υπολογίζεται μετά την έκθεση του οπλισμού σε διάλυμα διάβρωσης. Πριν την καταγραφή το βάρους, απαιτείται απομάκρυνση των υπολειμμάτων σκουριάς και των εποξειδικών ρητινών απ' τον οπλισμό. Η διαφορά βάρους είναι αποτέλεσμα αφαίρεσης της τελικής τιμής της μάζας του οπλισμού από την αρχική. Έτσι, η μέτρηση των διαβρώσεων γίνεται με τον υπολογισμό του ποσοστού της μεταβολής που γίνεται στο βάρος του οπλισμού, όπως και του ρυθμού διάβρωσης τους.

Πριν το ζύγισμα των οπλισμών, γίνεται καλός καθαρισμός τους σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος, που ενέχει αναστολείς διάβρωσης. Έτσι, απομακρύνονται τα οξείδια από την επιφάνεια. Εν συνεχεία, χρησιμοποιώντας απιονισμένο νερό προχωρήσαμε σε ξέπλυμα αυτών, και κατόπιν σε εμβαπτισμό τους σε διάλυμα ακετόνης, προς απομάκρυνση λιπαρών ουσιών. Μετά το πέρας της

διαδικασίας, ζυγίζεται επακριβώς, κάτι που συμβαίνει αφού τα δοκίμια σπάσουν και ο χαλύβδινος σπλισμός απεγκιβωτιστεί.

9^ο Κεφάλαιο: Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας

Στο προκείμενο κεφάλαιο, θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων της μέτρησης που διενεργήθηκε με την προαναφερθείσα μέθοδο. Έγινε η παρασκευή έξι δοκιμίων αναφοράς, με το όνομα (T), χωρίς να περιέχουν κανέναν αναστολέα και καμία επικάλυψη, άλλων έξι που ονομάστηκαν (Fer) λόγω του αναστολέα που χρησιμοποιήθηκε (Ferrogard), και άλλων που περιείχαν επικαλύψεις και αναστολείς (fer+βαφ).

9.1 Μέτρηση δυναμικού διάβρωσης

Για την επιτάχυνση της διάβρωσης των δοκιμίων, αυτά παρέμειναν εντός του διαλύματος διάβρωσης που περιείχε χλωριούχο νάτριο. Ακολούθως, γίνεται ενδελεχής παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων του δυναμικού διάβρωσης για κάθε κατηγορία δοκιμίων.

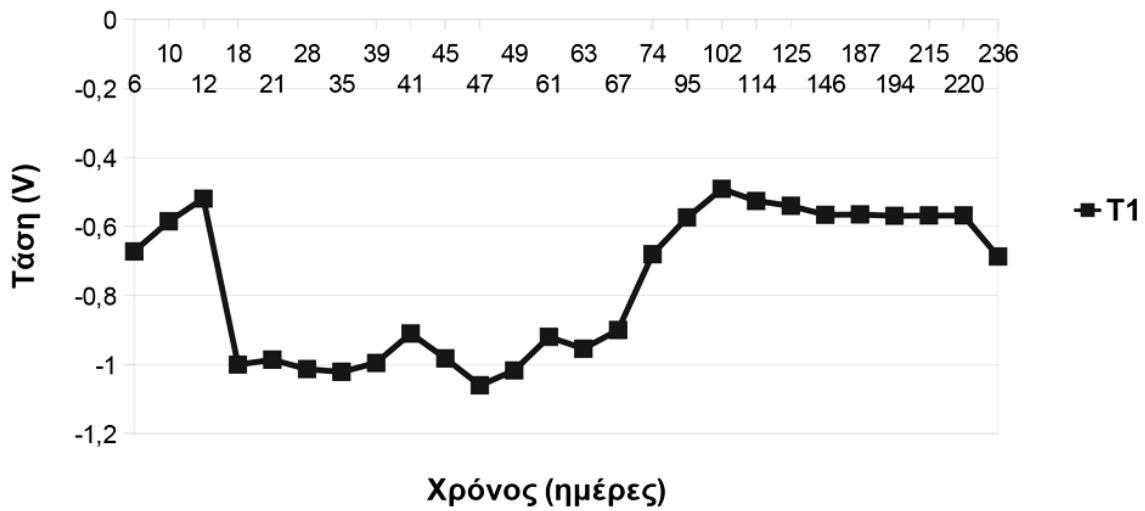
9.1.1 Αποτελέσματα δυναμικού διάβρωσης τυφλών δοκιμίων

Τα δοκίμια αναφοράς, όπως σημειώθηκε, αποτελούσαν μόνο από σπλισμένο σκυρόδεμα, και δεν επικαλυπτόντουσαν. Στον ακόλουθο πίνακα, όπως και στο διάγραμμα, γίνεται παρουσίαση των μετρήσεων δυναμικού διάβρωσης που φέρουν τα έξι αυτά δοκίμια μαζί με το συνολικό μέσο όρο. Όπως γίνεται αντιληπτό, απουσιάζει το δοκίμιο T3, καθώς μάλλον λόγω ατελειών κατασκευαστικής φύσεως δεν απέδιδε τις μετρήσεις που απαιτούνταν.

Πίνακας 9.1.1 Μέτρηση Δυναμικού διάβρωσης τυφλών δοκιμίων (Volt) σε συνάρτηση με το χρόνο

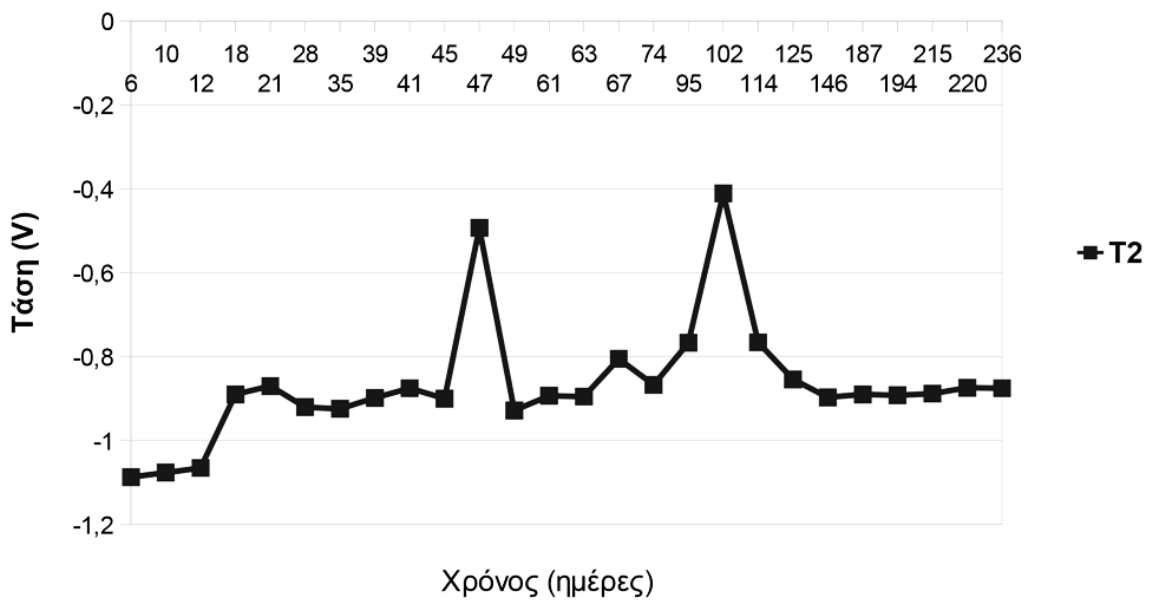
<i>Days</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T4</i>	<i>T5</i>	<i>T6</i>	<i>M.C</i>
6	-0,672	-1,087	-0,999	-0,28	-0,992	-0,8
10	-0,585	-1,076	-0,767	-0,282	-1,006	-0,7
12	-0,519	-1,065	-0,989	-0,27	-0,996	-0,7
18	-1	-0,89	-1,031	-0,286	-1,04	-0,7
21	-0,986	-0,87	-0,988	-0,274	-0,994	-0,7
28	-1,013	-0,92	-1,002	-0,281	-1,067	-0,8
35	-1,021	-0,924	-0,994	-0,31	-1,001	-0,8
39	-0,995	-0,898	-0,956	-0,28	-0,963	-0,8
41	-0,91	-0,875	-0,942	-0,265	-0,945	-0,7
45	-0,982	-0,9	-0,947	-0,256	-0,947	-0,8
47	-1,06	-0,493	-0,954	-0,938	-0,576	-0,7
49	-1,017	-0,928	-0,982	-0,302	-0,974	-0,8
61	-0,92	-0,893	-0,904	-0,25	-0,908	-0,7
63	-0,954	-0,895	-0,918	-0,267	-0,916	-0,7
67	-0,9	-0,805	-0,891	-0,242	-0,898	-0,7
74	-0,68	-0,867	-0,894	-0,256	-0,908	-0,7
95	-0,574	-0,767	-0,959	-0,308	-0,961	-0,7
102	-0,491	-0,411	-0,892	-0,253	-0,893	-0,5
114	-0,526	-0,766	-0,916	-0,3	-0,914	-0,6
125	-0,54	-0,854	-0,951	-0,347	-0,948	-0,7
146	-0,566	-0,897	-0,929	-0,313	-0,932	-0,7
187	-0,565	-0,89	-0,918	-0,317	-0,917	-0,7
194	-0,569	-0,892	-0,945	-0,348	-0,926	-0,7

Διάβρωση Δοκιμίου αναφοράς 1 σε σχέση με το χρόνο



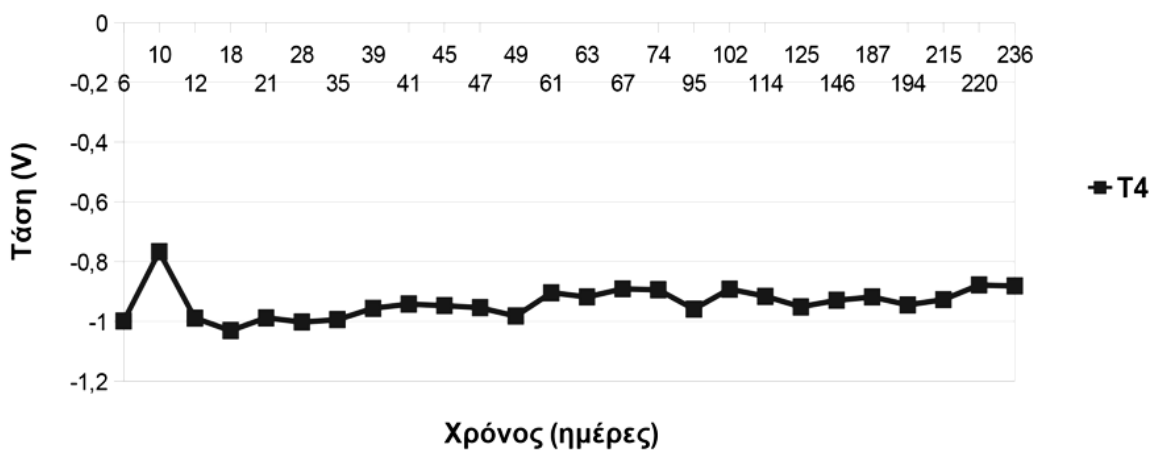
Διάγραμμα 1. Διάβρωση δοκιμίου αναφοράς T1 σε συνάρτηση με το χρόνο

Διάβρωση Δοκιμίου Αναφοράς 2 σε σχέση με το χρόνο



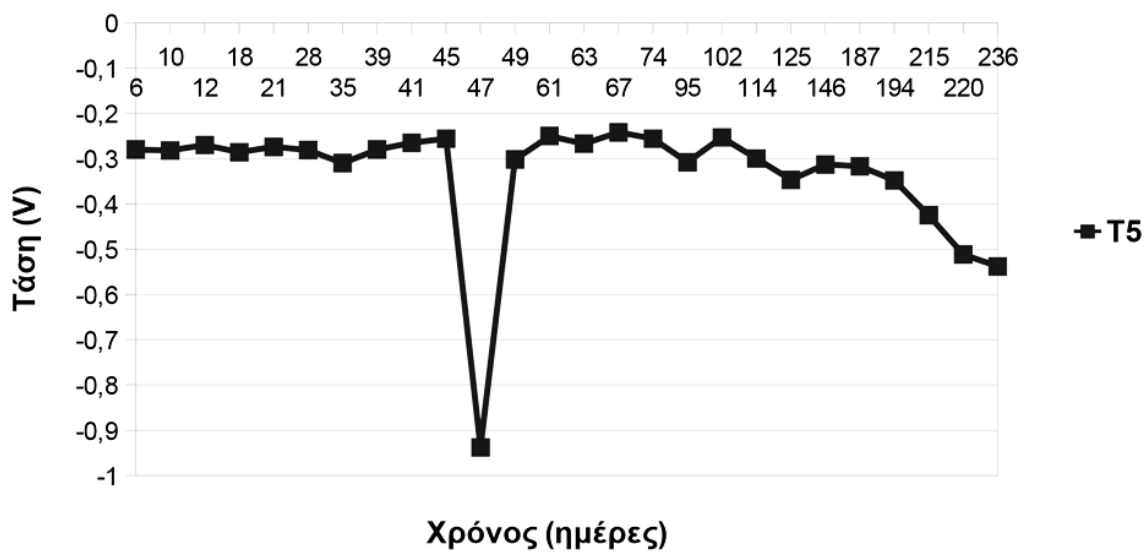
Διάγραμμα 2. Διάβρωση δοκιμίου αναφοράς T2 σε συνάρτηση με το χρόνο

Διάβρωση Δοκιμίου Αναφοράς 4 σε σχέση με το χρόνο

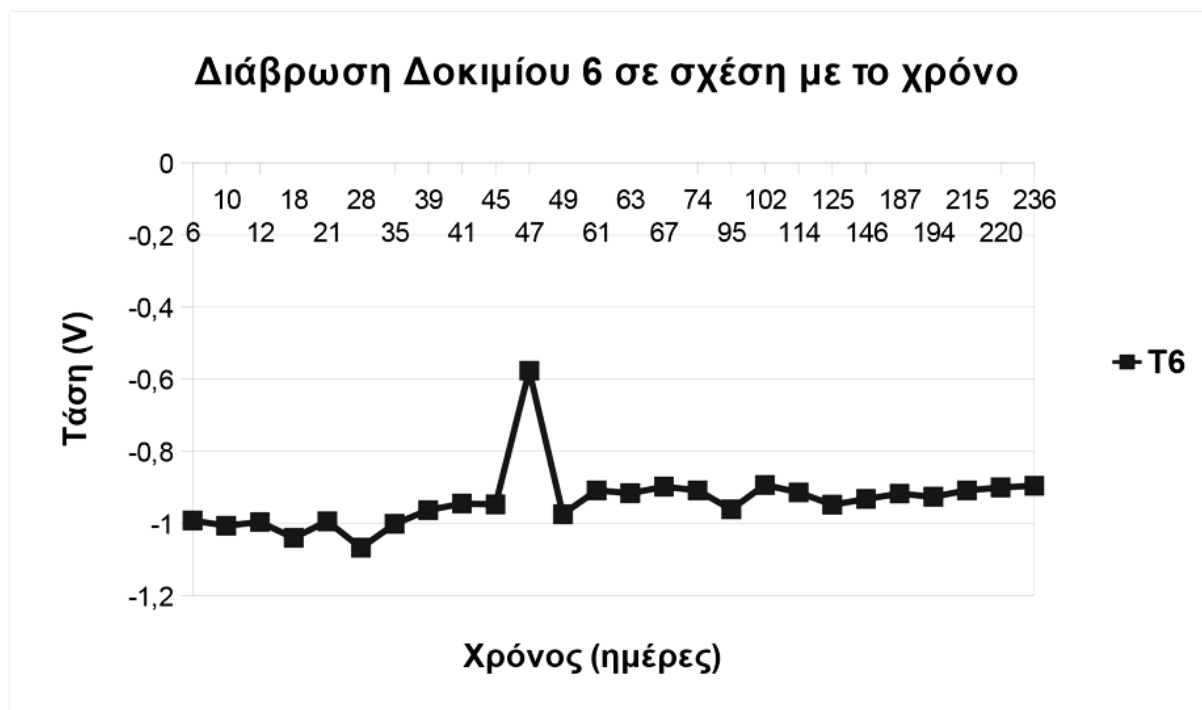


Διάγραμμα 3. Διάβρωση δοκίμιου αναφοράς T4 σε συνάρτηση με το χρόνο

Διάβρωση Δοκιμίου 5 σε σχέση με το χρόνο

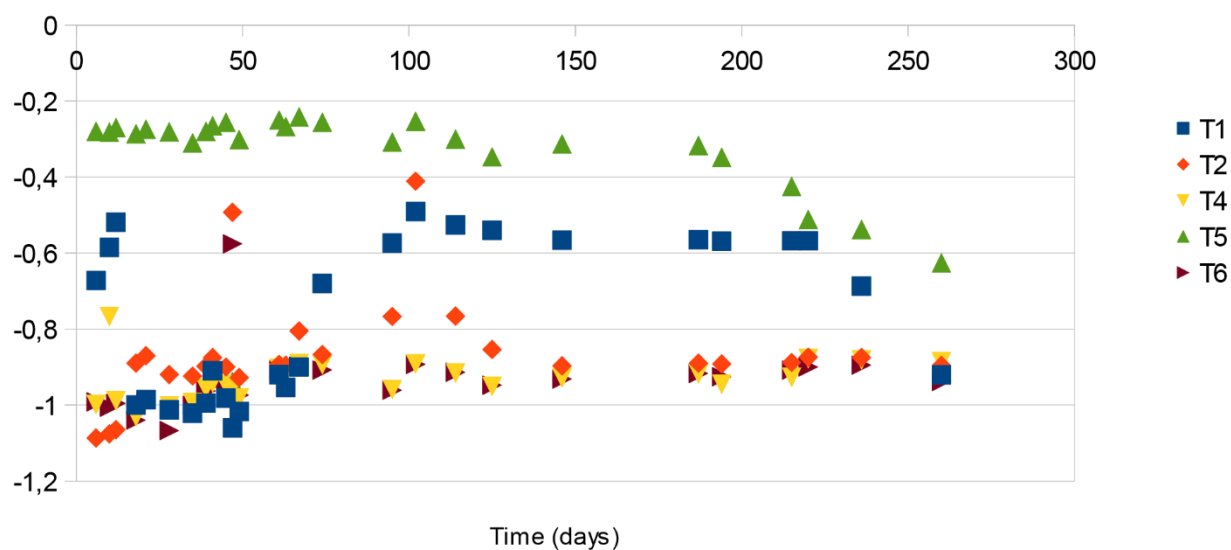


Διάγραμμα 4. Διάβρωση δοκίμιου αναφοράς T5 σε συνάρτηση με το χρόνο



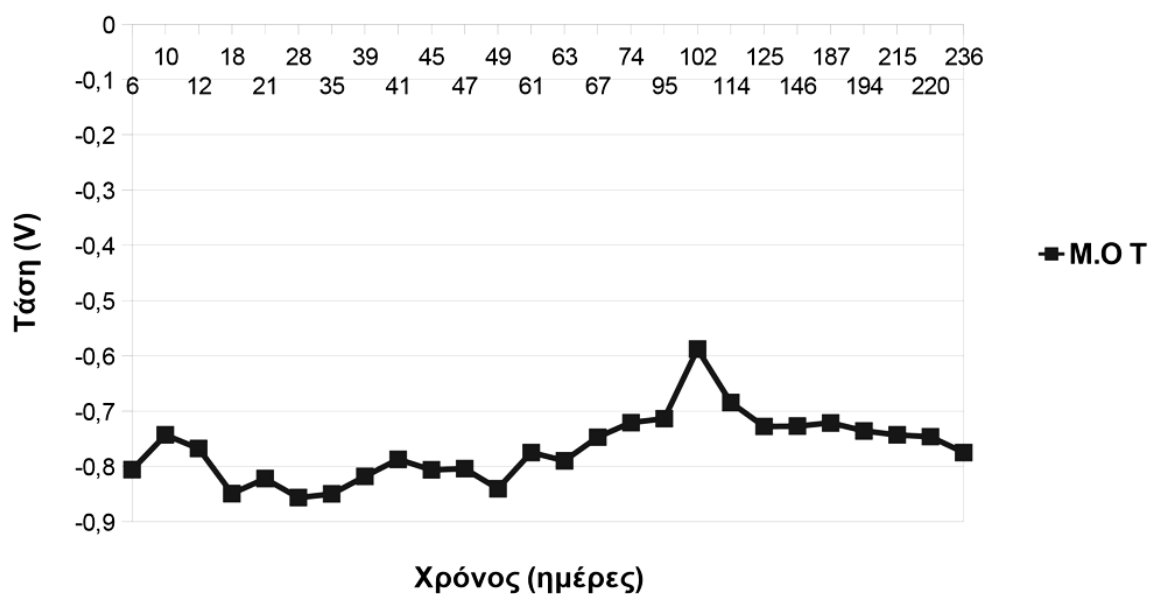
Διάγραμμα 5. Διάβρωση δοκίμιου αναφοράς T6 σε συνάρτηση με το χρόνο

Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Δυναμικού Δοκιμίων Αναφοράς ε συνάρτηση με το χρόνο



Διάγραμμα 6. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τιμών δυναμικού δοκιμίων αναφοράς σε σχέση με το χρόνο

Μ.Ο Διάβρωσης Δοκιμίων Αναφοράς σε σχέση με το χρόνο



Διάγραμμα 7. Μ.Ο Διάβρωσης δοκιμίων αναφοράς T σε συνάρτηση με το χρόνο

9.1.2 Αποτελέσματα μέτρησης δυναμικού δοκιμίων με αναστολέα διάβρωσης

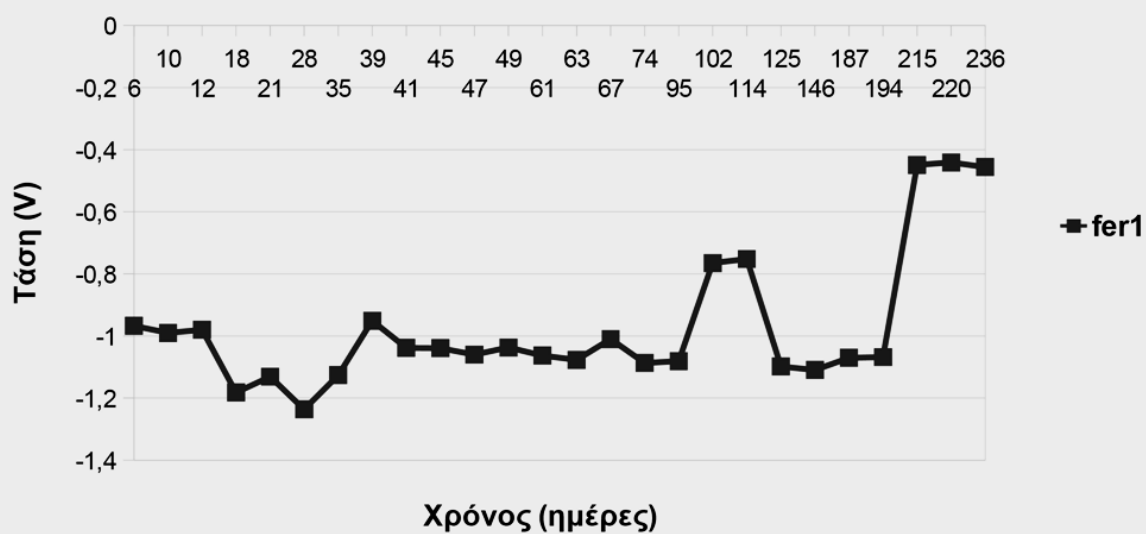
Στη συγκεκριμένη κατηγορία δοκιμίων, το σπλισμένο σκυρόδεμα από την εξωτερική του μεριά δεν έχει πειραχτεί, ενώ σε αυτό εμπεριέχονται αναστολείς διάβρωσης. Στα ακόλουθα διαγράμματα και στον πίνακα, φαίνονται για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά τόσο οι μετρήσεις που έγιναν στο δυναμικό διάβρωσης, όσο και ο συνολικός μέσος όρος.

Πίνακας 9.1.2. Μέτρηση δυναμικού διάβρωσης σε (Volt) για τα δοκίμια με αναστολέα σε συνάρτηση με το χρόνο

Days	fer1	fer2	fer3	fer4	fer5	fer6	Μ.Ο Τάσης(V)
6	-0,967	-1,01	-0,35	-0,884	-0,513	-0,386	-0,685
10	-0,99	-1,056	-0,381	-0,978	-0,515	-0,374	-0,7156666667

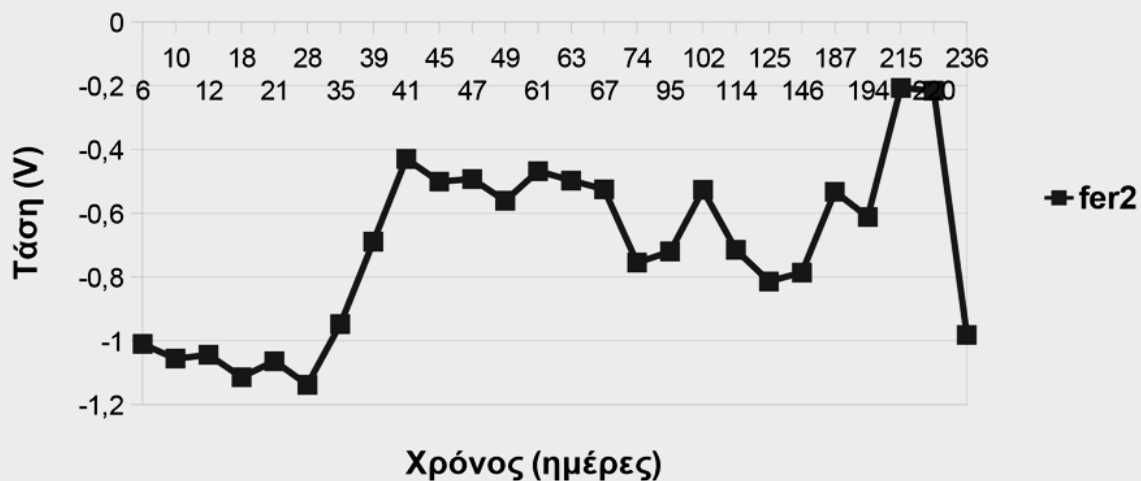
12	-0,98	-1,044	-0,432	-0,998	-0,524	-0,36	-0,723
18	-1,182	-1,114	-0,638	-1,074	-0,558	-0,37	-0,8226666667
21	-1,131	-1,064	-0,61	-1,02	-0,541	-0,352	-0,7863333333
28	-1,236	-1,138	-0,812	-1,099	-0,874	-0,573	-0,9553333333
35	-1,126	-0,948	-0,762	-0,998	-0,935	-0,58	-0,8915
39	-0,951	-0,689	-0,69	-0,966	-0,96	-0,695	-0,8251666667
41	-1,038	-0,43	-0,942	-0,957	-0,943	-0,707	-0,8361666667
45	-1,039	-0,501	-0,696	-0,959	-0,945	-0,741	-0,8135
47	-1,06	-0,493	-0,673	-0,954	-0,938	-0,576	-0,7823333333
49	-1,037	-0,561	-0,36	-0,973	-0,961	-0,562	-0,7423333333
61	-1,063	-0,468	-0,602	-0,919	-0,89	-0,362	-0,7173333333
63	-1,077	-0,498	-0,647	-0,926	-0,896	-0,361	-0,7341666667
67	-1,01	-0,525	-0,388	-0,902	-0,873	-0,242	-0,6566666667
74	-1,087	-0,755	-0,462	-0,918	-0,878	-0,718	-0,803
95	-1,081	-0,72	-0,545	-0,94	-0,825	-0,522	-0,7721666667
102	-0,765	-0,527	-0,371	-0,891	-0,683	-0,532	-0,6281666667
114	-0,752	-0,715	-0,642	-0,948	-0,652	-0,518	-0,7045
125	-1,098	-0,814	-0,677	-0,955	-0,923	-0,472	-0,8231666667
146	-1,109	-0,786	-0,62	-0,926	-0,901	-0,356	-0,783
187	-1,07	-0,533	-0,929	-0,903	-0,874	-0,244	-0,7588333333
194	-1,068	-0,612	-0,97	-0,909	-0,875	-0,39	-0,804
215	-0,449	-0,207	-0,545	-0,928	-0,889	-0,477	-0,5825
220	-0,441	-0,216	-0,474	-0,89	-0,849	-0,166	-0,506
236	-0,456	-0,982	-0,48	-0,877	-0,845	-0,666	-0,8425

Διάβρωση Δοκιμίου 1 με αναστολέα σε σχέση με το χρόνο



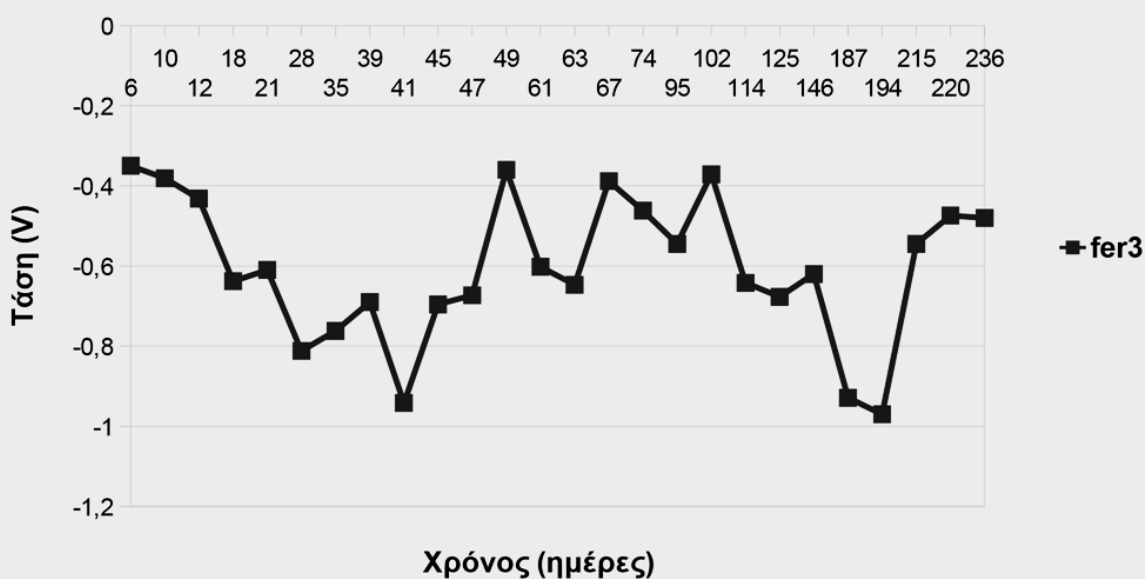
Διάγραμμα 8. Διάβρωση δοκιμίου με αναστολέα διάβρωσης *fer1* σε συνάρτηση με το χρόνο

Διάβρωση Δοκιμίου 2 με αναστολέα σε σχέση με το χρόνο



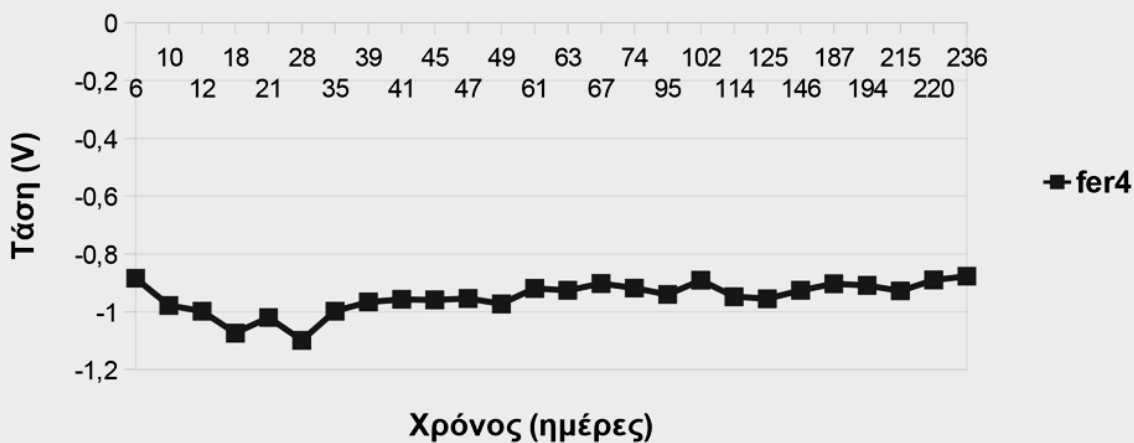
Διάγραμμα 9. Διάβρωση δοκιμίου με αναστολέα διάβρωσης *fer2* σε συνάρτηση με το χρόνο

Διάβρωση Δοκιμίου 3 με αναστολέα διάβρωσης σε σχέση με το χρόνο

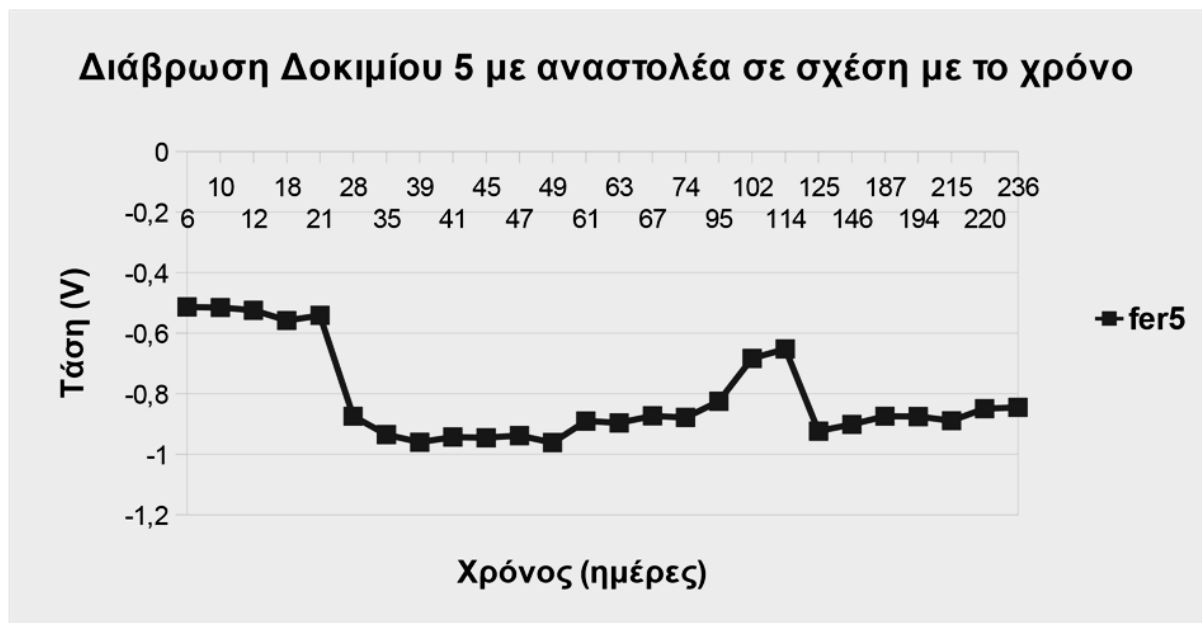


Διάγραμμα 10. Διάβρωση δοκιμίου με αναστολέα διάβρωσης *fer3* σε συνάρτηση με το χρόνο

Διάβρωση Δοκιμίου 4 με αναστολέα σε σχέση με το χρόνο



Διάγραμμα 11. Διάβρωση δοκιμίου με αναστολέα διάβρωσης *fer4* σε συνάρτηση με το χρόνο

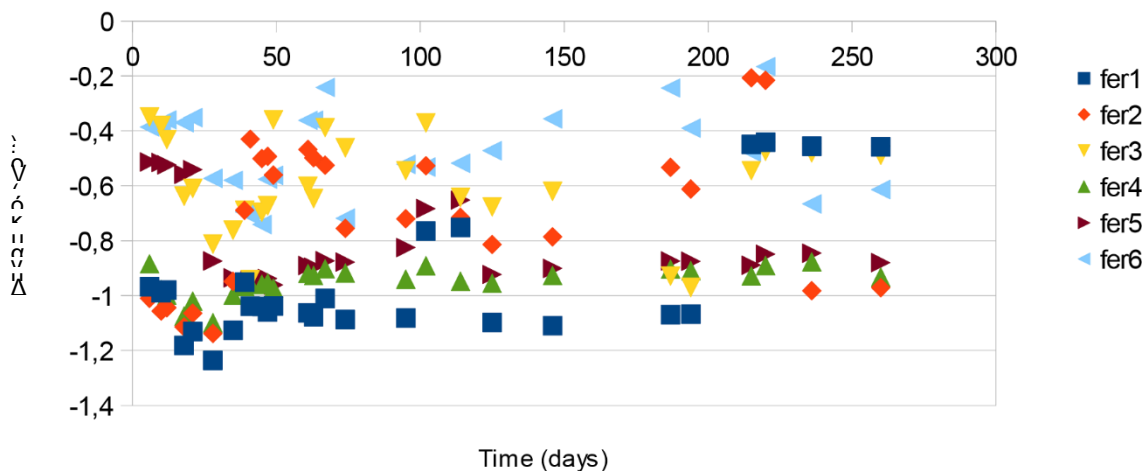


Διάγραμμα 12. Διάβρωση δοκιμίου με αναστολέα διάβρωσης *fer5* σε συνάρτηση με το χρόνο

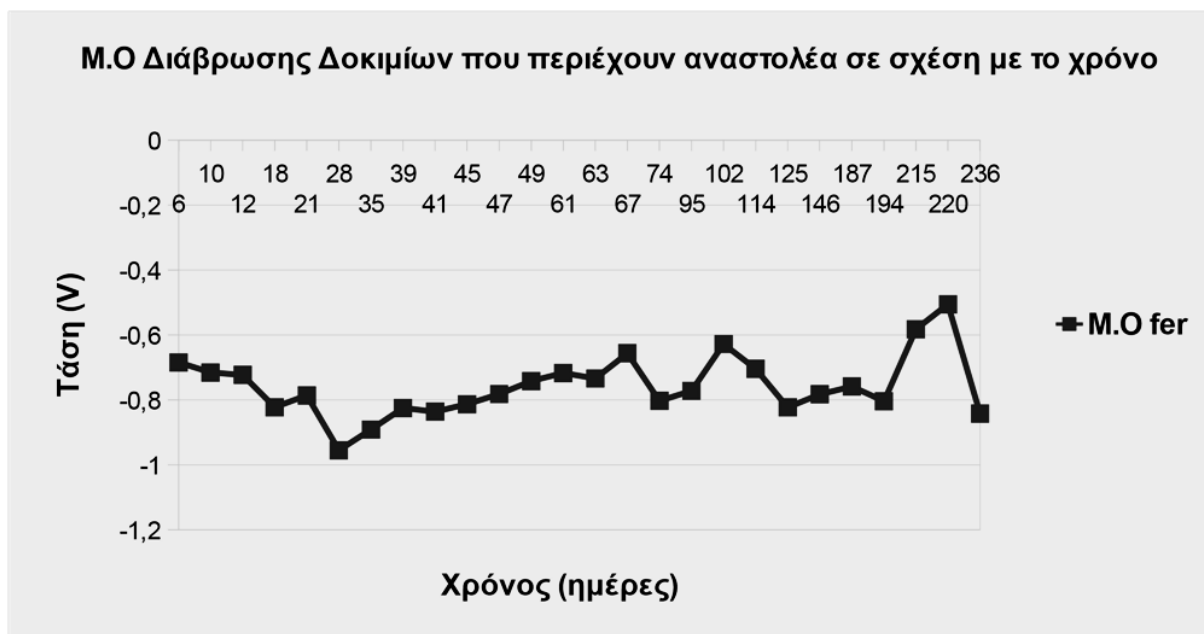


Διάγραμμα 13. Διάβρωση δοκιμίου με αναστολέα διάβρωσης *fer6* σε συνάρτηση με το χρόνο

Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Δυναμικού δοκιμίων με αναστολέα σε συνάρτηση με το χρόνο



Διάγραμμα 14. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τιμών δυναμικού δοκιμίων αναφοράς σε σχέση με το χρόνο



Διάγραμμα 15. Μ.Ο Διάβρωσης δοκιμίων με αναστολέα διάβρωσης *fer* σε συνάρτηση με το χρόνο

9.1.3 Αποτελέσματα δυναμικού διάβρωσης δοκιμίων με αναστολέα διάβρωσης και επικάλυψη

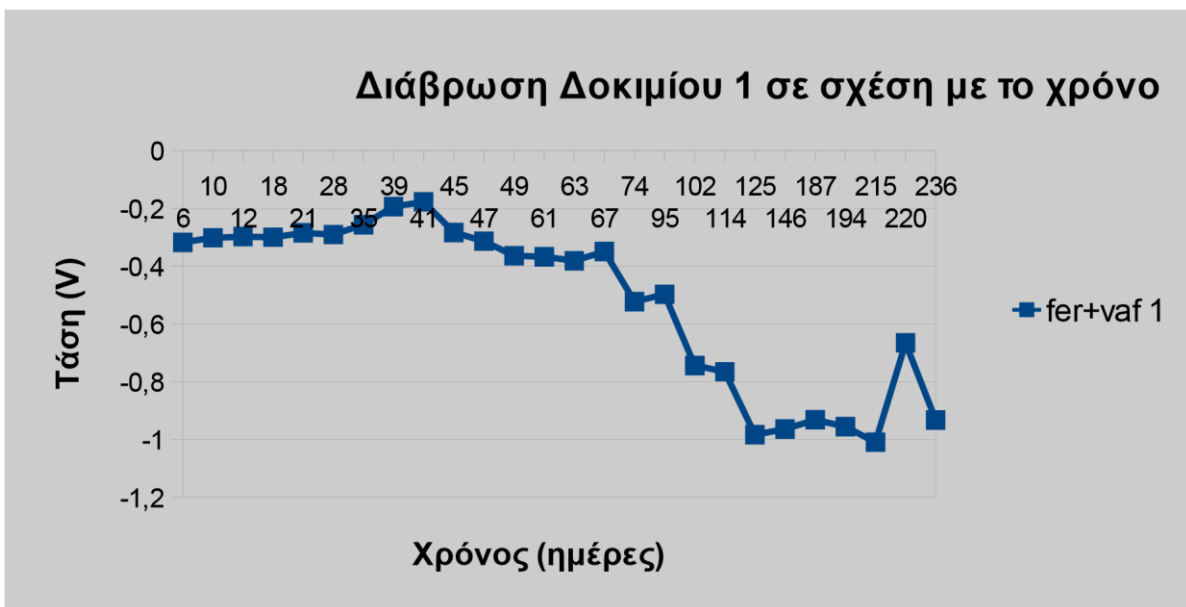
Σε αυτή την κατηγορία δοκιμίων, ο οπλισμός σκυροδέματος επικαλύπτεται επιφανειακά και γίνεται εφαρμογή αναστολέων διάβρωσης. Το δυναμικό διάβρωσης που έχει κάθε δοκίμιο και ο μέσος όρος τους υπολογίσθηκαν και παρουσιάζονται ακολούθως:

Πίνακας 9.1.3. Μέτρηση δυναμικού διάβρωσης σε (Volt) για τα δοκίμια με αναστολέα και βαφή σε συνάρτηση με το χρόνο

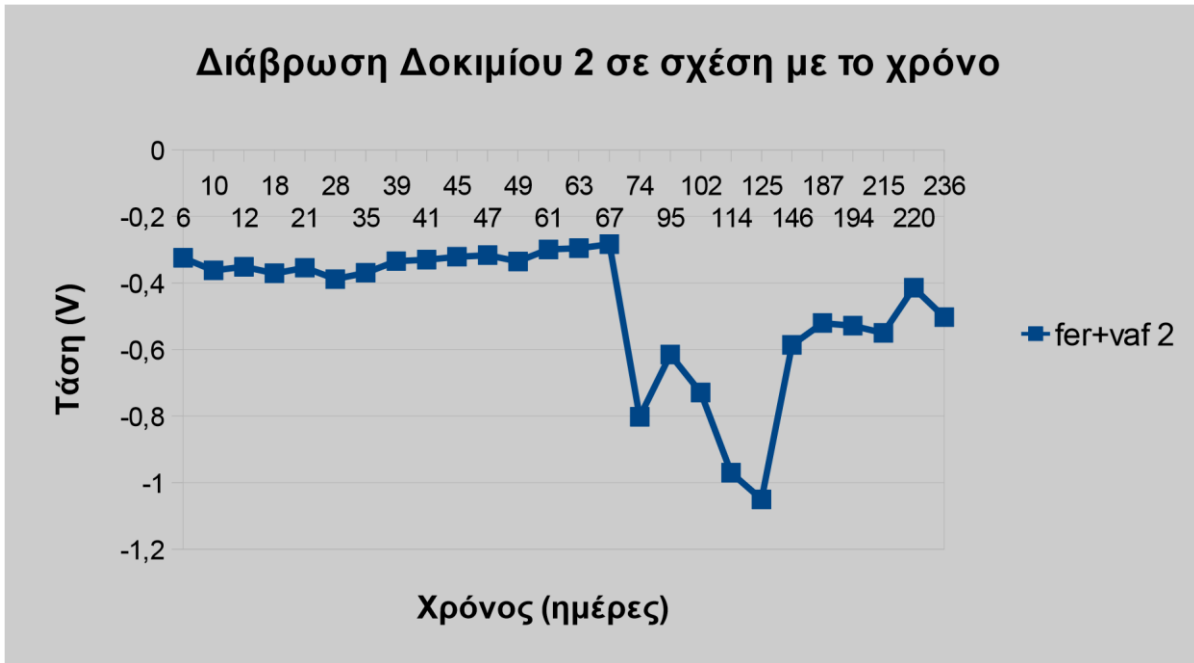
<i>Days</i>	<i>fer+vaf 1</i>	<i>fer+vaf 2</i>	<i>fer+vaf3</i>	<i>fer+vaf4</i>	<i>fer+vaf5</i>	<i>fer+vaf6</i>	<i>Μ.ΟΤάσης (v)</i>
6	-0,318	-0,324	-0,105	-0,129	-0,139	-0,126	-0,1901666667
10	-0,302	-0,362	-0,173	-0,126	-0,138	-0,122	-0,2038333333
12	-0,298	-0,351	-0,096	-0,123	-0,133	-0,116	-0,1861666667
18	-0,3	-0,371	-0,096	-0,129	-0,21	-0,118	-0,204
21	-0,285	-0,354	-0,093	-0,125	-0,134	-0,115	-0,1843333333

28	-0,291	-0,388	-0,103	-0,146	-0,154	-0,128	-0,2016666667
35	-0,257	-0,369	-0,251	-0,309	-0,352	-0,138	-0,2793333333
39	-0,194	-0,334	-0,306	-0,195	-0,289	-0,088	-0,2343333333
41	-0,178	-0,33	-0,262	-0,167	-0,267	-0,071	-0,2125
45	-0,284	-0,321	-0,261	-0,147	-0,224	-0,076	-0,2188333333
47	-0,314	-0,316	-0,25	-0,149	-0,2	-0,085	-0,219
49	-0,364	-0,335	-0,279	-0,175	-0,193	-0,104	-0,2416666667
61	-0,368	-0,299	-0,202	-0,38	-0,134	-0,083	-0,2443333333
63	-0,382	-0,295	-0,202	-0,318	-0,085	-0,093	-0,2291666667
67	-0,35	-0,283	-0,153	-0,404	-0,132	-0,086	-0,2346666667
74	-0,523	-0,802	-0,337	-0,885	-0,31	-0,393	-0,5416666667
95	-0,498	-0,615	-0,404	-0,504	-0,3	-0,09	-0,4018333333
102	-0,744	-0,729	-0,404	-0,594	-0,269	-0,074	-0,469
114	-0,766	-0,97	-0,721	-0,78	-0,556	-0,224	-0,6695
125	-0,984	-1,05	-0,809	-0,8	-0,833	-0,35	-0,8043333333
146	-0,964	-0,586	-0,847	-0,818	-0,892	-0,85	-0,8261666667
187	-0,932	-0,52	-0,807	-0,772	-0,867	-0,769	-0,7778333333
194	-0,956	-0,528	-0,819	-0,777	-0,875	-0,803	-0,793

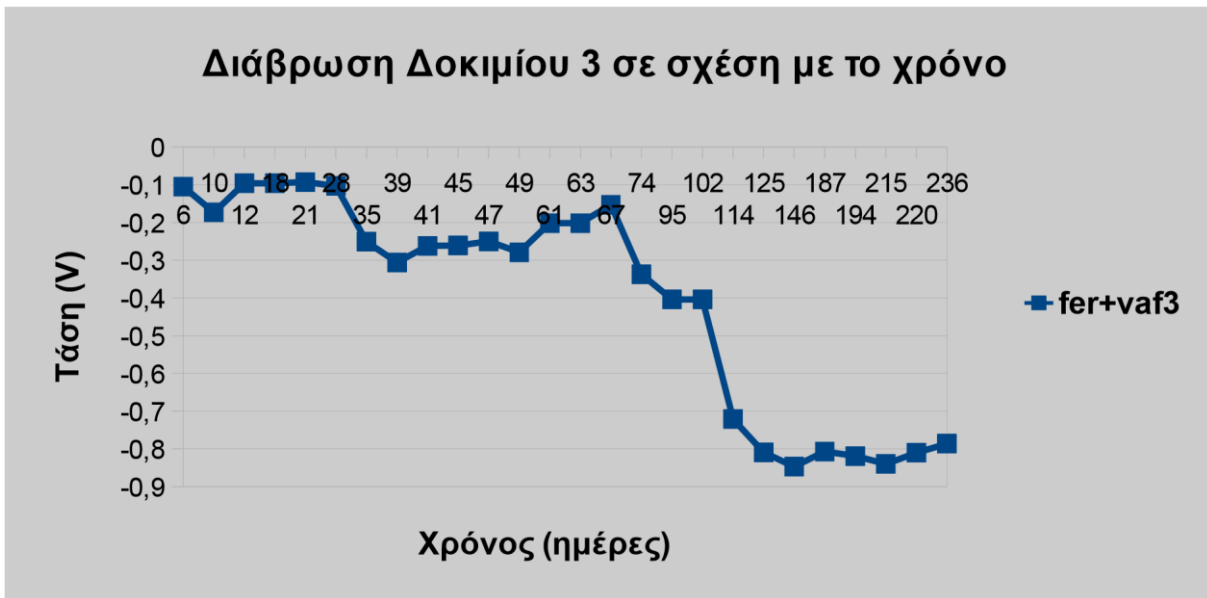
215	-1,01	-0,55	-0,84	-0,522	-0,701	-0,54	-0,6938333333
220	-0,666	-0,414	-0,81	-0,75	-0,776	-0,54	-0,6593333333
236	-0,933	-0,502	-0,786	-0,76	0,789	-0,76	-0,755



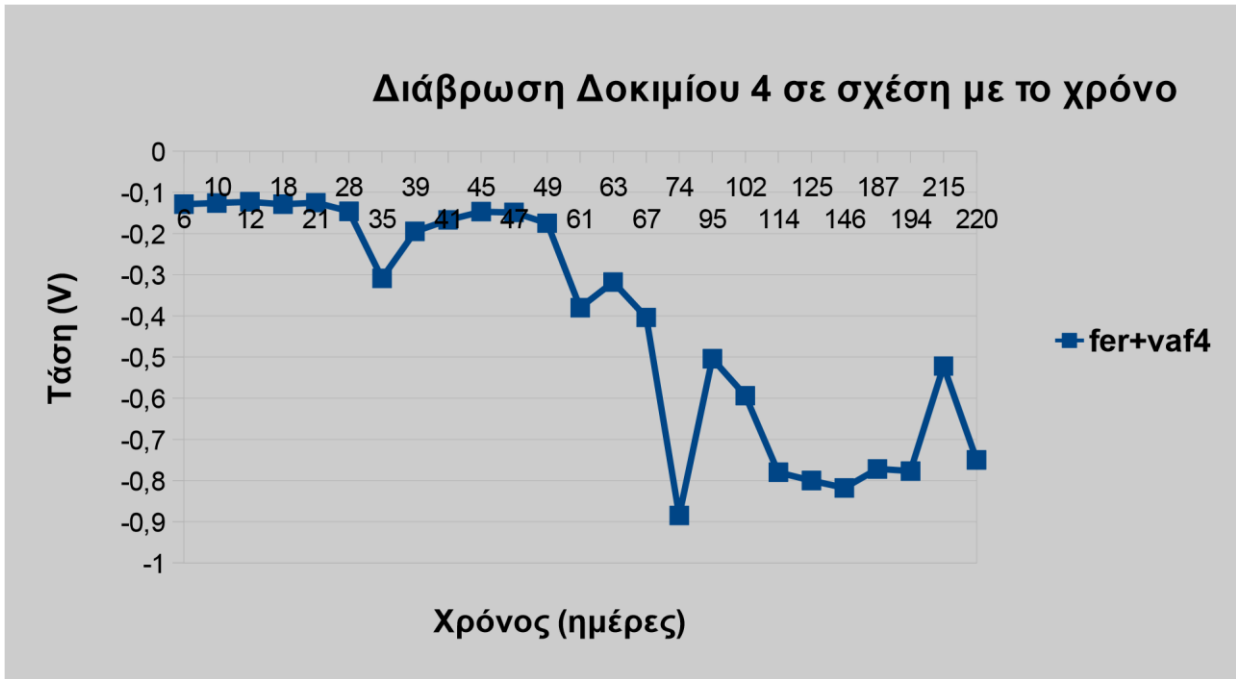
Διάγραμμα 16. Διάβρωση δοκίμιου με αναστολέα διάβρωσης και βαφή *fer+vaf 1* σε συνάρτηση με το χρόνο



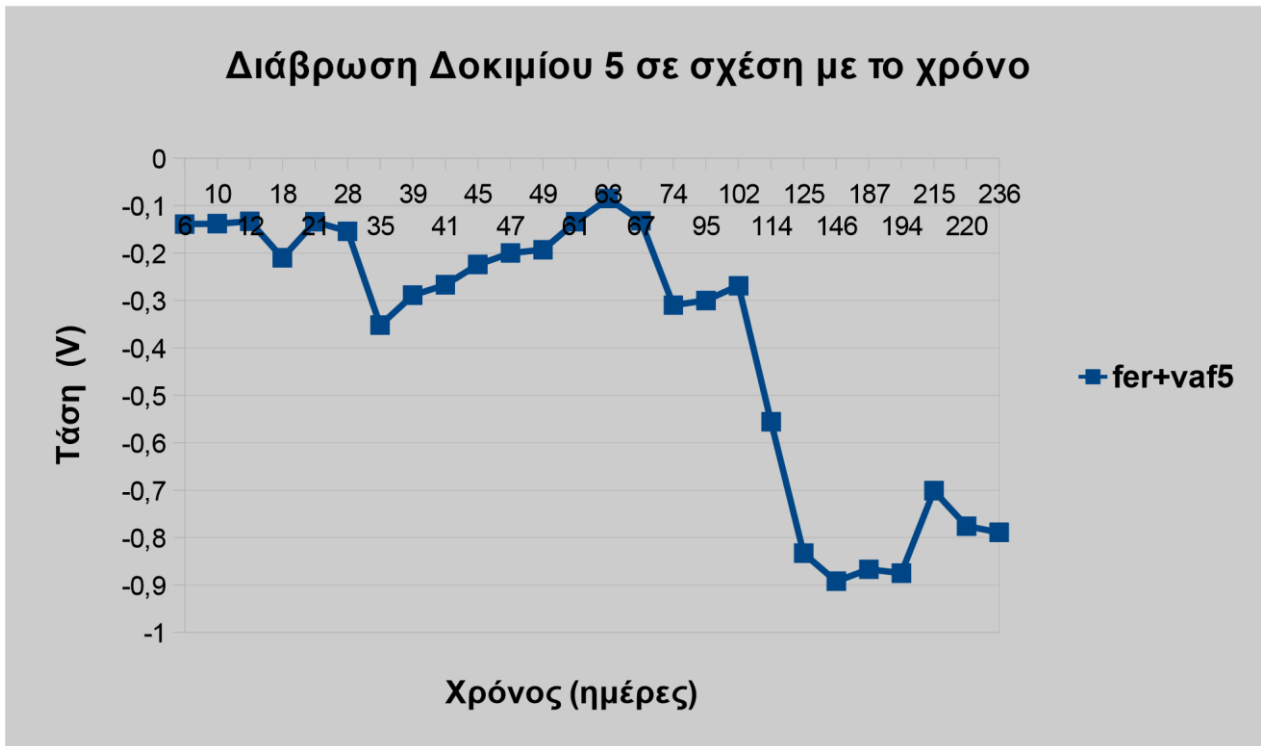
Διάγραμμα 17. Διάβρωση δοκίμιου με αναστολέα διάβρωσης και βαφή fer+vaf 2 σε συνάρτηση με το χρόνο



