

«Αποτελεσματικότητα Ελληνικών Θυσιαζόμενων Ανόδων Μαγνησίου »

Εκπόνηση : Φιλοπούλου Ίρις



Επιβλέπων Καθηγητής :

Καραντώνης Αντώνης, Επίκουρος Καθηγητής, τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών,
Σχολή Χημικών Μηχανικών.

Επιτροπή :

Μανωλάκος Δημήτριος, Καθηγητής, τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών, Σχολή
Μηχανολόγων Μηχανικών.

Μπατής Γεώργιος, Ομότιμος Καθηγητής, Σχολή Χημικών Μηχανικών.

ΕΜΠ - ΑΘΗΝΑ

«Αποτελεσματικότητα Ελληνικών Θυσιαζόμενων Ανόδων Μαγνησίου »

Εκπόνηση : Φιλοπούλου Ίρις

Επιβλέπων Καθηγητής :

Καραντώνης Αντώνης, Επίκουρος Καθηγητής, τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών,
Σχολή Χημικών Μηχανικών.

Επιτροπή :

Μανωλάκος Δημήτριος, Καθηγητής, τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών, Σχολή
Μηχανολόγων Μηχανικών.

Μπατής Γεώργιος, Ομότιμος Καθηγητής, Σχολή Χημικών Μηχανικών.

Επισημάνσεις Συντάκτη

Με τη παρούσα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Μπατή Γεώργιο και τον δρ. Ζαχαροπούλου Αγγελική, για τη καθοδήγηση, τη συνεργασία και την συμβολή τους στην υλοποίηση των δοκιμών και των ελέγχων που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον καθηγητή Καραντώνη Αντώνη, για την ευκαιρία που μου παρείχε και την εμπιστοσύνη του, να εργαστώ σε ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, που πιστεύω ότι με ωφέλησε τόσο στην αναλυτικό τρόπο σκέψης όσο και στην εκμάθηση όρων και πρακτικών που μου ήταν άγνωστες στο παρελθόν.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τους συμφοιτητές μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα και τους φίλους μου, για την υποστήριξη που μου παρείχαν τόσο στη διάρκεια των σπουδών μου όσο και στην ολοκλήρωσή τους μέσω αυτής της εργασίας.

Βιογραφικό Συντάκτη :

Ίρις Φιλοπούλου

Μηχανικός Παραγωγής και Διοίκησης,

Εκπαίδευση :

2011-2016 Πολυτεχνείο Κρήτης – Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης (βαθμός διπλώματος : 7,93).

Διπλωματική Εργασία : «Εκτίμηση της κυκλοφοριακής κατάστασης σε αυτοκινητοδρόμους με συνδεδεμένα οχήματα -Multi-lane traffic state estimation in presence of connected vehicles : A case study in highway I-80 Emeryville, California»

Επαγγελματική Εμπειρία :

Σεπ. 2018 έως σήμερα

Procter& Gamble
Logistics internship – Athens Greece

Ιαν. – Ιουλ. 2018

Coca Cola HBC Βουδαπέστη, Aseptic Apprentice :
• Introduced in all aspects of the company and at the local market.
• Sampling, testing, reporting for various intermediate and final products.
Projects:
• Measurements and minimization of the Dissolved Oxygen in the Fruit Juice,
• Fuzetea pallet Stability issue,
• Edit Labor Water Measurements Videos
• Good Manufacturing Practice Tool.

Ιουλ. - Αύγ. 2014

Ελληνικά Πετρέλαια, Δ/νση Περιβάλλοντος – Βιομηχανικές Εγκαταστάσεις
Ελευσίνας Πρόγραμμα Απασχόλησης Φοιτητών ΑΕΙ. Ταυτοποίηση
εξοπλισμού, εκπαίδευση σε διαδικασίες συντήρησης εξοπλισμού.

2012 - 2016

Πολυτεχνείο Κρήτης και Όμιλος Αντισφαίρισης Σούδας
Προπονητής Αντισφαίρισης

Κατάρτιση και Ενδιαφέροντα :

Άριστη γνώση Αγγλικής
Άριστη γνώση Microsoft Office (Excel, Word, Powerpoint),
Άριστη γνώση MATLAB και Γλώσσες προγραμματισμού (C++)
Εφαρμογές Γραμμικού Προγραμματισμού και Βελτιστοποίησης
Αντισφαίριση, Δρομέας μεγάλων αποστάσεων και Κολύμβηση.

Περιεχόμενα

Abstract	6
Περίληψη	7
Ορισμός.....	8
Εισαγωγή στη διάβρωση των μετάλλων.....	9
1. Διάβρωση.....	10
1.1 Είδη διάβρωσης.....	12
1.1.1 Ομοιόμορφη προσβολή.....	13
1.1.2 Γαλβανική διάβρωση.....	15
1.1.3 Διάβρωση εσοχής (crevice).....	17
1.1.4 Βελονισμός (pitting).....	18
1.1.5 Περικρυσταλλική διάβρωση.....	20
1.1.6 Διάβρωση Φθοράς.....	21
1.1.7 Διάβρωση υπό μηχανική τάση.....	22
1.2 Παράγοντες που επιδρούν στην διάβρωση.....	24
2. Η διάβρωση του χαλκού.....	29
Χαλκός.....	29
2.1 Τρόποι διάβρωσης του χαλκού στο έδαφος και σε υγρό περιβάλλον.....	31
2.2 Παράγοντες που μεταβάλλουν την διαβρωτικότητα του εδάφους.....	37
3. Η διάβρωση του χάλυβα.....	38
Χάλυβας.....	38
3.1 Η διάβρωση του χάλυβα σε υγρό περιβάλλον.....	38
3.2 Η διάβρωση του χάλυβα στο οπλισμένο σκυρόδεμα.....	43
3.2.1 Γενικά για το σκυρόδεμα.....	43
3.3 Διάβρωση σε οπλισμένο σκυρόδεμα.....	50
3.3.2 Διάβρωση σε οπλισμένο σκυρόδεμα σε θαλασσινό νερό.....	55
3.3.3 Διάβρωση οπλισμένου σκυροδέματος στην ατμόσφαιρα.....	56
4. Καθοδική προστασία.....	57
4.1 Καθοδική προστασία με γαλβανικές ανόδους.....	59
4.2 Καθοδική προστασία με επιβολή ρεύματος.....	64
4.3 Επίδραση της καθοδικής δράσης στην καθοδική προστασία.....	68
4.4 Ηλεκτρικές μετρήσεις για τον έλεγχο της καθοδικής προστασίας.....	68
4.5 Ηλεκτρόδιο αναφοράς.....	72
4.6 Επιβεβαίωση προστασίας.....	75
5. Αρχή λειτουργίας STOPCOR.....	77

6.	Πειραματικό μέρος	82
6.1	Γενικά	82
6.2	Ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl	82
6.3	Βολτόμετρο	84
6.4	Καθοδική προστασία σε οπλισμένο σκυρόδεμα	86
6.4.1	Το ρεύμα	86
6.4.2	Η διαδρομή	87
6.4.3	Άνοδοι	88
6.4.4	Κατασκευή δοκιμών	89
6.4.5	Εφαρμογή καθοδικής προστασίας	92
6.4.6	Μέτρηση των δυναμικών προστασίας	95
6.4.7	Αποτελέσματα – Συμπεράσματα	96
6.5	Καθοδική προστασία σε χάλκινους σωλήνες σε θαλασσινό νερό και στο έδαφος	103
6.5.1	Κατασκευή δοκιμών	103
6.5.2	Εφαρμογή Καθοδικής Προστασίας	104
6.5.3	Μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης	105
6.5.4	Αποτελέσματα-Συμπεράσματα	107
7.	Συζήτηση Αποτελεσμάτων	110
8.	Γενικά Συμπεράσματα	111
9.	Προτάσεις για την συνέχιση της έρευνας	112
10.	Βιβλιογραφικές Αναφορές	113
11.	Αναφορά Εικόνων	116
12.	Αναφορά Πινάκων	118

Abstract

Subject of this thesis is the analysis of an experimental study that took place at the National Technical University of Athens in the framework of the postgraduate program "Material Science and Technology", aiming to investigate the effectiveness of an anticorrosion protection method for steel reinforcing in concrete and copper in soil and in sweet water.

The effectiveness of the protection method was examined with the help of STOPCOR equipment. STOPCOR is able to provide cathodic protection current by the use of sacrificial anodes (Magnesium Anodes) in a special designed environment. STOPCOR equipment acts as a rectifier, which supplies negative potential to the installation we need to protect. In this way, the under protection structure works as a cathode and it is protected.

Prior to the in-depth analysis of the experimental part, the operating principle of the sacrificial anode (STOPCOR), the reference electrode and the voltmeter were analyzed. In the experimental part the stage to stage experiment was analyzed from the creation of the samples to the conclusions on the effectiveness of cathodic protection on copper buried in soil and immersed in fresh water and in concrete steel reinforcement.

The results of the experiment were analyzed and the results is that cathodic protection works effectively in an environment of lower specific resistance, such as water, concrete and soil. The amount of magnesium contained in STOPCOR equipment was not enough to function effectively in a highly corrosive environment.

In conclusion, in order to improve the efficiency of STOPCOR equipment, it is necessary to select the proper STOPCOR anode weight in respect with the resistance of the electrolyte surrounding the metal. Care should also be taken in the metal surface to be protected. Use of STOPCOR can be effective on reinforced building concrete, but also on copper pipes immersed in water or installed in the ground.

Περίληψη

Το αντικείμενο της εργασίας αναλύει μια πειραματική μελέτη που έγινε σε χώρο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στα πλαίσια του μεταπτυχιακού «Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών» με στόχο την διερεύνηση της αποτελεσματικότητας μεθόδου προστασίας τόσο του χάλυβα σε οπλισμό σκυροδέματος και του χαλκού στο έδαφος και σε γλυκό νερό. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου προστασίας εξετάστηκε με την βοήθεια εξοπλισμού STOPCOR, κάνοντας χρήση θυσιαζόμενων ανόδων. Ο εξοπλισμός του STOPCOR λειτουργεί ως ανορθωτής, ο οποίος επιφορτίζει αρνητικά την εγκατάσταση που επιδιώκουμε να προστατεύσουμε. Με τον τρόπο αυτό, η εγκατάσταση λειτουργεί ως κάθοδος, όπου και προστατεύεται.

Σε πρώτο στάδιο, έγινε μια συνολική ανασκόπηση για τον όρο «διάβρωση», καθώς και τα είδη διάβρωσης που παρουσιάζονται σε ένα υλικό, αλλά ακόμη και τους παράγοντες αυτούς που βοηθούν στην ανάπτυξή της.

Σε επόμενο στάδιο, αναλύθηκε η διάβρωση τόσο του χαλκού, όσο και του χάλυβα σε διάφορα διαβρωτικά περιβάλλοντα. Συνολική ανασκόπηση έλαβε μέρος για το σκυρόδεμα και το τσιμέντο, καθώς ακόμη αναπτύχθηκαν αναλυτικά οι πρώτες ύλες, τα είδη, οι ιδιότητες, οι παράγοντες που τα επηρεάζουν και οι τρόποι παρασκευής τους.

Στην συνέχεια της διπλωματικής, έγινε ανάλυση της διαδικασίας της καθοδικής προστασίας με γαλβανικές ανόδους και με επιβολή ρεύματος. Ακόμη, αναφορά έγινε και στις ηλεκτρικές παραμέτρους που αναζητούμε έτσι ώστε να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα της καθοδικής προστασίας σε ένα εξάρτημα.

Πριν τη ανάλυση σε βάθος του πειραματικού μέρους αναλύθηκαν η αρχή λειτουργίας της θυσιαζόμενης ανόδου (STOPCOR), του ηλεκτροδίου αναφοράς και του βολτομέτρου. Στο πειραματικό μέρος αναλύθηκε στάδιο-στάδιο το πείραμα από την δημιουργία των δοκιμίων μέχρι τα συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα της καθοδικής προστασίας σε χαλκό θαμμένο σε έδαφος και βυθισμένο σε γλυκό νερό και σε χαλύβδινο οπλισμό στο σκυρόδεμα.

Τα αποτελέσματα του πειράματος αναλύθηκαν και έδειξαν ότι, η καθοδική προστασία λειτουργεί αποτελεσματικά σε περιβάλλον μικρότερης ειδικής αντίστασης, όπως στο νερό. Στο σκυρόδεμα και το έδαφος δεν ήταν αρκετή η ποσότητα μαγνησίου που περιεχόταν στο εξοπλισμό του STOPCOR για να λειτουργήσει αποτελεσματικά η προστασία σε έντονο διαβρωτικό περιβάλλον.

Συμπερασματικά, για την βελτίωση της αποτελεσματικότητας του εξοπλισμού STOPCOR στην καθημερινότητα, απαραίτητη είναι επιλογή οπλισμού STOPCOR ανάλογα με την αντίσταση του ηλεκτρολύτη που περιβάλλει το μέταλλο και ακόμη προσοχή πρέπει να δοθεί και στην έκταση του μετάλλου που πρόκειται να προστατευθεί. Χρήση του STOPCOR μπορεί να γίνει σε οπλισμένα σκυροδέματα κτηρίων, αλλά ακόμη και σε χάλκινες σωληνώσεις εμβαπτισμένες σε νερό ή στο έδαφος.

Ορισμός

Το φαινόμενο της διάβρωσης των μετάλλων και των κραμάτων ήταν γνωστό ήδη από την Μινωική εποχή, όταν ο άνθρωπος άρχισε να χρησιμοποιεί χάλκινα σκεύη και παρατήρησε ότι μετά από ένα χρονικό διάστημα από την παραγωγή του αντικειμένου, έχανε την στιλπνότητά του. Αυτή ήταν η πρώτη παρατήρηση για την διάβρωση των μετάλλων. Αργότερα τον δεύτερο αιώνα μΧ. ο Πλούταρχος μελέτησε λεπτομερώς την διάβρωση των ορειχάλκινων αγαλμάτων των Δελφών.

Στη σύγχρονη εποχή η ανάπτυξη της χρησιμοποίησης των μετάλλων και των κραμάτων και η ρύπανση του περιβάλλοντος έδωσαν νέα ώθηση στην μελέτη του φαινομένου της διάβρωσης.

Ο ορισμός της διάβρωσης από την διεθνή επιτροπή θαλάσσιας διάβρωσης και ρύπανσης έχει ως εξής:

«Διάβρωση καλείται κάθε αυθόρμητη, κατά επέκταση εκβιασμένη, ηλεκτροχημική, κατά επέκταση χημική ή μηχανική, φύσεως αλλοίωση της επιφανείας των μετάλλων ή κραμάτων που οδηγεί στην απώλεια υλικού». (Χαλατσόπουλος, 2009, σελ 10)

Σύμφωνα με το πρότυπο DIN 50900 και το πρότυπο του ΕΛΟΤ για την διάβρωση ο ορισμός της διάβρωσης είναι ο ακόλουθος:

«Διάβρωση είναι η αντίδραση ενός υλικού με το περιβάλλον του, η οποία προκαλεί μια μετρήσιμη μεταβολή του υλικού. Μπορεί να υποβαθμίσει τη λειτουργία ενός μεταλλικού εξαρτήματος ή ενός ολοκλήρου συστήματος. Η φύση της διάβρωσης στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ηλεκτροχημική, σε μερικές όμως μπορεί να είναι χημική ή και φυσικό-μεταλλουργική».