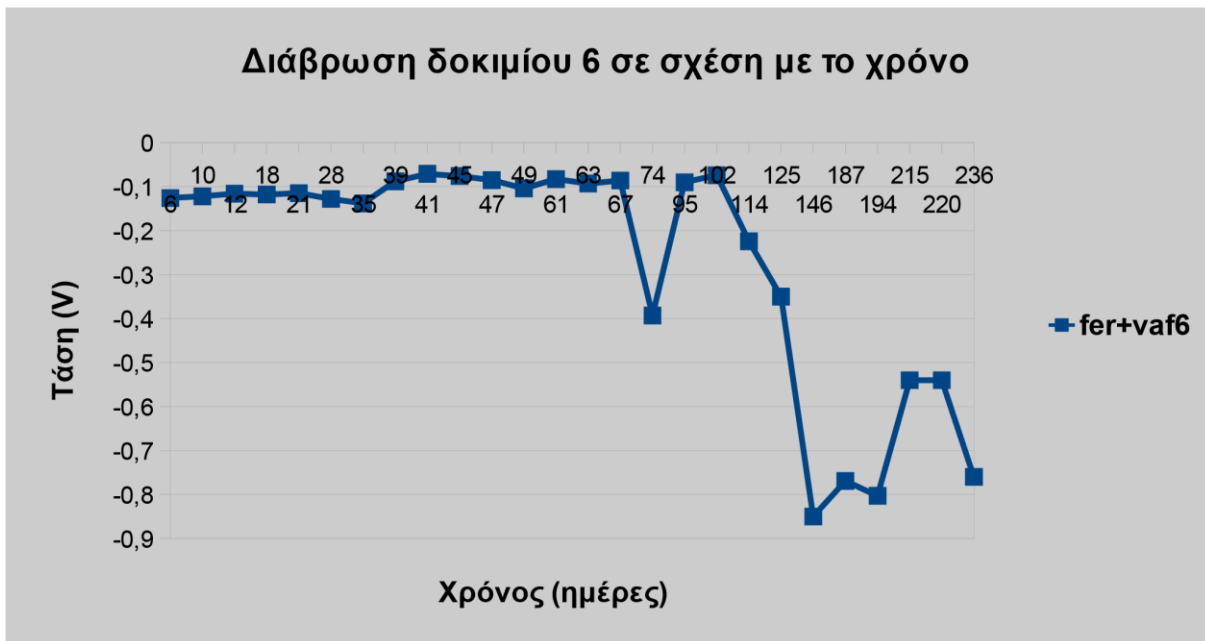
Διάγραμμα 18. Διάβρωση δοκίμιου με αναστολέα διάβρωσης και βαφή fer+vaf 3 σε συνάρτηση με το χρόνο



Διάγραμμα 19. Διάβρωση δοκίμιου με αναστολέα διάβρωσης και βαφή *fer+vaf 4* σε συνάρτηση με το χρόνο

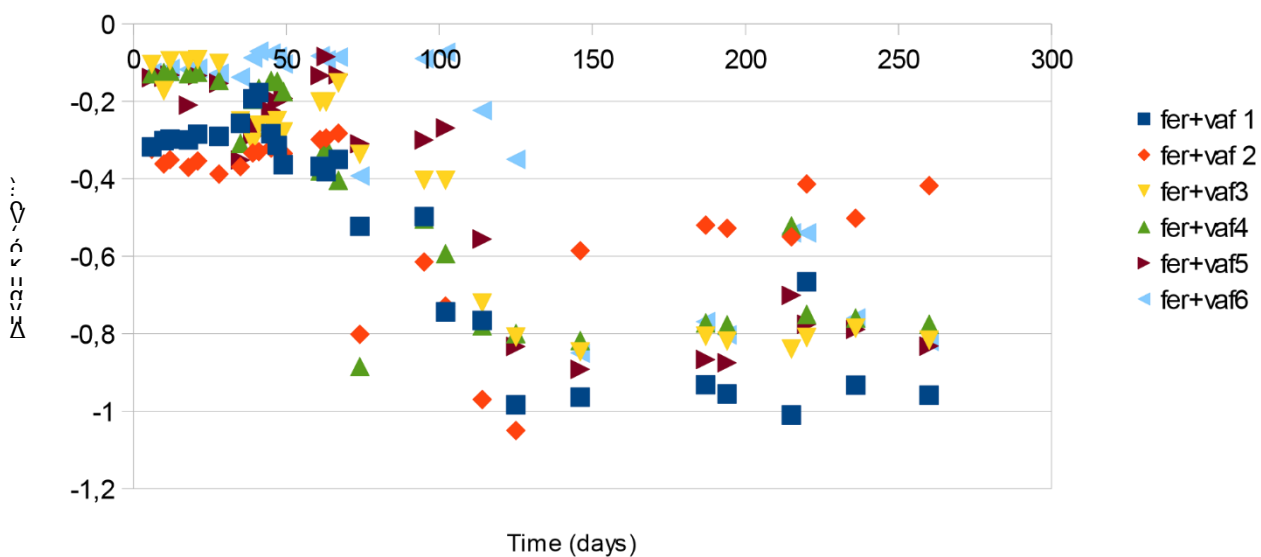


Διάγραμμα 20. Διάβρωση δοκίμιου με αναστολέα διάβρωσης και βαφή *fer+vaf 5* σε συνάρτηση με το χρόνο

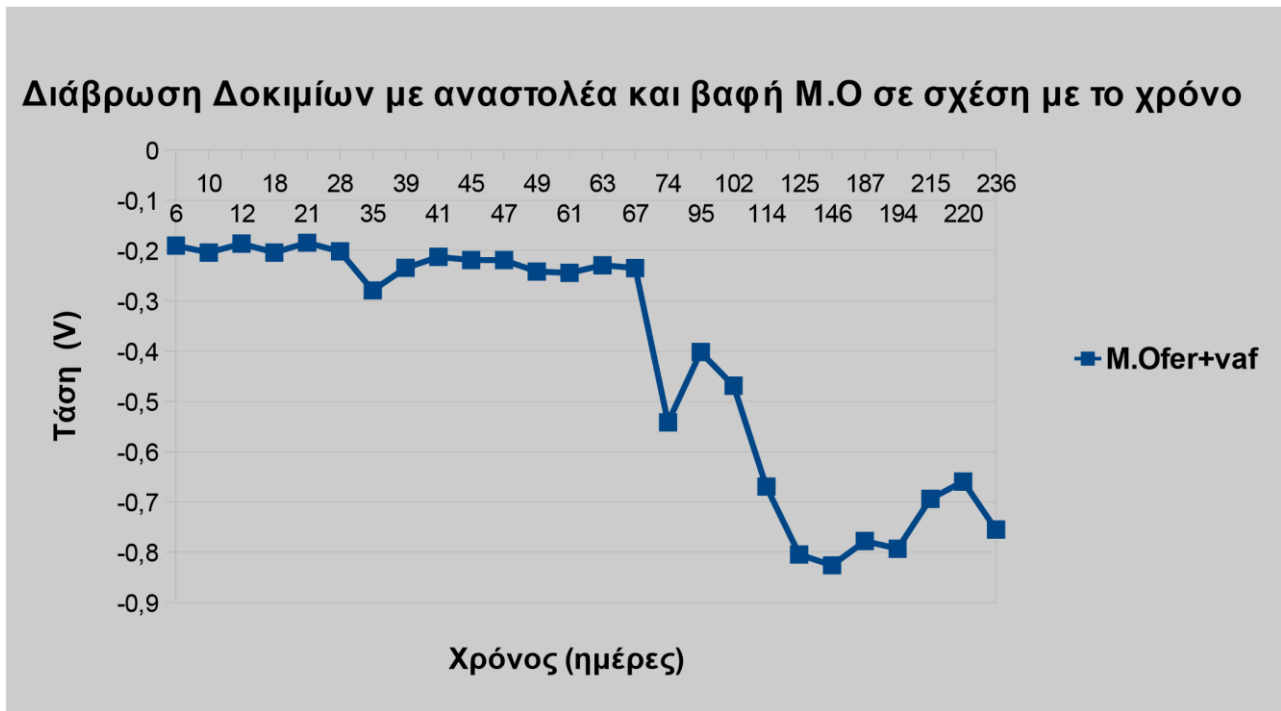


Διάγραμμα 21. Διάβρωση δοκιμίου με αναστολέα διάβρωσης και βαφή *fer+vaf 6* σε συνάρτηση με το χρόνο

Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Δυναμικών δοκιμίων με αναστολέα και βαφή σε συνάρτηση με το χρόνο



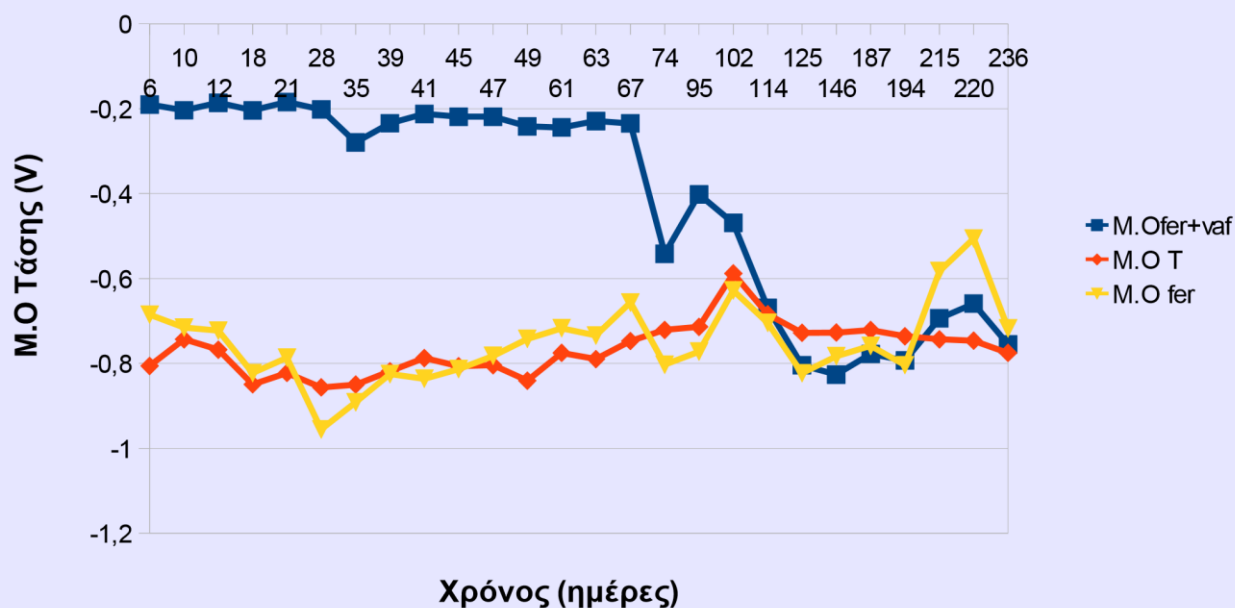
Διάγραμμα 22. Συγκεντρωτικό διάγραμμα τιμών δυναμικού δοκιμίων αναφοράς σε σχέση με το χρόνο



Διάγραμμα 23. M.O Διάβρωσης δοκιμίων με αναστολέα διάβρωσης και βαφή fer+vaf σε συνάρτηση με το χρόνο

Ακολούθως, γίνεται παρουσίαση του συγκεντρωτικού διαγράμματος που δείχνει τον μέσο όρο των τάσεων και στις τρεις ομάδες δοκιμίων, δηλαδή απεικονίζονται ο μέσος όρος των δοκιμίων στους οποίους έχει γίνει εφαρμογή αναστολέων διάβρωσης και βαφής (M.O fer+vaf), ο μέσος όρος των δοκιμίων που εμπεριέχουν μονάχα αναστολείς (M.O fer), και τέλος ο μέσος όρος των τυφλών δοκιμίων (M.O.T).

Διάγραμμα δυναμικού διάβρωσης σε συνάρτηση με το χρόνο



Διάγραμμα 24. M.O Τάσεων Διάβρωσης όλων των δοκιμίων και των τριών κατηγοριών σε συνάρτηση με το χρόνο

9.1.4 Νούμερο 1 μερικό συμπέρασμα

Εξετάζοντας τους μέσους όρους δυναμικού διάβρωσης σε συνάρτηση με τον παράγοντα του χρόνου, συμπεραίνεται η απουσία ιδιαίτερων διαφορών μεταξύ των δοκιμίων αναφορά και αυτών που εμπεριέχουν αναστολείς διάβρωσης. Βέβαια, τα δοκίμια στα οποία έχει γίνει εφαρμογή αναστολέων διάβρωσης και έχουν επικαλυφθεί παρουσιάζουν μέσους όρους με ηλεκτροθετικότερες τιμές, εν συγκρίσει με τις άλλες ομάδες δοκιμίων. Αυτό παρατηρείται κατά βάση τις εβδομήντα πρώτες μέρες που είναι εκτεθειμένα σε περιβάλλοντα διάβρωσης με $E_{corr} > -0,426$ V, κάτι που είναι προφανές αν ληφθεί υπόψη ότι στα δοκίμια αυτά γίνεται συνδυασμός δυο πιθανών τρόπων προστασίας από διάβρωσης.

Αξίζει να αναφερθεί ότι μετά το πέρας των εβδομήντα ημερών, παρατηρείται σημαντική μείωση του δυναμικού για τα προκείμενα δοκίμια, ενώ ύστερα από εκατόν δεκαπέντε μέρες, η τιμές του δυναμικού διάβρωσης καθορίζονται σχεδόν ίδιες με αυτές των άλλων δυο κατηγοριών. Ενδεχομένως, η διαφορά αυτή είναι απόρροια της καθυστέρησης που συμβαίνει λόγω των

χλωριόντων έως ότου διέλθει απ' το στρώμα βαφής, προκειμένου τα φαινόμενα των διαβρώσεων να ξεκινήσουν να εμφανίζονται.

9.2 Αποτελέσματα γραμμικής πόλωσης Linear Polarization Technique, LPR

Όπως έχει προαναφερθεί, ο προσδιορισμός του ρυθμού διάβρωσης για το σύνολο των κατηγοριών των δοκιμίων που αξιοποιήθηκαν γίνεται με τη χρήση της μεθόδου της γραμμικής πόλωσης. Στην ουσία, γίνεται καταγραφή της αντίστασης πόλωσης για ένα δοκίμιο $R_p(\Omega)$, σε τέσσερις διαφορετικούς χρόνους. Για να επεξεργαστούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τα αποτελέσματα, για τις μετρήσεις έγινε χρήση λιγότερων από έξι δοκιμίων έκαστης κατηγορίας

9.2.1 Αποτελέσματα γραμμικής πόλωσης τυφλών δοκιμίων

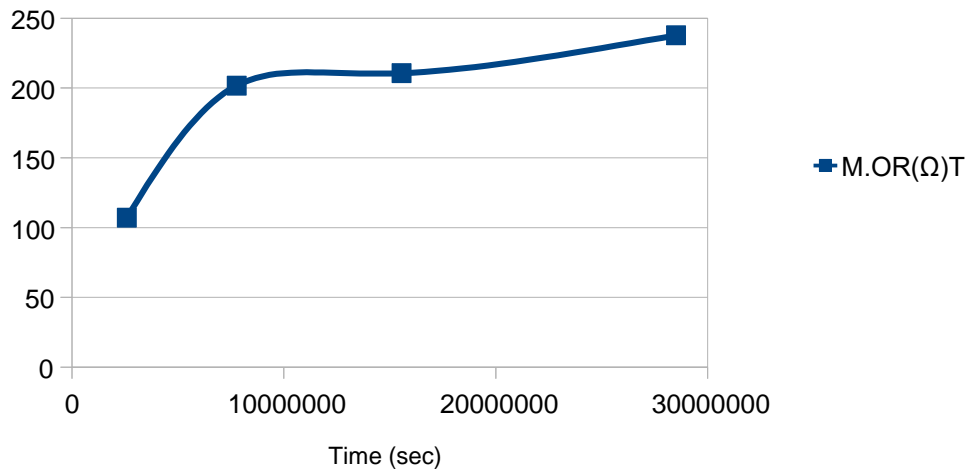
Στον ακόλουθο πίνακα, γίνεται παρουσίαση των τιμών του μέσου όρου αντίστασης πόλωσης M.O. R_p για τα τέσσερα δοκίμια T1, T2, T4, T6. Η παρουσίαση αυτών των αποτελεσμάτων γίνεται και στο κάτωθι διάγραμμα, το οποίο αναφέρεται σε χρονικό διάστημα έντεκα μηνών.

εε

Πίνακας 9.2.1: Μέσος όρος αντίστασης γραμμικής πόλωσης M.O. R_p (Ω) τυφλών δοκιμίων, συναρτήσει του χρόνου. (T1, T2, T4, T6)

Χρόνος (months)	M.O $R_p(\Omega)$ για τα δοκίμια (T1, T2, T4, T6)
1	107,093
3	201,693
6	210,654
11	237,79

Διάγραμμα M.O $R(\Omega)$ σε σχέση με το χρόνο για τα δοκίμια αναφοράς



Διάγραμμα 25. Μέσος όρος αντίστασης γραμμικής πόλωσης των τυφλών δοκιμίων σε συνάρτηση με το χρόνο

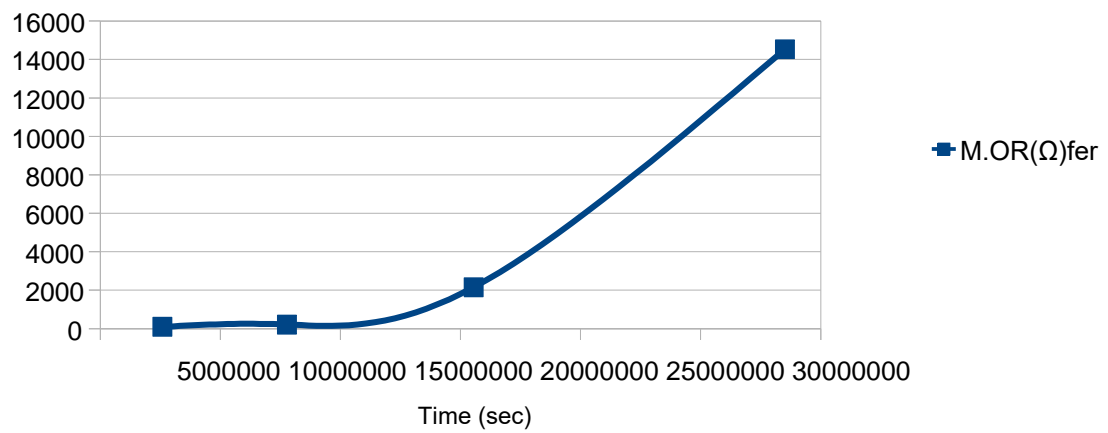
9.2.2 Αποτελέσματα γραμμικής πόλωσης δοκιμίων με αναστολέα διάβρωσης

Όσον αφορά τα δοκίμια, που εμπεριέχουν μόνο αναστολείς διαβρώσεων, στο παρακάτω διάγραμμα γίνεται παρουσίαση των τιμών του μέσου όρου αντίστασης πόλωσης M.O.Rp των τριών δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε μετρήσεις (fer4, fer5, fer6). Ακολουθώντας, γίνεται παράθεση των αποτελεσμάτων, για χρονικό διάστημα έντεκα μηνών.