Διάβρωση των μετάλλων

Ως μηχανική αλλοίωση εννοείται κάθε επιφανειακή μηχανική κάκωση, εξαιτίας της λειτουργίας ενός μηχανήματος (από τριβή, κρούση, μηχανική καταπόνηση), από αμμοβολή, εξάχνωση από τη δημιουργία υποπίεσης, κλπ. Οι αλλοιώσεις αυτές ανήκουν στην κατηγορία της εκβιασμένης διάβρωσης. Η αμμοβολή, για κάθαρση της επιφάνειας των μετάλλων, μπορεί να ανήκει στις αυθόρμητες μηχανικές διαβρώσεις όταν ένα υλικό βάλλεται από τα αιωρούμενα στον αέρα σωματίδια. Στις αυθόρμητες διαβρώσεις μπορεί να υπάγονται και οι καταπονήσεις από τριβή, κρούση, μηχανική καταπόνηση, όταν ένα υλικό δέχεται την επίδραση της ροής των νερών των ποταμών ή τον κυματισμό της θάλασσας. (Ζαχαροπούλου, 2014, σελ 41)

Ως επιφάνεια δεν εννοείται μόνο η γεωμετρική επιφάνεια, αλλά η πραγματική επιφάνεια, που σε αυτή ανήκουν και οι επιφανειακές ανωμαλίες, πόροι, ενεργά κέντρα και οι ενεργοί δρόμοι από αταξίες δομής. Τονίζεται ότι μόνο αυτή η επιφάνεια είναι έδρα των φαινομένων της διάβρωσης και όχι όλη η μάζα του σώματος, που παθαίνει διάβρωση. (Ζαχαροπούλου, 2014, σελ 41)

Θα πρέπει επίσης να διευκρινιστεί ότι ως απώλεια υλικού (συνέπεια της διάβρωσης) δεν σημαίνει πάντα ότι το βάρος του σώματος μικραίνει. Αντίθετα υπάρχουν περιπτώσεις

όπου ο σχηματισμός στην επιφάνεια ενώσεων με έντονη πρόσφυση σε αυτή, έχει ως συνέπεια την αύξηση του βάρους του υλικού. Ως απώλεια υλικού εννοείται η απώλεια ως προς την αρχική του μορφή. Στην περίπτωση του σιδήρου, όταν ποσό αυτού μετατρέπεται εξαιτίας της διάβρωσης, σε οξείδιο, η μορφή, που σε αυτή βρίσκεται ο σίδηρος στο οξείδιο, δεν είναι η αρχική μεταλλική μορφή του και θεωρείται το ποσό αυτό του σιδήρου ως απώλεια υλικού. (Ζαχαροπούλου, 2014, σελ 41)

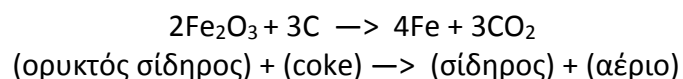
Το φαινόμενο της διάβρωσης έχει μεγάλη οικονομική σημασία. Θεωρείται ότι το 40% των παγκοσμίων παραγομένων μετάλλων και κραμάτων καταστρέφεται από την διάβρωση. Αυτό είναι σωστό, αν ληφθεί υπόψη ότι το ποσόν των μετάλλων που καταστρέφεται από την διάβρωση είναι μικρότερο αλλά οι επιπτώσεις της διάβρωσης οδηγούν στο 40 %. Για παράδειγμα στα ελάσματα των πλοίων ή στα φτερά των αεροπλάνων αρκεί η εμφάνιση μίας εσοχής από διάβρωση (με βελονισμούς) για να επιβληθεί η αντικατάστασή τους.

Για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της διάβρωσης έχουν πραγματοποιηθεί, ιδιαίτερα μετά το 1958, πολυάριθμες ερευνητικές προσπάθειες οι οποίες έχουν οδηγήσει σε ανάπτυξη πολυαριθμών μεθόδων προστασίας. Στην Ελλάδα το θαλάσσιο περιβάλλον οδηγεί σε εμφάνιση σημαντικών προβλημάτων από την διάβρωση με αξιόλογες οικονομικές επιπτώσεις.

Εισαγωγή στη διάβρωση των μετάλλων

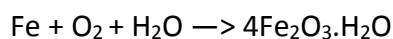
Η διαδικασία της παραγωγής των μετάλλων απαιτεί την προσφορά μεγάλων ποσών ενέργειας. Για παράδειγμα η παραγωγή του χάλυβα από τα οξείδια του σιδήρου πραγματοποιείται με αναγωγή στις υψικαμίνους με καύση μεγάλων ποσοτήτων άνθρακα (κοκ). Το προϊόν των υψικαμίνων είναι ο χυτοσίδηρος. Με καύση μέρους του άνθρακα σε κατάλληλες καμίνους παράγεται ο χάλυβας.

Η παραπάνω δράση δίνεται ως χημική αντίδραση ως εξής: (Ζαχαροπούλου, 2014, σελ 42)



Η όλη διαδικασία απαιτεί μεγάλες ποσότητες ενέργειας με την μορφή της θερμότητας. Επομένως η εσωτερική ενέργεια του χάλυβα είναι πολύ υψηλότερη των οξειδίων του σιδήρου. Σύμφωνα με το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα όλα τα συστήματα τείνουν να αποκτήσουν την ελάχιστη εσωτερική ενέργεια. Στην περίπτωση του χάλυβα αυτό μπορεί να γίνει με την επιστροφή στην αρχική του μορφή δηλαδή των οξειδίων κατά την διάβρωση στην ατμόσφαιρα (οξυγόνο, υγρασία) ή στο νερό (διαλυμένο οξυγόνο). Η προδιάθεση των μετάλλων για οξείδωση εκφράζεται από το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο και είναι η αντίστροφη της παραγωγής του μετάλλου.

Κατά συνέπεια, όταν ο χάλυβας εκτίθεται σε περιβάλλον υγρασίας και με διαθέσιμο οξυγόνο τείνει να υποβαθμιστεί ενεργειακά επανερχόμενο τελικά στην αρχική του φυσική κατάσταση. (Baermann et al., 1997, σελ 140)



(Σίδηρος)

(Σκουριά)

Η προδιάθεση των μετάλλων εξαρτάται από την φύση τους και από τις συνθήκες του περιβάλλοντος τους. Η πλειοψηφία των μετάλλων που βρίσκονται στην φύση είναι με την μορφή οξειδίων ενώσεων (ορυκτά), εκτός από το υδρογόνο, χρυσό και μερικές φορές τον χαλκό που προέρχονται από αναγωγικές δράσεις. Τα ορυκτά /μεταλλεύματα μέσω της μεταλλουργίας μετατρέπονται σε μέταλλα.

Ο ρυθμός διάβρωσης του μετάλλου ή του κράματος εξαρτάται από το περιβάλλον διάβρωσης. Η διάβρωση που χαρακτηρίζεται ως αυθόρμητη και λαμβάνει μέρος σε περιβάλλον αέρα, γλυκό ή θαλασσινό νερό ή στο έδαφος. Σε έντονο διαβρωτικό περιβάλλον (όπως χημικές ουσίες, υψηλή θερμοκρασία, ραδιενέργεια, ανοδική ηλεκτρική φόρτιση κλπ.) η διαδικασία της διάβρωσης επιταχύνεται και σε αυτή την περίπτωση η διάβρωση χαρακτηρίζεται ως εκβιασμένη.

1. Διάβρωση

Στον σύγχρονο επιχειρησιακό-ανταγωνιστικό περιβάλλον, οι επιχειρήσεις που στοχεύουν στην επιτυχία θα πρέπει να δώσουν ιδιαίτερη σημασία στην διάβρωση. Επιδιώκουν να αποτρέψουν φαινόμενα που οφείλονται στην διάβρωση όπως τραυματισμοί, θάνατοι, μη προγραμματισμένες διακοπές λειτουργίας την παραγωγικής διαδικασίας καθώς και περιβαλλοντική επιβάρυνση. Ιδιαίτερα ευαίσθητες στο θέμα διάβρωσης θα πρέπει να είναι οι λεγόμενες βαριές βιομηχανίες, όπου εκτελούν και πολύπλοκες λειτουργίες (Roberge, 2008). (Κορτίνας και Κασβίκης, 2015, σελ 10)



Εικόνα 1 : Φαινόμενο διάβρωσης σε μέταλλο (αλυσίδα άγκυρας)

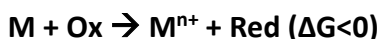
Η διάβρωση, κατά κύριο λόγο, είναι μια ηλεκτροχημική διαδικασία. Όλα τα μέταλλα βρίσκονται σε ένα ηλεκτρικό αγώγιμο περιβάλλον και εμφανίζουν ηλεκτρικό δυναμικό σε σχέση με το περιβάλλον. Τα είδη των μετάλλων και το είδος του ηλεκτρολύτη που βρίσκεται σε επαφή με τη μεταλλική επιφάνεια προκαλεί μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού της. Δυο βασικές διαδικασίες λαμβάνουν μέρος όταν η μεταλλική επιφάνεια τοποθετείται σε έναν ηλεκτρολύτη.

Αρχικά, η πρώτη διαδικασία ονομάζεται οξείδωση και λαμβάνει χώρα όταν τα ηλεκτρικά δυναμικά διαφέρουν μεταξύ του διαλύματος ηλεκτρολύτη και της μεταλλικής επιφάνειας. Τα μεταλλικά άτομα ιονίζονται σε θετικά φορτισμένα σωματίδια και αφήνουν μια περίσσεια ηλεκτρονίων (αρνητικά φορτισμένων) πάνω στην μεταλλική επιφάνεια.

Έπειτα, η δεύτερη διαδικασία που λαμβάνει μέρος ονομάζεται αναγωγή και λαμβάνει χώρα όταν τα μέταλλα έρχονται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη που περιέχει θετικά φορτισμένα ιόντα. Τα θετικά αυτά φορτισμένα ιόντα ανακατεύονται με τα ηλεκτρόνια που είναι διαθέσιμα στην επιφάνεια του μετάλλου. Σαν αποτέλεσμα, υπάρχει ένα θετικό δυναμικό στο μέταλλο διότι ηλεκτρόνια χρησιμοποιήθηκαν από το μέταλλο για να εξισορροπήσουν τα θετικά φορτισμένα σωματίδια που βρίσκονται στο διάλυμα. (American Gas Association, 1986, σελ 6)



Συνολικά:

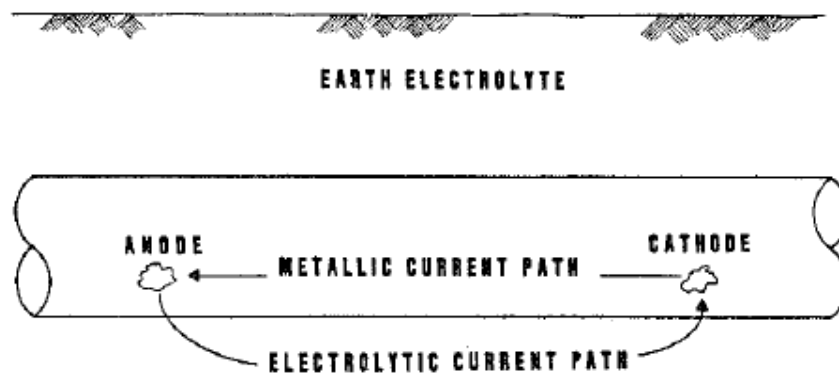


Με τον συνδυασμό αυτών των δυο διαδικασιών οξείδωσης και αναγωγής υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης του ηλεκτρικού δυναμικού του μετάλλου σε σχέση με το περιβάλλον του.

Η διάβρωση λαμβάνει χώρα πιο συγκεκριμένα όταν, σε ένα μέταλλο που έρχεται σε επαφή με ένα ηλεκτρικά αγώγιμο περιβάλλον, υπάρχει ροή ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ μεταλλικών επιφανειών που διαφέρουν σε δυναμικό. Με άλλα λόγια, διάβρωση υπάρχει όταν ρεύμα ρέει από μια διαβρωτική επιφάνεια που ονομάζεται άνοδος σε μια άλλη μεταλλική επιφάνεια που ονομάζεται κάθοδος, μέσω ηλεκτρολύτη. Το ρεύμα επιστρέφει στο σημείο εκκίνησης μέσω της διαδρομής μεταξύ ανόδου και καθόδου και όχι μέσω του ηλεκτρολύτη. Έτσι το ρεύμα οδηγείται από την διαφορά δυναμικού μεταξύ της ανόδου και τις καθόδου.

Η ποσότητα της απώλειας του μετάλλου στο κομμάτι της διάβρωσης είναι ανάλογη με το μέγεθος και τη διάρκεια του ρεύματος που ρέει από την άνοδο και το είδος του μετάλλου που εμπλέκεται στην διαδικασία αυτή.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η διαφορά δυναμικού μέσα στο σωλήνα είναι η αιτία που οδηγεί το ρεύμα κυκλικά, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα. Η διάβρωση μετάλλων εμφανίζεται στην επιφάνεια του μετάλλου όπου το ρεύμα εκκενώνεται μέσα σε ηλεκτρολύτη ακόμα και αν η απόσταση μεταξύ ανόδου και καθόδου είναι αρκετά μεγάλη. Η λογική αυτή εξηγεί και την παρουσία ατμοσφαιρικής διάβρωσης σε μεταλλική δομή στην οποία η υγρασία της ατμόσφαιρας παίρνει το ρόλο του ηλεκτρολύτη.



Εικόνα 2 : Διάβρωση σωλήνα .(American Gas Association, 1986, σελ 6)

1.1 Είδη διάβρωσης

Διαφορετικά κριτήρια χρησιμοποιούνται για την κατάταξη των τύπων της διάβρωσης. Σύμφωνα με το πρότυπο DIN 500900, η διάβρωση χωρίζεται στη με και χωρίς μηχανική καταπόνηση διάβρωσης. Η διάβρωση χωρίς μηχανική καταπόνηση χωρίζεται σε 18 τύπους, ενώ με μηχανική χωρίζεται σε 6 τύπους. Με κριτήριο τη γεωμετρική κατανομή της διάβρωσης στην επιφάνεια χωρίς μηχανική καταπόνηση μπορούν να διακριθούν δύο τύποι: η ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση. Στην ομοιόμορφη διάβρωση η επιφάνεια του μετάλλου καλύπτεται από ένα ομοιόμορφο στρώμα διάβρωσης, όπως για παράδειγμα συμβαίνει στην διάλυση των μετάλλων σε οξέα. Η τοπική διάβρωση συμβαίνει όταν η προσβολή είναι εντοπισμένη σε συγκριμένες περιοχές της επιφάνειας, όπου υπάρχει και διαφορετική ταχύτητα διάβρωσης στην επιφάνεια. (Κορτίνας και Κασβίκης, 2015, σελ 16)

Με βάση της αιτίες που την προκαλούν η διάβρωση μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως εξής:

- Ηλεκτροχημική διάβρωση
- Χημική διάβρωση
- Μηχανική διάβρωση

- Βιολογική διάβρωση (Παντελής & Τσιούρβα, 2012)

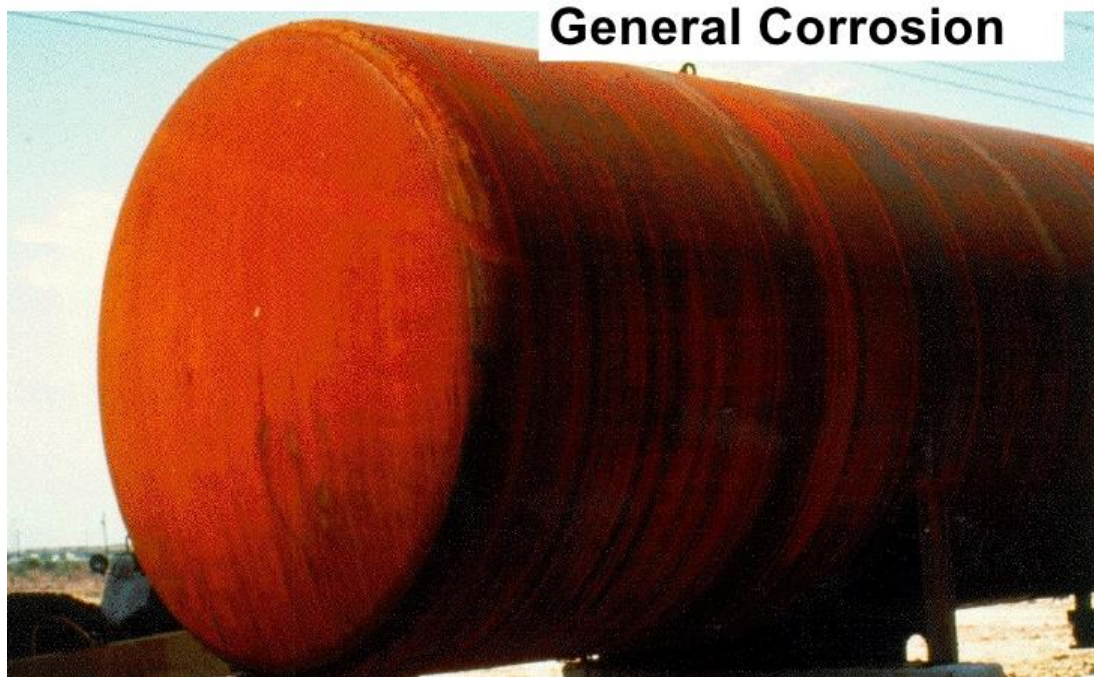
Με βάση τον τρόπο τον οποίο λαμβάνει μέρος η διάβρωση ταξινομείται σε οκτώ κατηγορίες (Callister, 2008):

- Η ομοιόμορφη προσβολή
- Η γαλβανική διάβρωση
- Η διάβρωση εσοχής (crevice)
- Ο βελονισμός (pitting)
- Η περικρυσταλλική διάβρωση
- Διάβρωση φθοράς
- Διάβρωση υπό μηχανική τάση

1.1.1 Ομοιόμορφη προσβολή

Η ομοιόμορφη διάβρωση είναι το πιο διαδεδομένο είδος διάβρωσης και προσδίδει την μεγαλύτερη καταστροφή στο μέταλλο σε τόνους σε ετήσια βάση. Με την ομοιόμορφη διάβρωση μπορεί να προβλεφθεί η διάρκεια ζωής της κατασκευής χρησιμοποιώντας πειράματα εμβάπτισης. Αντίθετα, δύσκολη είναι η πρόβλεψη της, όταν υπάρχει εσωτερικά, όπως σε κάποιο αγωγό ή σε κάποιο βυθισμένο μέρος μιας κατασκευής.