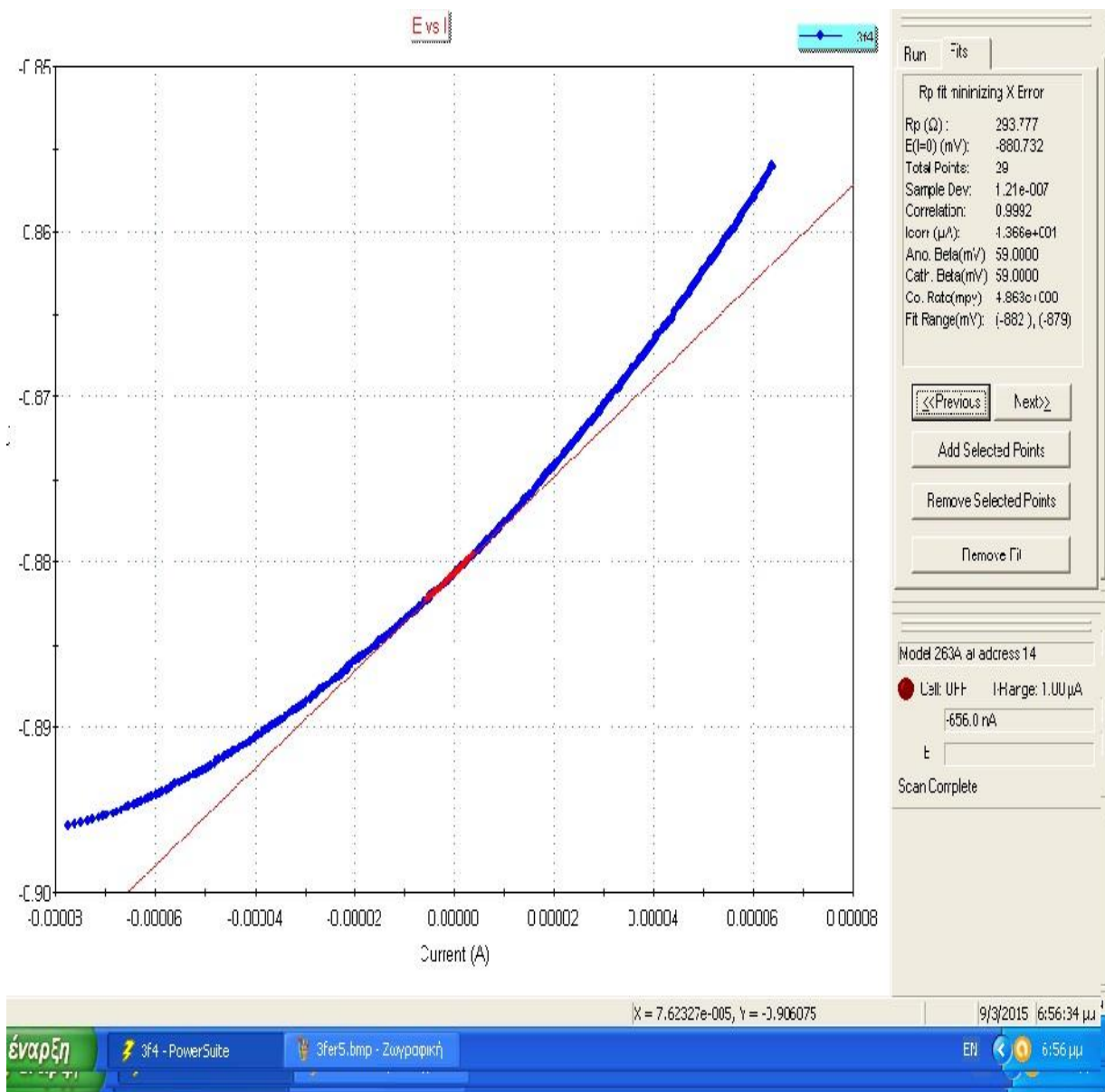
Πίνακας 9.2.2: Μέσος όρος αντίστασης γραμμικής πόλωσης M.O.Rp (Ω) τυφλών δοκιμίων, συναρτήσει του χρόνου. (fer4, fer5, fer6)

Χρόνος (Months)	M.O Rp(Ω) για τα δοκίμια (<i>fer4</i> , <i>fer5</i> , <i>fer6</i>)
1	92,169
3	215,225
6	2153,5885
11	14531,7775

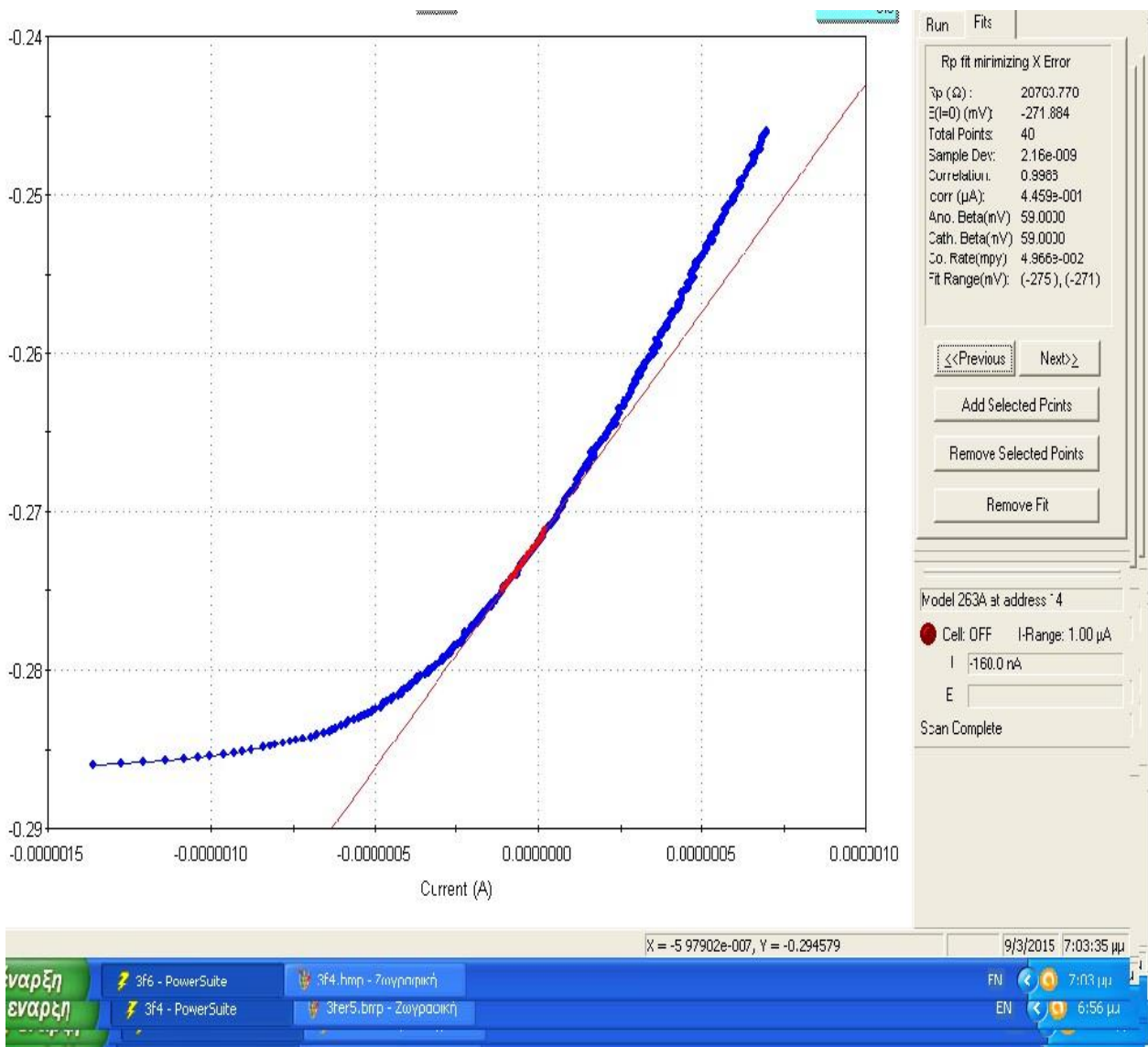
Διάγραμμα M.O R(Ω) σε σχέση με το χρόνο για τα δοκίμια που περιέχουν μόνο αναστολέα διάβρωσης



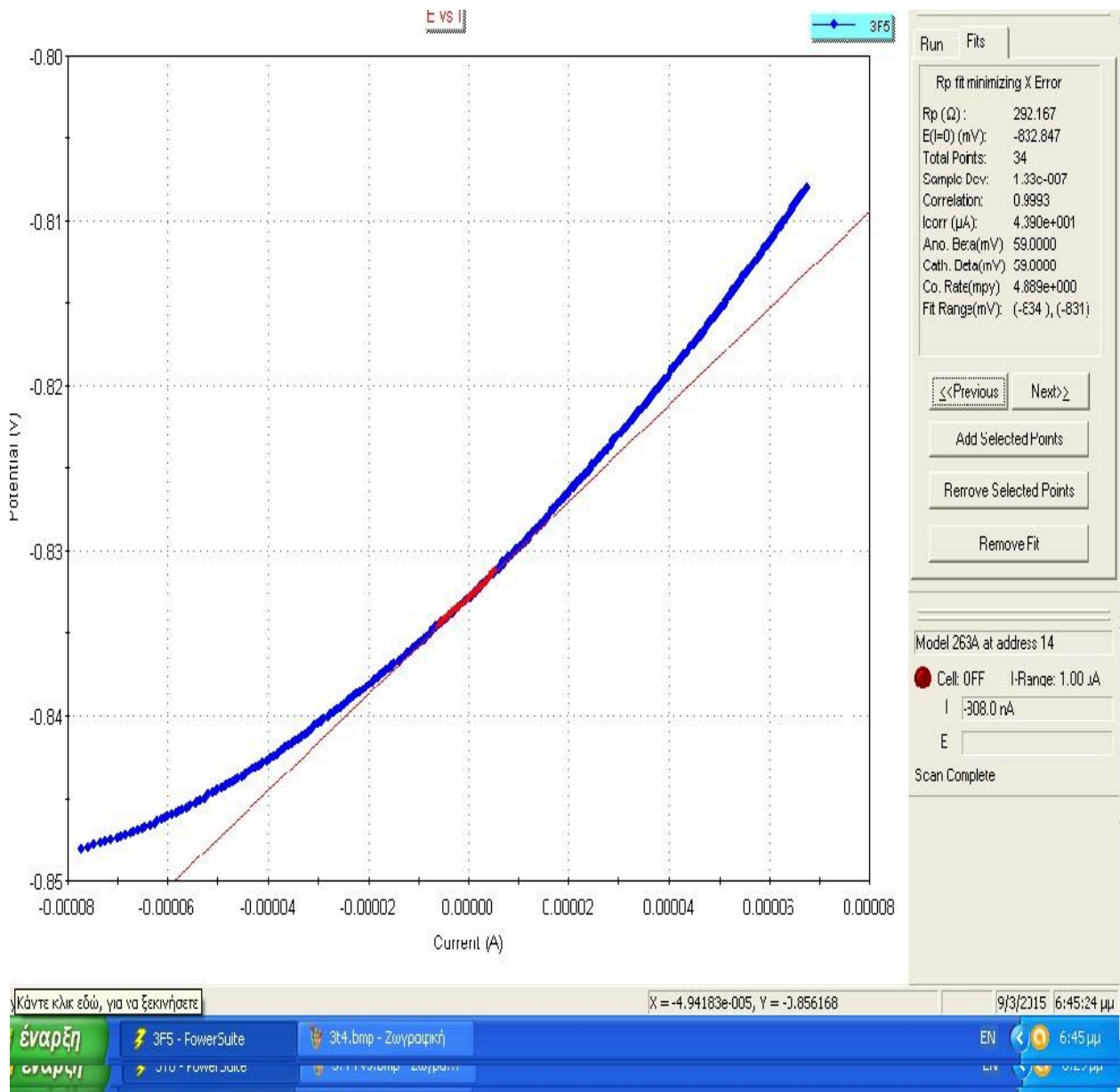
Διάγραμμα 26. Μέσος όρος αντίστασης γραμμικής πόλωσης των δοκιμίων με αναστολέα διάβρωσης σε συνάρτηση με το χρόνο



Γράφημα 1. Γραμμική πόλωση του δοκιμίου fer4 με αναστολέα διάβρωσης στο χρονικό διάστημα των 11 μηνών.



Γράφημα 2. Γραμμική πόλωση του δοκιμίου fer6 με αναστολέα διάβρωσης στο χρονικό διάστημα των 11 μηνών.



Γράφημα 3. Γραμμική πόλωση του δοκιμίου *fer5* με αναστολέα διάβρωσης στο χρονικό διάστημα των 11 μηνών.

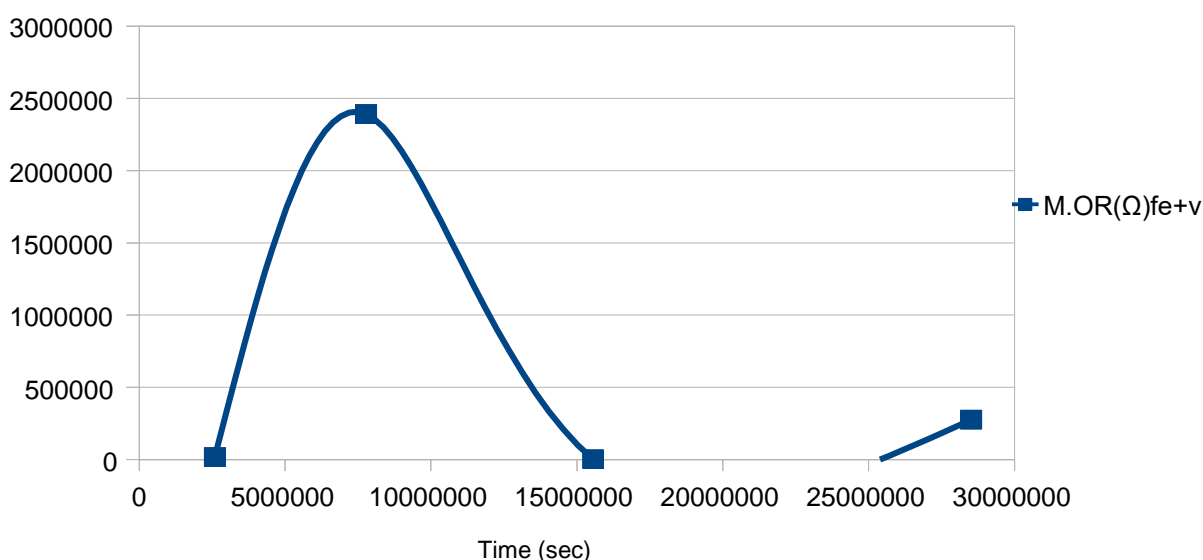
9.2.3 Αποτελέσματα γραμμικής πόλωσης δοκιμίων με αναστολέα διάβρωσης και βαφή

Αντιστοίχως, για τα δοκίμια που εμπεριέχουν μέσα στο τσιμεντοκονίαμα αναστολείς διάβρωσης, και έχουν επιφανειακώς επικαλυφθεί, γίνεται παρουσίαση των τιμών που έχουν οι μέσοι όροι αντίστασης πόλωσης M.O. Rp, για τα τέσσερα δοκίμια που εξετάστηκαν (fer+vaf3, fer+vaf4, fer+vaf5, fer+vaf6). Τα αποτελέσματα αφορούν χρονικό διάστημα έντεκα μηνών.

Πίνακας 9.2.3: Μέσος όρος αντίστασης γραμμικής πόλωσης M.O.Rp (Ω) δοκιμίων με αναστολέα διάβρωσης και επικάλυψη, συναρτήσε του χρόνου. (fer+vaf3, fer+vaf4, fer+vaf5, fer+vaf6)

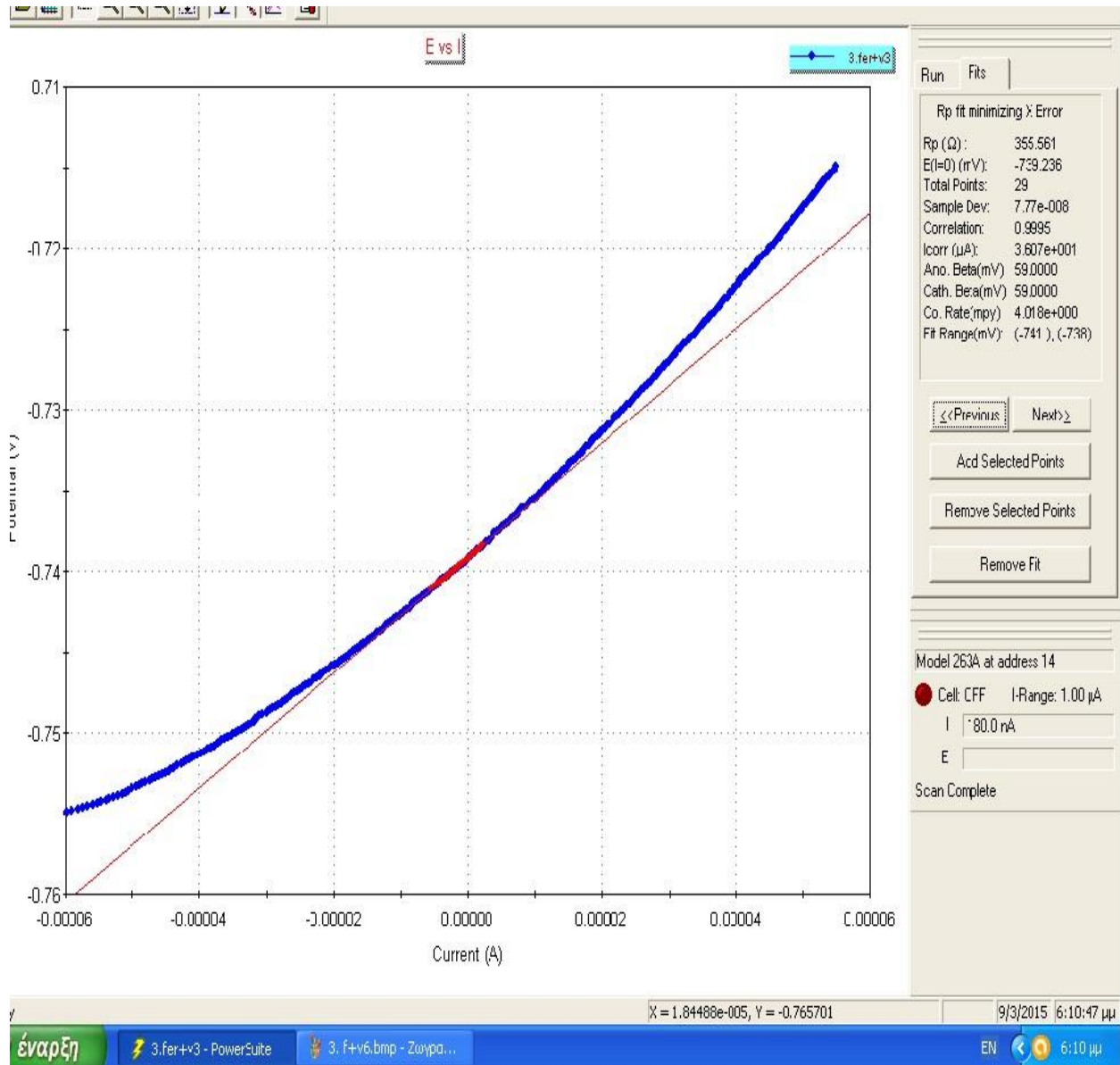
Χρόνος (Months)	M.O Rp(Ω) για τα δοκίμια (fer+vaf3, fer+vaf4, fer+vaf5, fer+vaf6)
1	17852,969
3	2390903,613
6	4126,2665
11	275385,921

Διάγραμμα M.O R(Ω) σε σχέση με το χρόνο για τα δοκίμια με αναστολέα και βαφή



Διάγραμμα 27. Μέσος όρος αντίστασης γραμμικής πόλωσης των δοκιμίων με αναστολέα διάβρωσης και επικάλυψη σε συνάρτηση με το χρόνο

Ακολούθως, γίνεται παρουσίαση μιας καμπύλης γραμμικής πόλωσης, όπως δόθηκε απ' το μηχάνημα που μετρά την αντίσταση πόλωσης, με σκοπό την επαλήθευση της ορθότητας των μετρήσεων.