Η ομοιόμορφη διάβρωση εκδηλώνεται με ισοδύναμη ένταση πάνω σε ολόκληρη επιφάνεια, ενώ πίσω της εμφανίζει ένα επικάθισμα ή μια εναπόθεση. Η διάβρωση, αυτή, εμφανίζεται στην επιφάνεια του μετάλλου ή κράματος ως ένα ομοιόμορφο, περίπου ισόπαχο, στρώμα προϊόντος διάβρωσης όπως στο σχήμα 3. Ακόμη μπορεί αντί να σχηματιστεί στρώμα προϊόντος να υπάρξει ομοιόμορφη διάλυση του μετάλλου στο διαβρωτικό περιβάλλον. (Ιωσηφίδου, 2009, σελ 10)



Εικόνα 3 : Ομοιόμορφη διάβρωση

Η ομοιόμορφη διάβρωση έχει παρατηρηθεί όταν το μέταλλο βρίσκεται σε επαφή με κάποιο οξύ ή διάλυμα. Ακόμη η εμφάνιση της μπορεί να παρατηρηθεί και σε ξηρή ατμόσφαιρα με χαμηλές θερμοκρασίες. (Ιωσηφίδου, 2009) Παράδειγμα της ομοιόμορφης διάβρωσης είναι η γενική σκωρίαση που παρατηρείται στους χάλυβες και στο σίδηρο, όπως και στο αμαύρωμα των ασημικών. (Σχήμα 4) Ένα ακόμη παράδειγμα είναι η διάβρωση των κραμάτων χαλκού σε θαλασσινό περιβάλλον. (Κορτίνας και Κασβίκης, 2015, σελ 17)



Εικόνα 4 : Αμαύρωμα ασημικών

1.1.2 Γαλβανική διάβρωση

Γαλβανική διάβρωση είναι η απώλεια μετάλλου που σχετίζεται με το ρεύμα που παράγεται από την σύζευξη μετάλλων με ανόμοια δυναμικά στον ηλεκτρολύτη. Όταν τα δυο είδη μετάλλων με διαφορετικό δυναμικό συνδεθούν μεταξύ τους το λιγότερο ευγενές μέταλλο ή αλλιώς περισσότερο δραστικό μέταλλο στο συγκεκριμένο περιβάλλον θα υποστεί διάβρωση, ενώ το πιο αδρανές μέταλλο θα προστατευτεί. (Ιωσηφίδου, 2009, σελ 12) Η γαλβανική διάβρωση εμφανίζεται κυρίως στις συνδέσεις των μετάλλων ή στις περιοχές όπου κάποιο μέταλλο διαδέχεται το άλλο. Για παράδειγμα, οι γαλβανικές βίδες όταν έρχονται σε επαφή με τον ορείχαλκο σε θαλασσινό περιβάλλον ή οι χάλκινες με τις χαλύβδινες σωληνώσεις, η διάβρωση εμφανίζεται κοντά στην περιοχή της σύνδεσης.



Εικόνα 5 : Γαλβανική διάβρωση

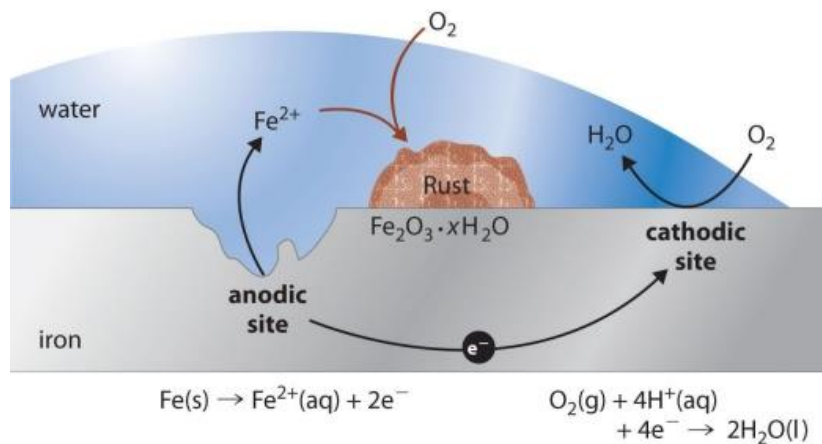
Ο ρυθμός με τον οποίο συμβαίνει γαλβανική διάβρωση εξαρτάται από: (Ιωσηφίδου, 2009)

1. Την διαφορά δυναμικού μεταξύ ανόδου και καθόδου
2. Την αντίσταση του ηλεκτρολύτη
3. Το μέγεθος των επιφανειών καθόδου και ανόδου που είναι εκτεθειμένες στον ηλεκτρολύτη
4. Την υγρασία.

Ο ρυθμός διάβρωσης εξαρτάται από την πυκνότητα του ρεύματος (ρεύμα ανά μονάδα επιφάνειας που υφίσταται διάβρωση). Με την απουσία υγρασίας, δεν υπάρχει

ηλεκτρολύτης όπου θα μπορούσε να μεταφερθεί το ρεύμα, άρα συμπερασματικά είναι και αδύνατη η εμφάνιση της γαλβανικής διάβρωσης.

Το φαινόμενο της γαλβανικής διάβρωσης εξελίσσεται όπως φαίνεται στο σχήμα 6:



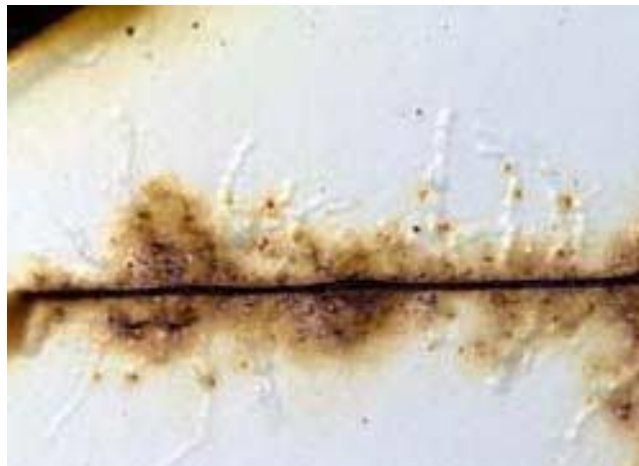
Εικόνα 6 : Διαδικασία της γαλβανικής διάβρωσης (Αργυροπούλου, 2018, σελ 25)

Η διαφορά δυναμικού των δύο μετάλλων προκαλεί ροή ηλεκτρονίων από τον σίδηρο προς το ευγενέστερο μέταλλο. Η απώλεια των ηλεκτρονίων προκαλεί αποδέσμευση κατιόντων σιδήρου τα οποία στη συνέχεια σχηματίζουν οξειδία του σιδήρου με το οξυγόνο του νερού (σκουριά). Τα ηλεκτρόνια στην πλευρά του χαλκού μαζί με το οξυγόνο που είναι διαλυμένο στο νερό και τα κατιόντα υδρογόνου σχηματίζουν νερό.