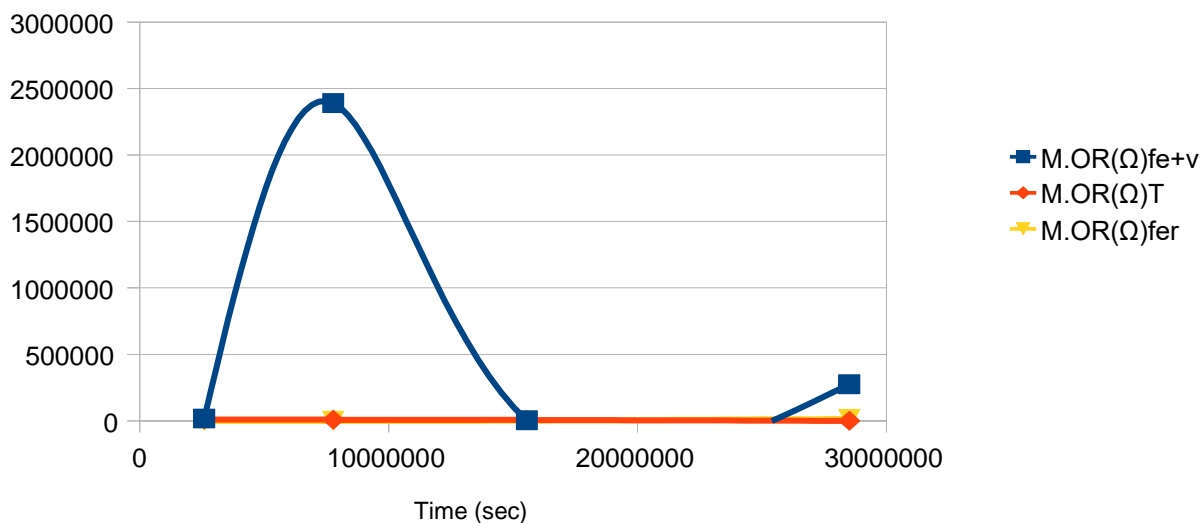
Γράφημα 4. Γραμμική πόλωση του δοκιμίου $fer+na\beta 3$ με αναστολέα διάβρωσης και επικάλυψη στο χρονικό διάστημα των 11 .



Γράφημα 5. Γραμμική πόλωση του δοκιμίου *fer+va/b* με αναστολέα διάβρωσης και επικάλυψη στο χρονικό διάστημα των 11 μηνών.

Στο σημείο αυτό, κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση ενός διαγράμματος, στο οποίο αναφέρονται όλοι οι προαναφερθέντες μέσοι όροι κάθε κατηγορίας δοκιμίων, προκειμένου να μπορούν να συγκριθούν άμεσα οι μέσοι όροι αντιστάσεων πόλωσης.

**Διάγραμμα M.O R(Ω) σε σχέση με το χρόνο
και για τις τρεις κατηγορίες δοκιμίων**



Διάγραμμα 28. Συγκριτικό διάγραμμα μέσων όρων αντίστασης γραμμικής πόλωσης όλων των κατηγοριών δοκιμίων σε συνάρτηση με το χρόνο

9.2.4 Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας

Ακολουθώς, γίνεται ο υπολογισμός της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας του οπλισμού, με απώτερο σκοπό να συσχετιστεί η θεωρητική απώλεια μάζας με την πραγματική ζύγιση, ούτως ώστε να οδηγηθούμε στα κατάλληλα και ορθά αποτελέσματα. Ο υπολογισμός της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας έγινε βάσει του νόμου Faraday:

$$\beta = m = M I t / z F$$

Όπου,

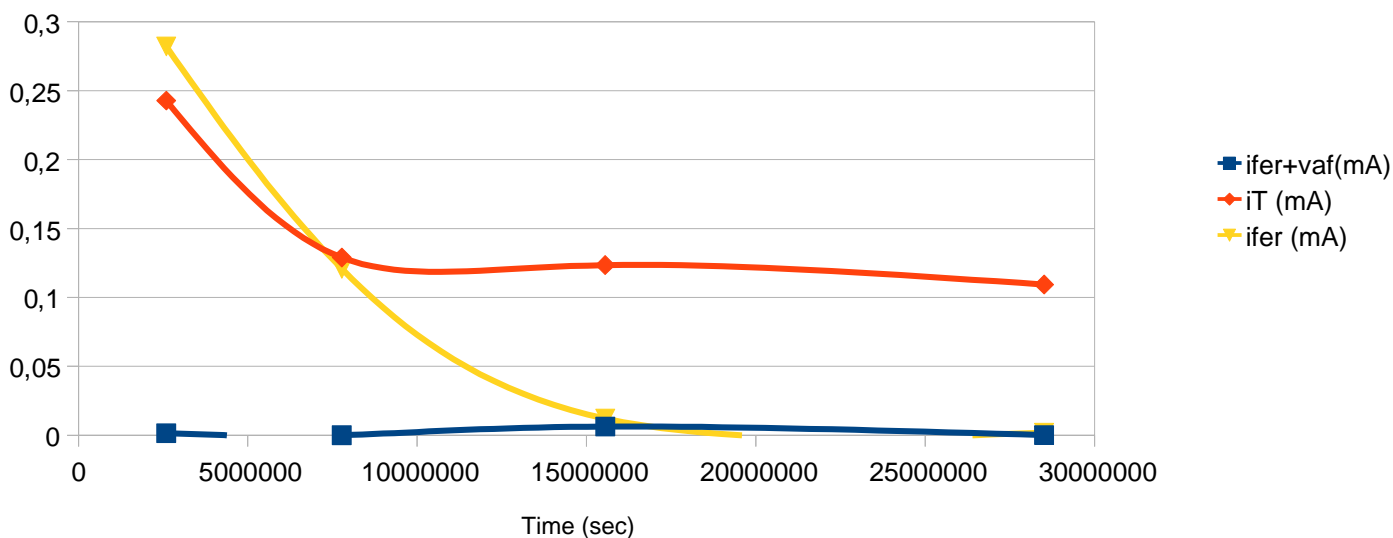
- m η μάζα του μετάλλου που καταναλώνεται [g],
- I το ηλεκτρικό ρεύμα [A],
- t ο χρόνος [s],
- F η σταθερά Faraday [A-s ή Cb/mol],
- z ο αριθμός ανταλλασσόμενων ηλεκτρονίων ($z=2$ για την αντίδραση $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$)
- M το Ατομικό Βάρος μετάλλου [56g για το Fe].

Για τον υπολογισμό της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας, έγινε χρήση του μέσου όρου των τιμών ρεύματος $I_{corr}(A)$, για κάθε ομάδα δοκιμίων. Συγκεκριμένα:

Πίνακας 9.2.4.1 Μέσο ρεύματος διάβρωσης για τις τρεις κατηγορίες δοκιμίων σε συνάρτηση με το χρόνο

Time (sec)	$I_{corr} T$ (mA)	$I_{corr} fer$ (mA)	$I_{corr} Fer+vaf$ (mA)
25920000	0,242779	0,282090508	0,00144563
7776000	0,1289087	0,12080381	0,00000187
1555200	0,123425143	0,01207273	0,006301
28512000	0,109340017	0,001789182	0,00009441

Διάγραμμα έντασης ρεύματος διάβρωσης σε σχέση με το χρόνο και για τις 3 κατηγορίες δοκιμίων



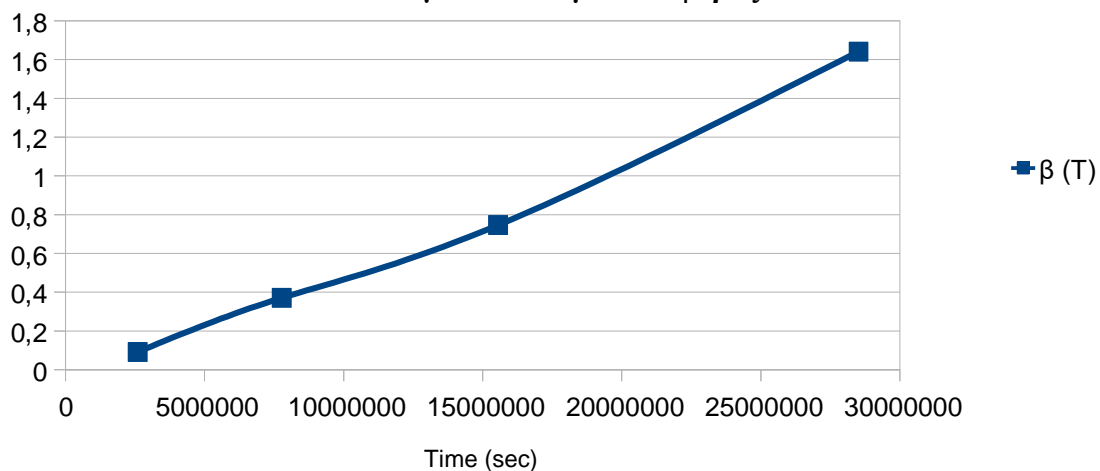
Διάγραμμα 29 Μέσος όρος έντασης ρεύματος διάβρωσης για τις τρεις κατηγορίες δοκιμίων σε συνάρτηση με το χρόνο

Κάτωθι, γίνεται εμφάνιση των τιμών ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας σε gr των τριών κατηγοριών δοκιμίων.

Πίνακας 9.2.4.2 Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας για κάθε κατηγορία δοκιμίων σε συνάρτηση με το χρόνο

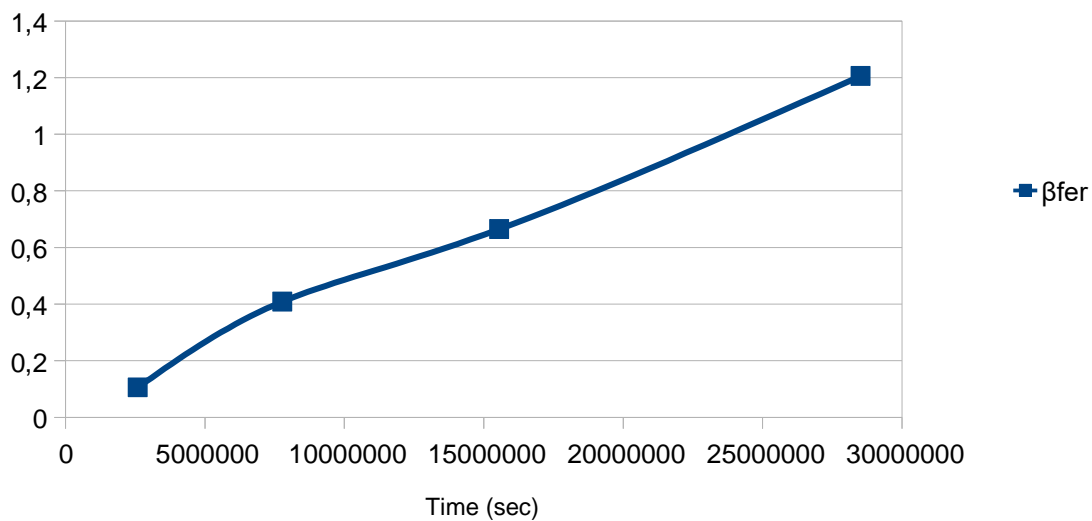
Time (sec)	$\beta(\text{gr}) \text{ T}$	$\beta(\text{gr}) \text{ fer}$	$\beta(\text{gr}) \text{ fer} +$
2592000	0,0912163	0,106020705	0,0005430
7776000	0,3705	0,40880705	0,0016300
15552000	0,74618959	0,66466063	0,0092787
28512000	1,6409	1,205549631	0,0234689

Διάγραμμα ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας σε σχέση με το χρόνο για τα δοκίμια αναφοράς



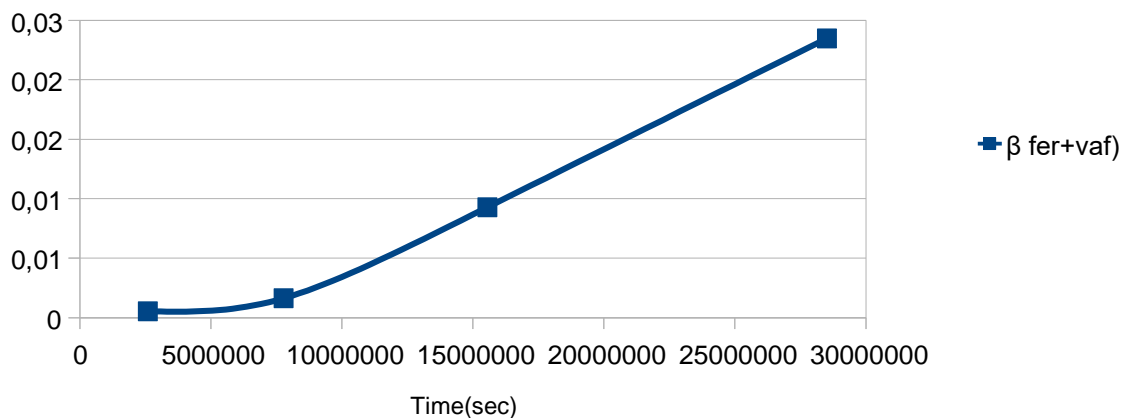
Διάγραμμα 30. Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας τυφλών δοκιμίων σε συνάρτηση με το χρόνο

**Διάγραμμα Ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας σε σχέση με το χρόνο
Για τα δοκίμια που περιέχουν μόνο αναστολέα**



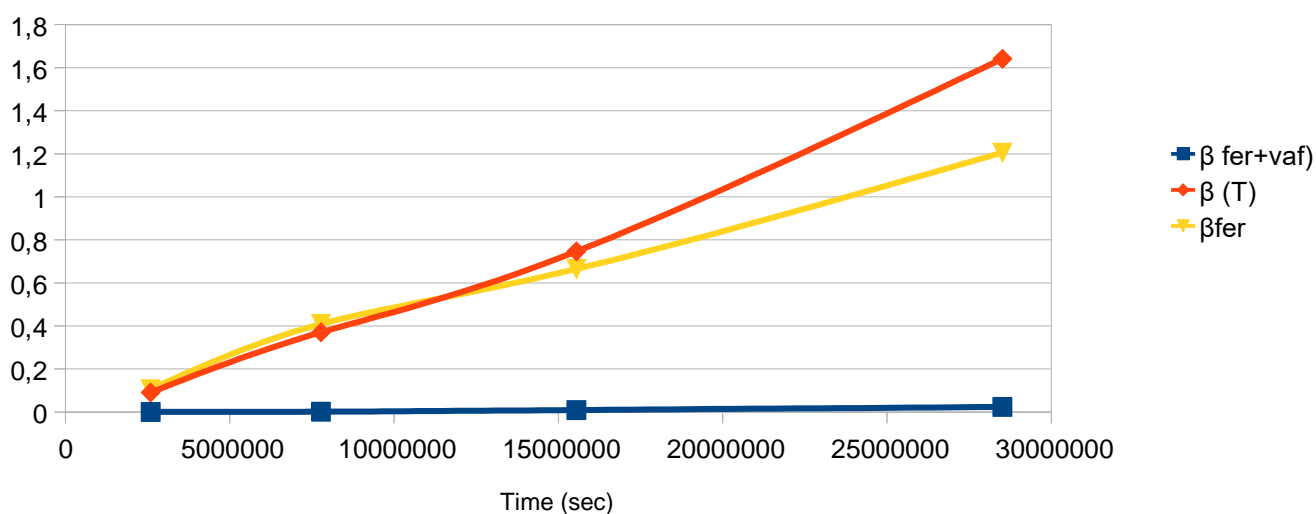
Διάγραμμα 30. Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας δοκιμίων με αναστολέα διάβρωσης σε συνάρτηση με το χρόνο

Διάγραμμα Ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας σε σχέση με το χρόνο στα δοκίμια με αναστολέα και βαφή



Διάγραμμα 31 Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας των δοκιμίων με επικάλυψη και αναστολέα διάβρωσης σε συνάρτηση με το χρόνο

Διάγραμμα Ηλεκτροχημική Απώλεια μάζας σε σχέση με το χρόνο και για τις 3 κατηγορίες δοκιμίων



9.2.5 Νούμερο 2 μερικό συμπέρασμα

Παρατηρώντας την καμπύλη ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας για το σύνολο των κατηγοριών δοκιμίων, διαπιστώνεται πως μέχρι τους έξι μήνες υπάρχει ταύτιση επί της απώλειας μάζας των δοκιμίων με αναστολές διάβρωσης, όπως και των δοκιμίων αναφοράς. Μετά το εξάμηνο, εν συγκρίσει με τα δοκίμια αναφοράς, κάτι που συνεπάγεται ότι κατά πάσα πιθανότητα είναι αναγκαίο το πέρας ορισμένου χρονικού διαστήματος για την επιτυχή λειτουργία των αναστολέων.

Διάγραμμα 32 Συγκεντρωτικό διάγραμμα ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας και των τριών κατηγοριών δοκιμίων σε συνάρτηση με το χρόνο.

Επιπροσθέτως, σημειώνεται πως για όλο το χρονικό διάστημα που διεξάγεται το πείραμα, τα δοκίμια με αναστολές παρουσιάζουν μικρού βαθμού διαβρώσεις, και ως εκ τούτου απώλεια μάζας.

9.3. Αποτελέσματα μέτρησης απώλειας μάζας

Για να μετρηθεί η απώλεια μάζας που έχει ο σίδηρος οπλισμού για το σύνολο των κατηγοριών δοκιμίων, έγινε ζύγιση του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε πριν τον εγκιβωτισμό του, όπως και κατόπιν της διεξαγωγής του πειράματος.

Όπως έχει επισημανθεί, πριν το ζύγισμα κρίνεται αναγκαίος ο καθαρισμός του οπλισμού από τυχόν υπολείμματα σκυροδέματος, και κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στην αρχική απώλεια βάρους και κατά την τελική ζύγιση. Έτσι, είναι εφικτή μια μέτρηση ακριβείας. Για αυτή τη διαδικασία έγινε χρήση υδροχλωρικού οξέος, προκειμένου οι οπλισμοί να μείνουν σε αυτό το διάλυμα για τριάντα λεπτά. Κατόπιν, γίνεται ζύγιση με χρήση ζυγαριάς ακριβείας εργαστηρίου.

Πίνακας 9.3 Αρχικά βάρη οπλισμών, Τελικά Βάρη οπλισμών, Απώλεια μάζας και για τις τρεις κατηγορίες δοκιμών

Δοκίμιο	Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Απώλεια %
T1	64,19	63,42	0,77	1,2
T2	63,28	62,5	0,78	1,23
T3	61,72	60,91	0,81	1,31
T4	60,0036	58,9728	1,0308	1,7179
T5	58,5912	57,5975	0,9937	1,696
T6	61,5138	60,4569	1,0569	1,7181
Fer 1	60,7507	60,5258	0,2249	0,37
Fer 2	60,9049	60,563	0,3419	0,5614
Fer 3	60,2932	60,015	0,2782	0,46
Fer 4	59,0135	58,6746	0,3389	0,5624
Fer 5	60,1337	59,7961	0,3367	0,5615
Fer 6	62,0129	61,6645	0,3484	0,5618
Fer+vaf 1	62,559	62,2455	0,3135	0,5012
Fer+vaf 2	59,4332	59,1228	0,3104	0,5222
Fer+vaf 3	60,4741	60,1606	0,3135	0,5184
Fer+vaf 4	60,591	60,3204	0,27	0,45
Fer+vaf 5	59,8471	59,591	0,25	0,43
Fer+vaf 6	60,3091	60,0085	0,3006	0,4985

Ο υπολογισμός των βαρυμετρικών απωλειών δοκιμών έγινε σε δυο διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Στους έξι πρώτους μήνες, έγινε καταγραφή της απώλειας μάζας στα δοκίμια αναφοράς T1, T2, T3, στα δοκίμια που εμπεριείχαν αναστολείς Fer1, Fer3, όπως και στα δοκίμια που είναι επικαλυμμένα και έχουν αναστολείς, Fer+vaf 4 , Fer+vaf 5.

Η δεύτερη κατά σειρά μέτρηση πραγματοποιήθηκε μετά το πέρας έντεκα μηνών από την αρχή του πειράματος, και αφορούσε τα δοκίμια αναφοράς T4, T5, T6, αυτά που περιείχαν αναστολείς διάβρωσης, Fer2, Fer4, Fer5, Fer6, και αυτά με αναστολείς και επικάλυψη Fer+vaf1, Fer+vaf2, Fer+vaf3, Fer+vaf6.

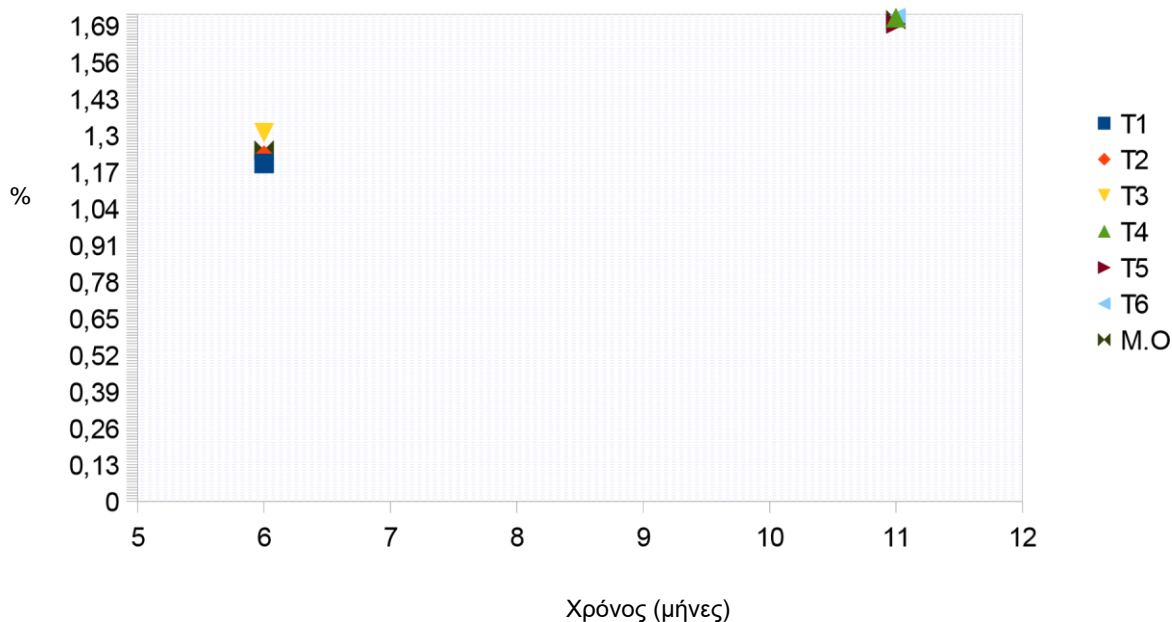


Εικόνα 9.3. Τα δοκίμια πριν την αφαίρεση του σκυροδέματος, και οι οπλισμοί πριν την ζύγιση

Κάτωθι, γίνεται παρουσίαση των διαγραμμάτων που εμφανίζουν, τόσο για τους έξι μήνες όσο και για τους έντεκα, την απώλεια μάζας, όπως και τις τιμές των αντίστοιχων μέσων όρων.

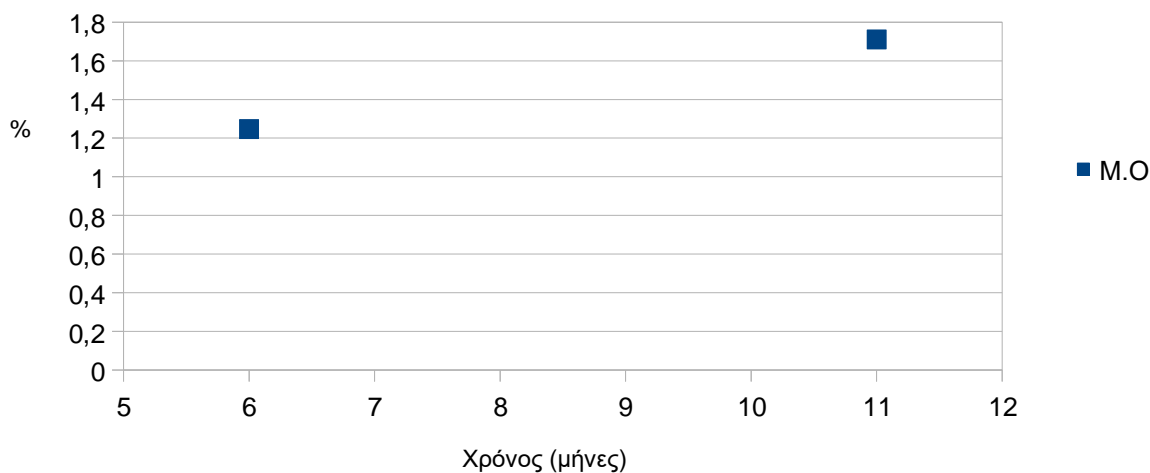
Επίσης, μέσω των αντίστοιχων διαγραμμάτων, παρουσιάζεται αφενός η βαρυμετρική απώλεια μάζας δοκιμίων, σε σχέση με την παράμετρο του χρόνου, και αφετέρου οι μέσοι όροι απώλειας μάζας για όλες τις κατηγορίες δοκιμίων, σε συνάρτηση και πάλι με την παράμετρο του χρόνου.

Διάγραμμα βαρυμετρικής απώλειας μάζας σε σχέση με το χρόνο για τα δοκίμια αναφοράς



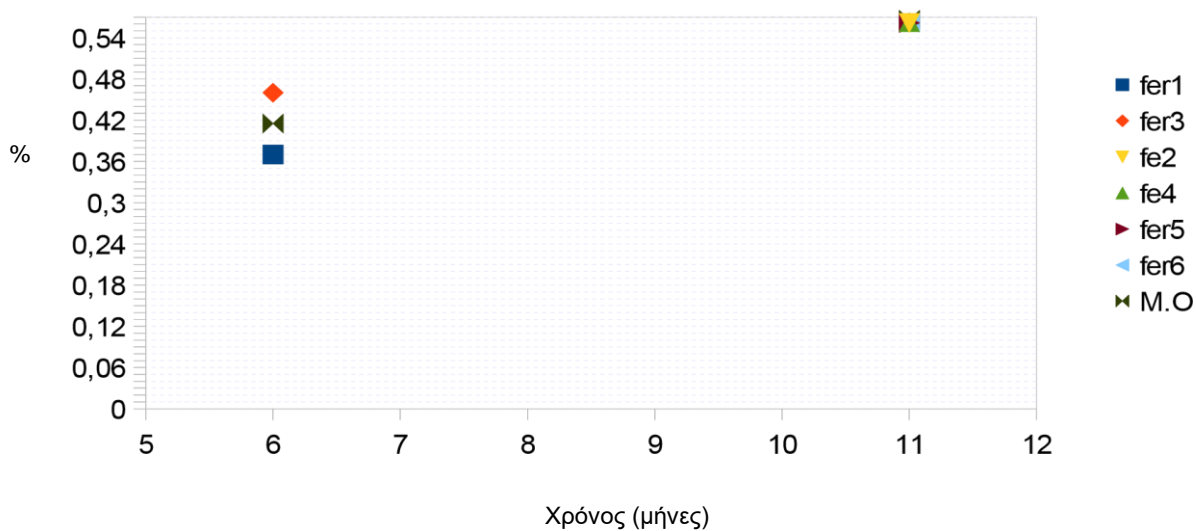
Διάγραμμα 33. Βαρυμετρική απώλεια μάζας σε σχέση με το χρόνο για τα δοκίμια αναφοράς

**M.O. Απώλειας μάζας σε συνάρτηση με το χρόνο
Για τα δοκίμια αναφοράς**



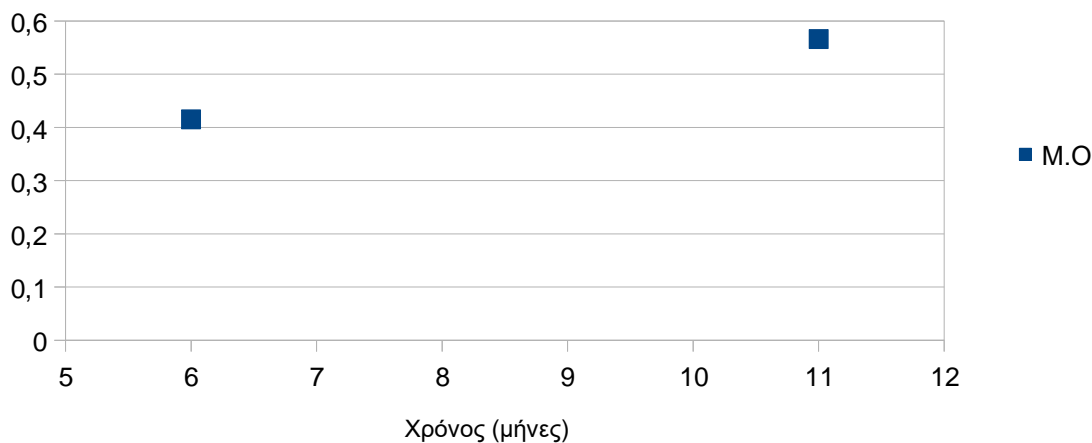
Διάγραμμα 34. *M.O* απώλειας μάζας σε σχέση με το χρόνο για τα δοκίμια αναφοράς για τους 6 και τους 11 μήνες ΠΙΝΑΚΑΣ 9.3.2

Διάγραμμα βαρυμετρικής απώλειας μάζας σε σχέση με το χρόνο για τα δοκίμια που περιέχουν αναστολέα



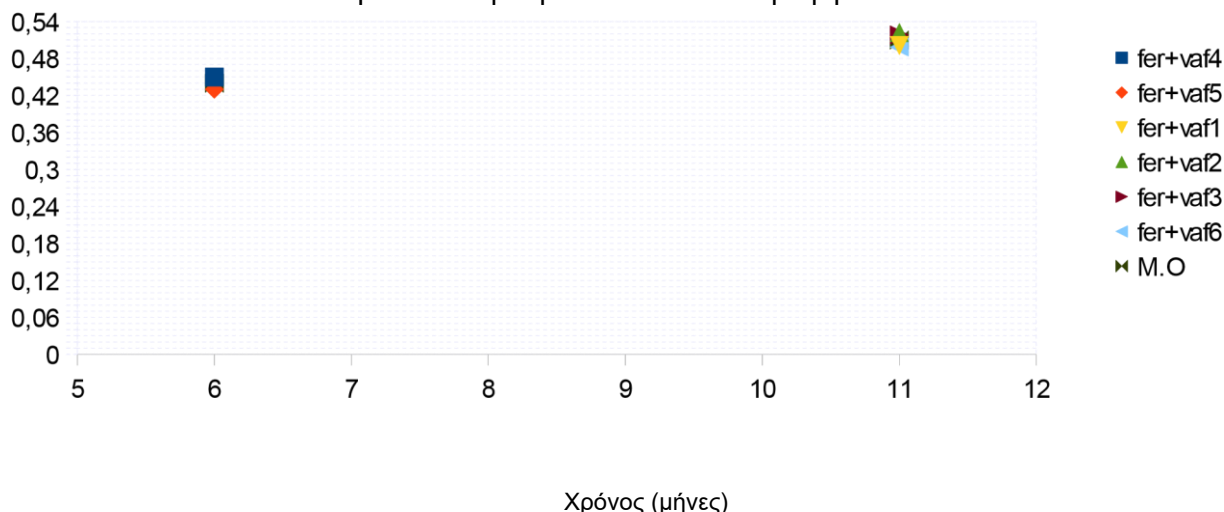
Διάγραμμα 35. *Βαρυμετρική απώλεια μάζας σε σχέση με το χρόνο για τα δοκίμια με αναστολέα διάβρωσης*

M.O Απώλειας μάζας σε συνάρτηση με το χρόνο
Για τα δοκίμια με αναστολέα



Διάγραμμα 36. *M.O* απώλεια μάζας σε σχέση με το χρόνο για τα δοκίμια με αναστολέα διάβρωσης για τους 6 και τους 11 μήνες

**Διάγραμμα βαρυμετρικής απώλειας μάζας σε σχέση με το χρόνο
για τα δοκίμια με αναστολέα και βαφή**



Διάγραμμα 37. Βαρυμετρική απώλεια μάζας σε σχέση με το χρόνο για τα δοκίμια με αναστολέα διάβρωσης και επικάλυψη

Αξίζει να αποδειχθεί ότι η απώλεια μάζας του οπλισμού ακολουθεί την παραβολική καμπύλη του μετάλλου, και όπως ορίζει ο Wagner η ταχύτητα με την οποία προωθούνται τα στρώματα προϊόντος διάβρωσης βασίζεται στον νόμο:

$$y^2 = Kt \text{ (βλέπε κεφάλαιο 3.1.2), όπου}$$

y = το πάχος στρώματος προϊόντος διάβρωσης (Μ.Ο απώλειας μάζας οπλισμού),

K = μια σταθερά της ταχύτητας

t = χρόνος.

Η εν λόγω παραβολή χαρακτηρίστηκε από τον Wagner ως Anlaufparabel, ένα όνομα που σήμερα αποτελεί τον καθορισμό των παραβολικών χρονικών εξελίξεων για κάθε αντίδραση που λαμβάνει μέρος ένα στερεό σώμα. Βέβαια, η μετάφρασή του είναι παραβολή εξίσωσης ή εξάνθησης.

Βάσει των προαναφερθέντων, ο μηχανισμός με τον οποία αυξάνεται το πάχος των προϊόντων διάβρωσης, με βραδύτερο στάδιο τη διάχυση των στερεών ιόντων του μετάλλου απ' την επιφάνεια προς το περιβάλλον διάβρωσης είναι ο ακόλουθος:

$$y^2 = k t$$

Όπου,

y : Μ.Ο απώλειας μάζας

k : σταθερά ταχύτητας

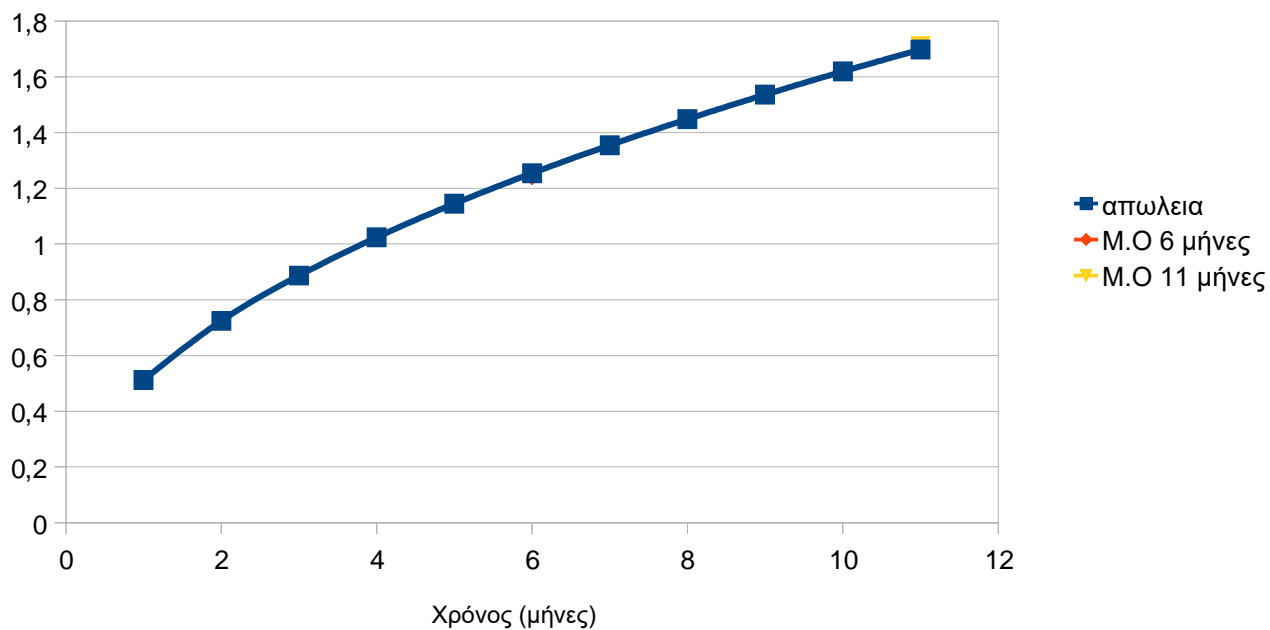
t : χρόνος μέτρησης απώλειας μάζας (μήνες)

Κατά συνέπεια, για κάθε κατηγορία δοκιμών δίνεται ένα k_6 για του έξι μήνες και ένα k_{11} για τους έντεκα μήνες διάβρωσης. Ξεχωριστά για καθεμία από αυτές τις κατηγορίες δοκιμών έγινε χρήση του μέσου όρου των k_6 και k_{11} για τη διαμόρφωση των καμπυλών απώλειας μάζας. Έτσι, λοιπόν, για κάθε μέσο όρο k και t από έναν μέχρι έντεκα μήνες γίνεται υπολογισμός της αντίστοιχης απώλειας μάζας για κάθε ομάδα δοκιμών. Στο ακόλουθο διάγραμμα, γίνεται συγκριτική παρουσίαση του μέσου όρου απώλειας μάζας για τους έξι και έντεκα μήνες σε κάθε ομάδα δοκιμών.