Γενικά, βαλτώδεις περιοχές συνήθως σχηματίζουν ένα ηλεκτρολύτη χαμηλής ειδικής αντίστασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ροή του ρεύματος να είναι μεγαλύτερη για μεταλλικές κατασκευές τοποθετημένες σε αυτές τις περιοχές και έτσι η διάβρωση να είναι αντιστοίχως υψηλή. Από την άλλη μεριά, σε ομοιογενείς ηλεκτρολύτες η αντίσταση της ροής του ρεύματος στο τμήμα της διάβρωσης είναι ανάλογο με την απόσταση της ανόδου με την κάθοδο. Όπως αναφέρθηκε και στους παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση εάν μια μικρή επιφάνεια ανόδου εκτίθεται σε μια μεγάλη επιφάνεια καθόδου παρουσιάζεται επιτάχυνση της διάβρωσης. Με άλλα λόγια όταν μια μεγάλη χάλκινη επιφάνεια καθόδου βρίσκεται σε επαφή με επικαλυμμένο χάλυβα που διαθέτει αστοχίες στην επικάλυψή του, τότε ο χάλυβας διαβρώνεται γρήγορα. (Κορτίνας και Κασβίκης, 2015)

1.1.3 Διάβρωση εσοχής (crevice)

Η διάβρωση εσοχής πρόκειται για ηλεκτροχημική προσβολή που οφείλεται σε διαφορά συγκεντρώσεων σε περιοχές του διαβρωτικού περιβάλλοντος οι οποίες αντιστοιχούν σε γειτονικά τμήματα της μεταλλικής επιφάνειας. Η διάβρωση αυτή γίνεται φανερή συνήθως σε σχισμές, εσοχές ή κάτω από ακαθαρσίες και προϊόντα διάβρωσης, όπου παρατηρείται μικρότερη συγκέντρωση. Τέτοιες θέσεις είναι στάσιμες περιοχές όπου συνήθως παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης σε κάποιο συστατικό του διαβρωτικού περιβάλλοντος (για παράδειγμα το διαλυμένο οξυγόνο). (Ιωαννίδης, 2018) Από την άλλη η συγκέντρωση της εσοχής θα πρέπει να είναι αρκετά ευρεία, έτσι ώστε να εισχωρεί το διάλυμα, αλλά ταυτόχρονα επαρκώς στενή, έτσι ώστε να δημιουργείται στασιμότητα.

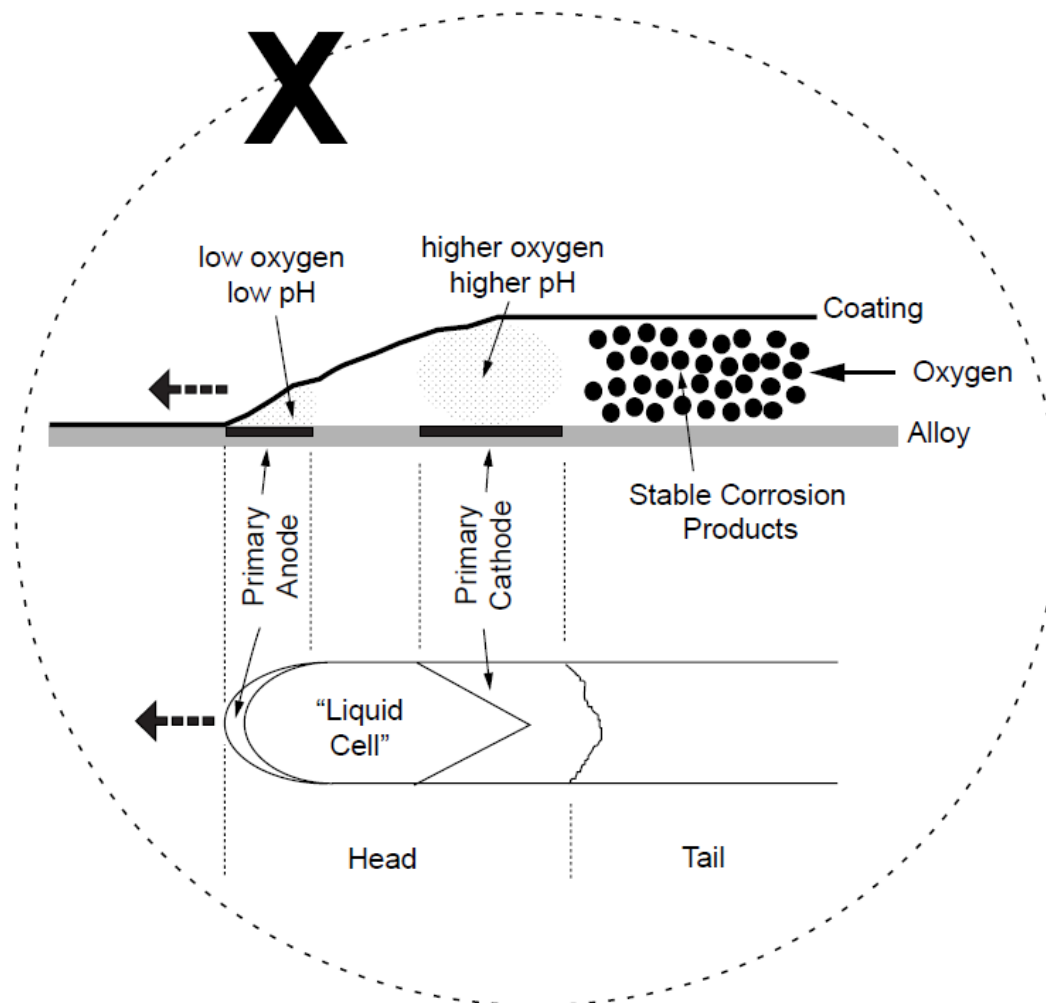


Εικόνα 7 : Διάβρωση εσοχής

Οι εσοχές αυτές οφείλονται συνήθως σε κάποιες ατέλειες που εμφανίζονται στην μέθοδο κατασκευής.

Ο βασικός μηχανισμός είναι ουσιαστικά ο ίδιος όπως στη γαλβανική διάβρωση, αλλά στην περίπτωση της διάβρωσης σε σχισμές, η κατευθυντήρια δύναμη είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ των περιοχών του ίδιου του μετάλλου που εκτίθεται σε διαφορετικά περιβάλλοντα και όχι η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο διαφορετικών μετάλλων που εκτίθενται στο ίδιο περιβάλλον. Στη διάβρωση χαραγής, η αντίσταση του ηλεκτρολύτη στη ροή των ιόντων μπορεί επίσης να είναι ένας σημαντικός παράγοντας στον περιορισμό της διάβρωσης. Αυτή η μορφή διάβρωσης είναι συχνά δύσκολο να αποφευχθεί κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού. (Κορτίνας και Κασβίκης, 2015, σελ 22) (Χαλατσόπουλος, 2009, σελ 14)

Πιο συγκεκριμένα τα μικροπεριβάλλοντα που παράγονται από τη νηματοειδή διάβρωση απεικονίζονται στο σχήμα 8. Η χαμηλότερη σε οξυγόνο περιοχή (η κεφαλή της εσοχής) είναι παρατηρείται ανοδική διάλυση του μετάλλου. (Ιωαννίδης, 2018, σελ 18)



Εικόνα 8 : Γραφική αναπαράσταση των περιοχών που δημιουργήθηκαν από την διάβρωση εσοχής.

1.1.4 Βελονισμός (pitting)

Η διάβρωση με βελονισμούς είναι ο τοπικός σχηματισμός προϊόντος διάβρωσης ή εκλεκτική τοπική διάλυση της επιφάνειας σε βάθος. Τις περισσότερες φορές διεισδύουν από το πάνω προς το κάτω μέρος μια οριζόντιας επιφάνειας, έχοντας σχεδόν μια κάθετη κατεύθυνση. Πρόκειται για ένα ύπουλο τύπο διάβρωσης, που εξελίσσεται, ενώ ο εντοπισμός του φαντάζει μια δύσκολη διαδικασία και στην εξέλιξή του η απώλεια υλικού είναι περιορισμένη, μέχρι να παρουσιαστεί κάποια αστοχία.



Εικόνα 9 : Διάβρωση με βελονισμούς

Οι αιτίες που μπορούν να οδηγήσουν γαλβανικά στοιχεία σε διάβρωση με βελονισμούς είναι αρκετές:

- η διαφορά συγκέντρωσης οξυγόνου,
- η διαφορά θερμοκρασίας ,
- η ταχύτητας ροής
- και γενικά κάθε διαφορά στις συνθήκες του περιβάλλοντος. (Χαλατσόπουλος, 2009, σελ 13)

Για την εκτίμηση της διάβρωσης συγκρίνονται η επιφάνεια και το βάθος με πρότυπους πίνακες. Προσοχή δίνεται στο μέγιστο βάθος που μπορούν να εισχωρήσουν οι βελονισμοί, ενώ η απώλεια μάζας είναι αμελητέα τις περισσότερες φορές. Η καταστροφή των υλικών λόγω διάτρησης είναι πιθανή ακόμα και για πολύ μικρό εκατοστιαίο ποσοστό απώλειας βάρους της κατασκευής.

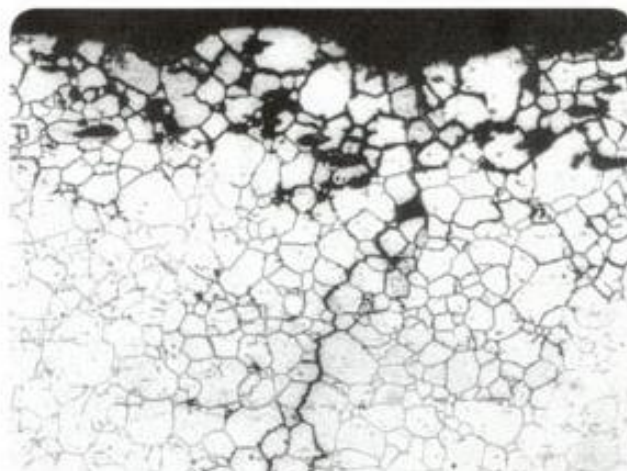
Η οξειδωση, όπως και στη διάβρωση εσοχής συμβαίνει μέσα σε κοιλότητα. Η δράση της βαρύτητας βοηθάει στην ανάπτυξη βελονισμός προς τα κάτω, ενώ το διάλυμα στη κορυφή της κοιλότητας γίνεται πιο συμπυκνωμένο και πιο πυκνό όσο συνεχίζει η ανάπτυξη κοιλοτήτων. Η διαδικασία της διάβρωσης με βελονισμούς λαμβάνει μέρος όταν μέσα στην οπή υπάρχει περίσσεια θετικών ιόντων, επομένως ανιόντα χλωρίου (Cl^-) έρχονται στην περιοχή προκειμένου να διατηρηθεί η ουδετερότητα του φορτίου.

Μέσα από έρευνες έχει διαπιστωθεί ότι τα δείγματα των οποίων η επιφάνεια έχει υποστεί λείανση, εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά απέναντι στη διάβρωση αυτού του είδους, καθώς επιδεικνύουν καλύτερη αντίσταση. Η διάβρωση με βελονισμούς, ιδιαίτερα στους ανοξειδωτους χάλυβες και στα κράματα αλουμινίου, συχνά επιταχύνεται, με την ύπαρξη στάσιμων νερών με μειωμένη περιεκτικότητα οξυγόνου. Τα περισσότερο ευπαθή μέταλλα σε αυτό το είδος της διάβρωσης, είναι αυτά που προστατεύονται με λεπτά στρώματα οξειδίων, όπως ο χαλκός, ο ανοξειδωτος χάλυβας,

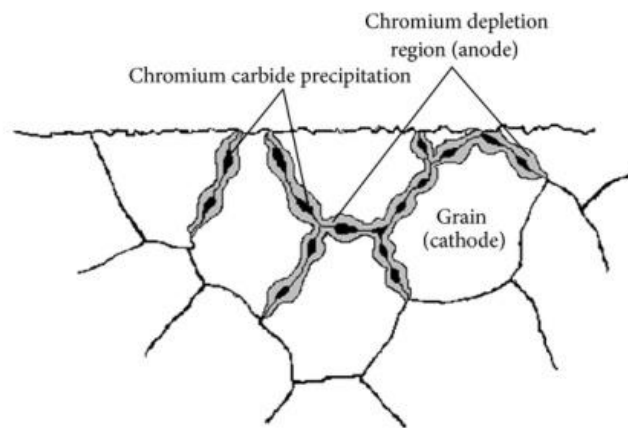
το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το μαγνήσιο. Μπορεί όμως να εμφανιστεί και στο κοινό χάλυβα, το σίδηρο, το μόλυβδο και πολλά άλλα μέταλλα. (Κορτίνας και Κασβίκης, 2015)

1.1.5 Περικρυσταλλική διάβρωση

Το είδος αυτό της διάβρωσης εμφανίζεται επιλεκτικά κατά μήκος των ορίων των κόκκων σε μερικά κράματα όπου σχηματίζονται τοπικά γαλβανικά στοιχεία. Τα γαλβανικά στοιχεία παρουσιάζεται είτε λόγω υψηλότερης κρυσταλλικής ενέργειας των σημείων αυτών, είτε λόγω συγκέντρωσης εκεί ακαθαρσιών και στοιχείων κραματοποίησης. Για τον έλεγχο της εμφάνισης του συγκεκριμένου είδους διάβρωσης απαιτείται συχνά η μικροσκοπική εξέταση των δειγμάτων. (Ιωσηφίδου, 2009, σελ 15) (Χαλατσόπουλος, 2009, σελ 16) Μετά από έρευνες έχει διαπιστωθεί ότι με θερμική διεργασία (500-800 °C) δημιουργούνται μικρά κατακρημνισμένα σωματίδια καρβιδίου του χρωμίου, τα οποία προκύπτουν κατόπιν αντίδρασης μεταξύ χρωμίου και του άνθρακα στον ανοξειδωτο χάλυβα. Τα σωματίδια αυτά δημιουργούνται κατά μήκος των ορίων των κόκκων, ενώ το χρώμιο και ο άνθρακας θα πρέπει να διαχυθούν στα όρια των κόκκων για να δημιουργήσουν τις κατακρημνίσεις και έτσι δημιουργείται μια ζώνη που είναι μειωμένη σε χρώμιο προς τα όρια των κόκκων, γεγονός που καθιστά αυτή την περιοχή ευάλωτη σε διάβρωση. (Κορτίνας και Κασβίκης, 2015, σελ 26)



Εικόνα 10 : Περικρυσταλλική διάβρωση

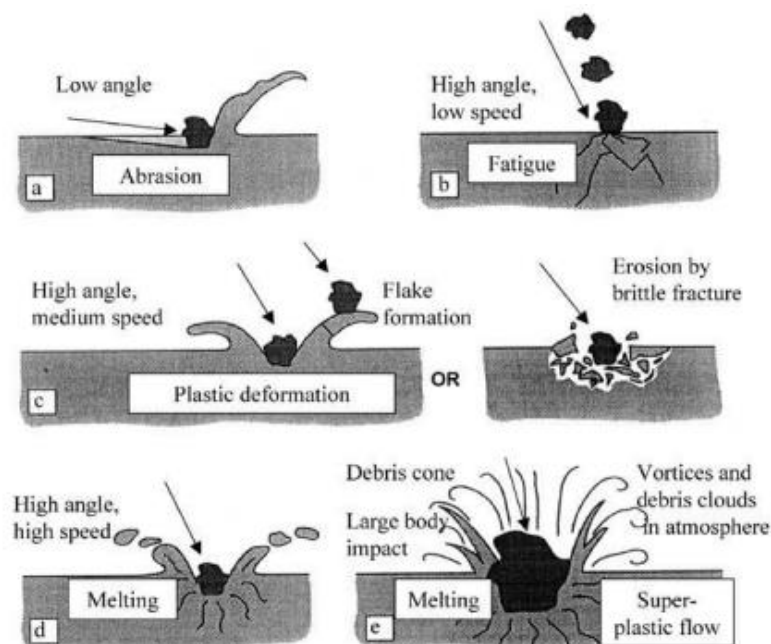


Εικόνα 11 : Περικρυσταλλική διάβρωση μετά από θερμική διεργασία στους 500-800 °C

Παράδειγμα περικρυσταλλικής διάβρωσης αποτελεί η διάβρωση στη περιοχή των συγκολλήσεων των ωστενιτικών ανοξειδωτων χαλύβων. Αντιμετωπίζεται με θερμική κατεργασία έξω από τη ζώνη ευαισθητοποίησης, ελάττωση του άνθρακα κάτω από 0.03%, προσθήκη καρβιδίων Ta, Ti, Nb, κ.ά

1.1.6 Διάβρωση Φθοράς

Η μηχανική διάβρωση προκύπτει λόγω σωματιδίων τα οποία προσπίπτουν πάνω σε μία στερεή επιφάνεια (βλέπε Σχήμα 12). Αυτού του τύπου η φθορά, πρέπει να αναμένεται όταν σκληρά σωματίδια παρασύρονται σε ένα αέριο ή υγρό μέσο και προσκρούουν σε ένα στερεό σώμα με κάποια σημαντική ταχύτητα. Η διάβρωση φθοράς είναι επιβλαβής στα υλικά αυτά τα οποία κατά την παθητικοποίηση σχηματίζουν προστατευτικά επιφανειακά στρώματα (φιλμ).