ΠΙΝΑΚΑΣ 9.3.4

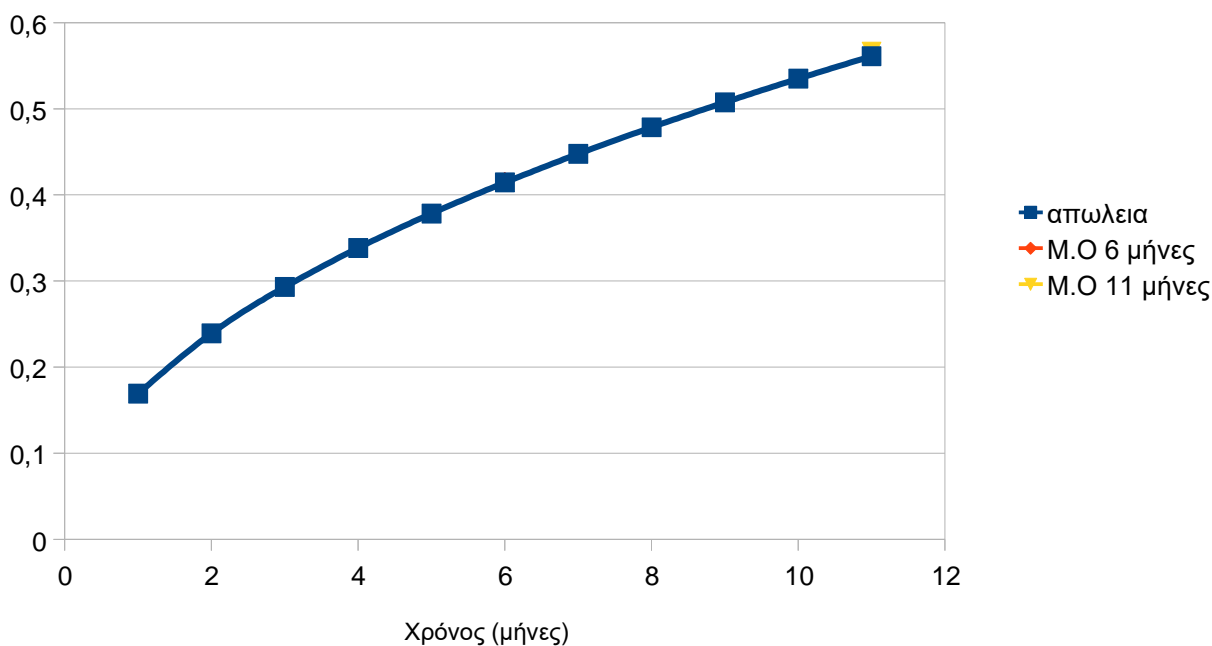
Χρόνος (μήνες)	Απώλεια μάζας για όλες τις κατηγορίες δοκιμών $y^2 = k t$		
	M.O $k(T) = 0,26205$	M.O $k(fer) = 0,02862$	M.O $k(fer+vaf) = 0,02812$
0	0	0	0
1	0,511908195	0,1691746	0,167690191
2	0,72347512	0,23248824	0,237149742
3	0,8865102	0,293018771	0,2904793
4	1,02381639	0,338348932	0,335380381
5	1,144661522	0,378285606	0,3749666665
6	1,253913873	0,41439112	0,410755402
7	1,354381778	0,44793566	0,443666541
8	1,447895024	0,478497649	0,474299483
9	1,535724585	0,507523398	0,503070572
10	1,618795849	0,534976635	0,530282943
11	1,69780741	0,561088228	0,556165443

**Διάγραμμα Απώλειας Μάζας σε σχέση με το χρόνο
για M.O $K=0,26205$ Δοκίμια αναφοράς**



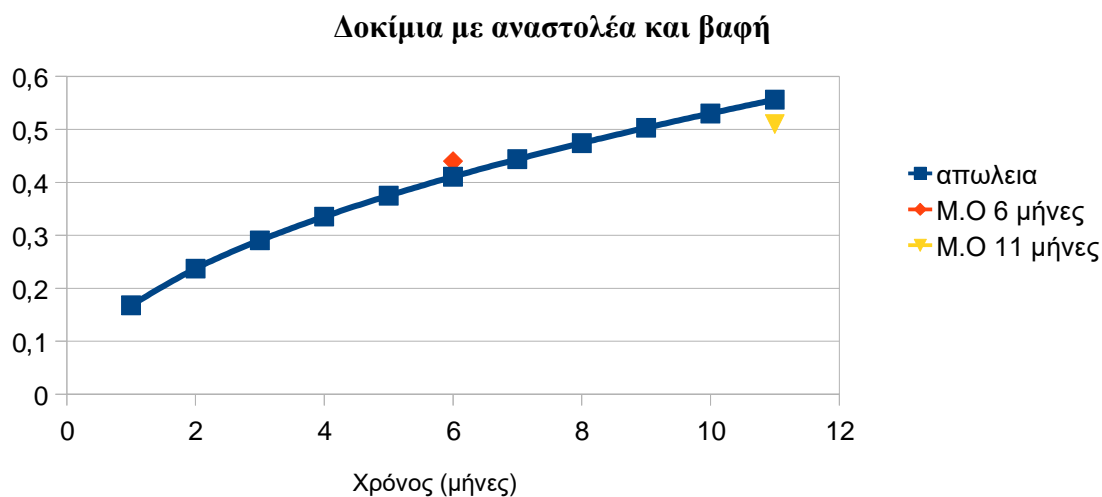
Διάγραμμα 39. Μ.Ο απώλειας μάζας σε σχέση με το χρόνο για τα δοκίμια αναφοράς για τους 6 και τους 11 μήνες με βάση την καμπύλη $y^2 = k t$

Διάγραμμα Απώλειας Μάζας σε σχέση με το χρόνο για Μ.Ο. $K=0,02862$
Δοκίμια με αναστολέα

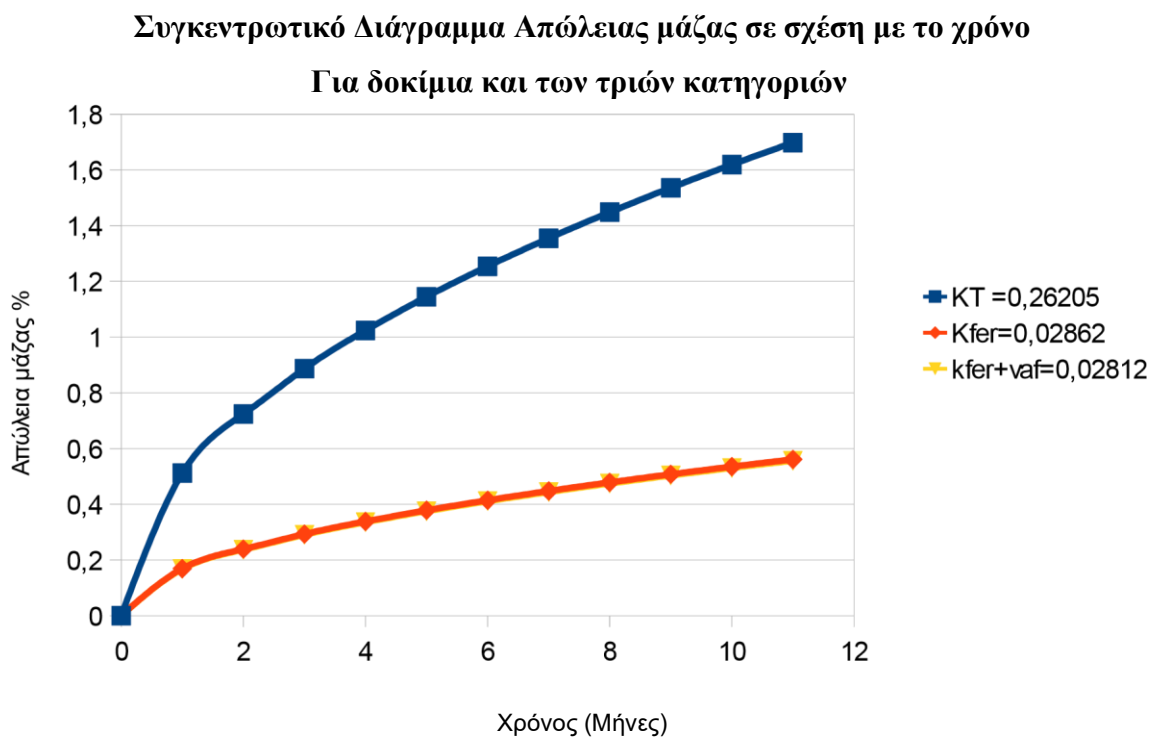


Διάγραμμα 40. Μ.Ο απώλειας μάζας σε σχέση με το χρόνο για τα δοκίμια με αναστολέα διάβρωσης για τους 6 και τους 11 μήνες με βάση την καμπύλη $y^2 = k t$

Διάγραμμα Απώλειας Μάζας σε σχέση με το χρόνο για Μ.Ο $K=0,02812$



Διάγραμμα 40. Μ.Ο απώλειας μάζας σε σχέση με το χρόνο για τα δοκίμια με αναστολέα διάβρωσης και βαφή για τους 6 και τους 11 μήνες με βάση την καμπύλη $y^2 = k t$



Διάγραμμα 41. Συγκεντρωτικό διάγραμμα απώλειας μάζας σε σχέση με το χρόνο για τα δοκίμια με αναστολέα διάβρωσης και βαφή, δοκίμια αναφοράς και τα δοκίμια με αναστολέα με βάση την καμπύλη $y^2 = k t$

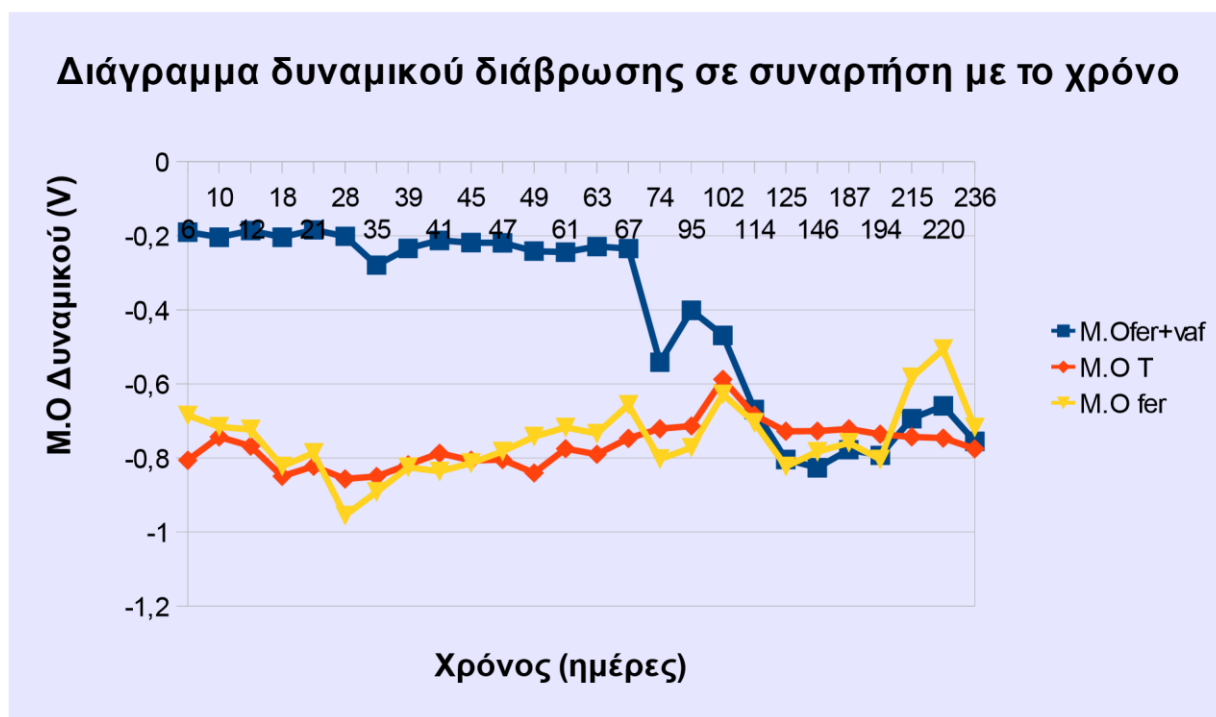
9.4 Νούμερο 3 μερικό συμπέρασμα

Εκ των αποτελεσμάτων της βαρυμετρικής απώλειας μάζας συμπεραίνεται ότι ο οπλισμός προστατεύεται ικανοποιητικά από το δοκίμια με αναστολείς και από αυτά που περιέχουν αναστολείς και έχουν επικαλυφθεί. Όσον αφορά τα δοκίμια με αναστολείς και αυτά που εμπεριέχουν αναστολείς, όπως και βαφή, δεν είναι εφικτή η διάκριση, καθώς οι τιμές που αναφέρονται στην απώλεια μάζας των δοκιμίων δεν διαφοροποιούνται αρκετά.

10^ο Κεφάλαιο: Γενικά συμπεράσματα πειραματικού μέρους

Για την εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων, γίνεται παρουσίαση τριών διαγραμμάτων δυναμικού διάβρωσης σε συνάρτηση με την παράμετρο του χρόνου, θεωρητικής απώλειας μάζας, όπως και του χρόνου βαρυμετρικής απώλειας μάζας σε συνάρτηση με την παράμετρο του χρόνου.

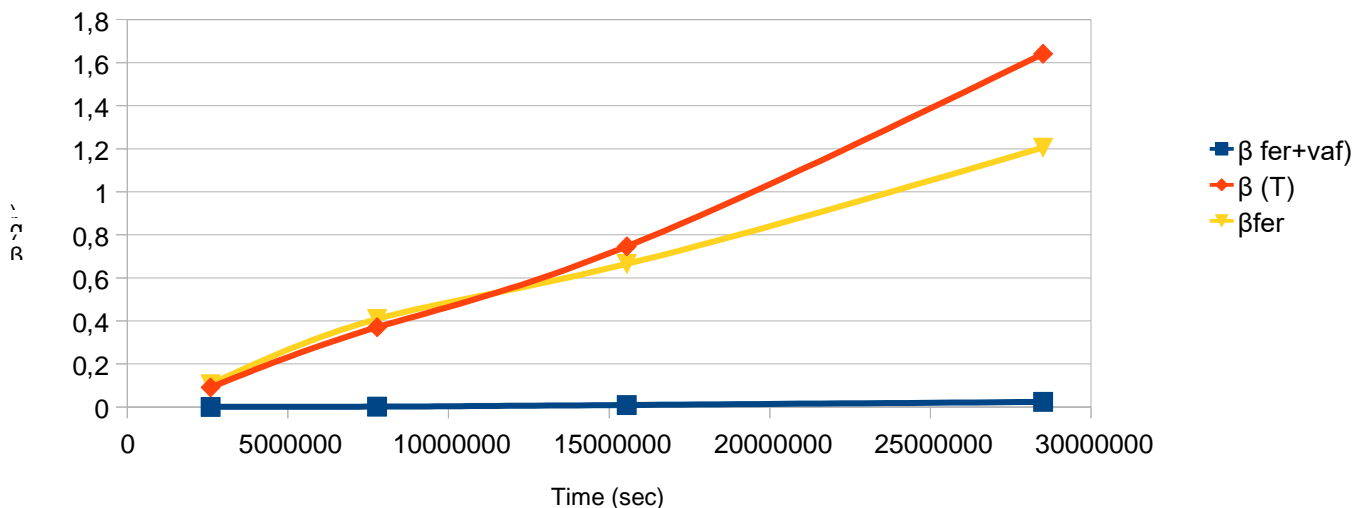
• 1^ο ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ – ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ / ΧΡΟΝΟΥ



Βάσει του διαγράμματος, ο οπλισμός σκυροδέματος προστατεύεται καλύτερα απ' τα δοκίμια που εμπεριέχουν αναστολείς και έχουν επικαλυφθεί. Πανομοιότυπη, ωστόσο, είναι η συμπεριφορά τόσο των δοκιμίων αναφοράς, όσο και των δοκιμίων που περιλαμβάνουν μόνο αναστολείς διάβρωσης.

- **2ο ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ/ ΧΡΟΝΟΥ**

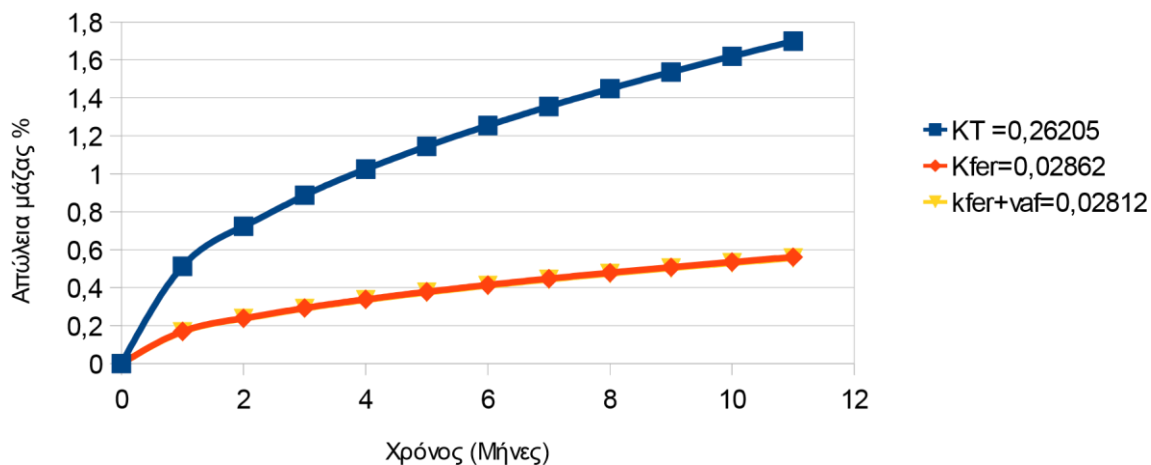
Διάγραμμα Ηλεκτροχημική Απώλεια μάζας σε σχέση με το χρόνο και για τις 3 κατηγορίες δοκιμών



Παρατηρώντας το εν λόγω διάγραμμα, συμπεραίνεται για άλλη μια φορά ότι η αντιμετώπιση των δοκιμών που έχουν επικαλυφθεί και ενέχουν αναστολές διάβρωσης έναντι της διάβρωσης είναι πολύ καλύτερη. Επίσης, τα δοκίμια στα οποία έχει γίνει εφαρμογή αναστολέων διάβρωσης συμπεριφέρονται καλύτερα από τα δοκίμια αναφοράς.

- **3ο ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ – ΒΑΡΥΜΕΤΡΙΚΗ ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ/ ΧΡΟΝΟΣ**

Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Απώλειας μάζας σε σχέση με το χρόνο Για τα δοκίμια και των τριών κατηγοριών



Βάσει του άνω και τελευταίου συγκεντρωτικού διαγράμματος βαρυμετρικής απώλειας μάζας, διαπιστώνεται ότι η συμπεριφορά των δοκιμίων με αναστολείς, όπως και αυτών που είναι επικαλυμμένα και έχουν επίσης αναστολείς διάβρωσης είναι καλύτερη, εν συγκρίσει με τη συμπεριφορά των δοκιμίων αναφοράς. Διαχωρισμοί μεταξύ των δοκιμίων με αναστολείς και αυτών που έχουν επικαλυφθεί και εμπεριέχουν αναστολείς διάβρωσης δεν δύναται να γίνουν, καθώς οι τιμές προσεγγίζουν η μια την άλλη. Αξίζει ακόμη να σημειωθεί, πως εκ των τριών προαναφερθέντων διαγραμμάτων ότι έναντι των διαβρώσεων συμπεριφέρονται καλύτερα τόσο τα δοκίμια με αναστολείς όσο και εκείνα που είναι επικαλυμμένα και εμπεριέχουν επίσης αναστολείς. Βέβαια, η αντιμετώπιση των δοκιμίων με αναστολείς, εν συγκρίσει με τα δοκίμια αναφοράς και αυτά που έχουν αναστολείς και είναι επικαλυμμένα δύναται να χαρακτηριστεί και ως ενδιάμεση.

Βιβλιογραφία

1. Ahiborn, T. Denhartigh, A. (2003), *Comparative study of MMFX reinforcing steel in concrete*, Michigan technology university, Center for Structural Durability.
2. Currie, R.J. (1983). 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.
3. Μαυροειδής, Π. (2005). *Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
4. Μπατής Γ. (1999). *Φθορά και προστασία των υλικών*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.
5. Οπλισμένο Σκυρόδεμα – Βικιπαίδεια
6. Σιδέρης Κ.Κ. (1999). *Τεχνολογία Δομικών Υλικών*, Δ.Π.Θ., Ξάνθη.
7. Σελούντος, Β. Παπαιωάννου Γ. (2000), *Πυρασφάλεια, Εφαρμοσμένη Πυροπροστασία και Στοιχεία Πυρόσβεσης*. Στ. Πειραιώς.
8. Σκουλικίδης, Θ. Ν. (1994). *Διάβρωση και προστασία υλικών*, Αθήνα.
9. Σπανός Χρ., Σπιθάκης Μ. και Τρέζος, Κ. (2001). *Πρακτικά – Διδακτικά Εγχειρίδια. Μέθοδοι για την επιτόπου αποτίμηση των Χαρακτηριστικών των υλικών*, Αθήνα.
10. Τάσιος Θ.Π. και Αλιγιζάκη Κ. (1993). *Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος*. Εκδόσεις Φοίβος, Αθήνα.
11. Τάσιος, Θ. Π. Δεολάτης, Γ. (1984). *Πρακτικός Σχεδιασμός Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα Έναντι Πυρκαγιάς*. Αθήνα.
12. Υφαντής, Δ.Κ. (2000). *Υλικά – Διάβρωση και Προστασία*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.
13. Φαρδής, Μ. Ν. (2005). *Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος ΙΙΙ*, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών.
14. Χάλυβας – Βικιπαίδεια