Εικόνα 12 : Πιθανοί μηχανισμοί κατά την φθορά λόγω μηχανικής διάβρωσης.

Ευαίσθητα μέταλλα όπως ο χαλκός και ο μόλυβδος παρουσιάζουν συχνά τέτοιου είδους διάβρωση. Αν και η κύρια διεργασία είναι η μηχανική κρούση, που προκαλείται από την πρόσκρουση των σωματιδίων στο υλικό στόχο, δευτερεύουσες διαδικασίες, όπως θερμικές, χημικές και φυσικές αντιδράσεις μεταξύ των ομολόγων λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια διάβρωσης. Η διάβρωση φθοράς αναγνωρίζεται από επιφανειακές αυλακώσεις και κυματώδεις, καθώς εμφανίζουν περιγράμματα χαρακτηριστικά της ροής του ρευστού.

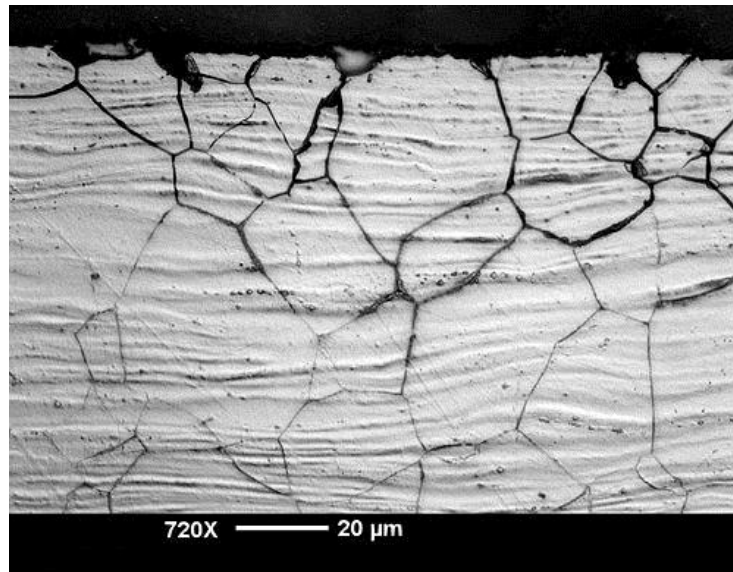
Παράγοντες που βοηθούν στην εμφάνιση αυτής της διάβρωσης είναι :

- Η φύση του ρευστού
- Η ταχύτητα του ρευστού και μεταβολές της πίεσης
- Οι φυσαλίδες και τα αιωρούμενα στερεά σωματίδια, καθώς σπάνε λόγω υποπίεσης στην επιφάνεια του μετάλλου και εμφανίζουν σπήλαια και κρατήρες.
- Το σχήμα της στερεής επιφάνειας (καμπές, γωνίες, αλλαγές στην διάμετρο σωληνώσεων)

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αλλάζει ο σχεδιασμός προκειμένου να μετριαστούν τα φαινόμενα τυρβώδους ροής και να ελαχιστοποιηθεί η υδροδυναμική πίεση κατά μήκος της διαδρομής, ενώ προτείνεται και η βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας της εγκατάστασης. Επίσης συστήνεται και η εφαρμογή καθοδικής προστασίας κατά την οποία η φυσαλίδες υδρογόνου και τα κύματα κρούσης που προκαλεί η σπηλαιώση μπορούν να ανακουφίσουν την εγκατάσταση. Επίσης για την αποφυγή διάβρωσης φθοράς προτείνεται η χρήση επιστρωμάτων όπως το νεοπρένιο, τα ελαστικά ή τα ελαστομερή σε μεταλλικά μέρη, καθώς επίσης και η εξασφάλιση λείων επιφανειών σε τμήματα των εγκαταστάσεων. (Κορτίνας και Κασβίκης, 2015)

1.1.7 Διάβρωση υπό μηχανική τάση

Για την εμφάνιση της διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση απαιτούνται τόσο η ύπαρξη διαβρωτικού περιβάλλοντος όσο και η ύπαρξη σημαντικών μηχανικών τάσεων που ενεργούν ταυτόχρονα στην επιφάνεια ενός ευπαθούς κράματος, και μπορούν να οδηγήσουν στη θραύση του κράματος (stress corrosion cracking) . Η διάβρωση αυτή λαμβάνει μέρος σε επιφάνειες όπως ρουλεμάν, άξονες, γρανάζια, τα οποία υφίστανται μεγάλο φορτίο και που υπόκεινται σε ολίσθηση και δόνηση. Η διάβρωση θα είναι συνήθως με την μορφή βαθιών κοιλοτήτων με τοπικό αποχρωματισμό της επιφάνειάς. Τα περισσότερα κράματα και ιδιαίτερα εκείνα που χρησιμοποιούνται σε περιστρεφόμενο εξοπλισμό υπόκεινται σε τέτοια διάβρωση.



Εικόνα 13 : Διάβρωση υπό μηχανική τάση

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ρηγματώση από διάβρωση με μηχανική τάση είναι:

- Η θερμοκρασία
- Η σύνθεση διαλύματος
- Η σύνθεση του μετάλλου
- Η επιβαλλόμενη τάση
- Η δομή του μετάλλου.

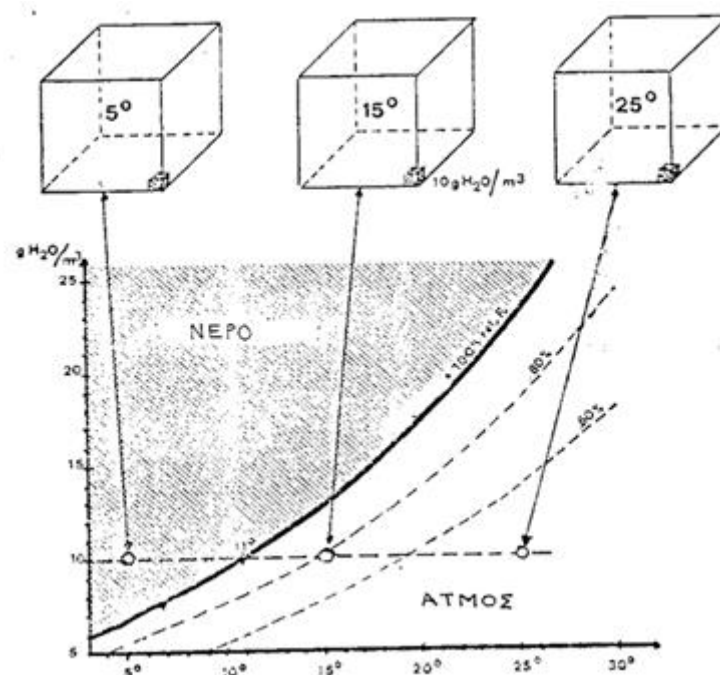
Η τάση που προκαλεί η ρηγματώση λόγω διάβρωσης δεν είναι αναγκαίο να εφαρμοστεί εξωτερικά, καθώς μπορεί να αποτελεί μια εναπομένουσα τάση που προκαλείται από γρήγορες θερμοκρασιακές αλλαγές και μη ομοιόμορφη συστολή, ή για ένα κράμα δυο φάσεων στο οποίο κάθε φάση εμφανίζει ένα διαφορετικό συντελεστή συστολής. Ακόμη και στερεά που τυχόν έχουν εγκλωβιστεί στο υλικό μπορούν να είναι αιτίες ανάπτυξης εσωτερικών τάσεων.

Η διάβρωση υπό μηχανική τάση είναι πολύ σημαντική καθώς ενώ το μέταλλο φαίνεται σχεδόν απρόσβλητο στο πιο μεγάλο μέρος της επιφάνειας εμφανίζονται λεπτές ρωγμές όπου προχωρούν στο εσωτερικό του μετάλλου, μέχρι ως όπου επέλθει κατάρρευση. Η διάδοση των ρωγμών γίνεται περικρυσταλλικά ή διακρυσταλλικά . (Ιωσηφίδου, 2009) Περικρυσταλλικά η ρωγμή διαδίδεται κατά μήκος των ορίων των κόκκων, ενώ στη διακρυσταλλική, η ρωγμή διαδίδεται δια μέσου των κόκκων είτε κατά μια διεύθυνση είτε διακλαδισμένα. (Κορτίνας και Κασβίκης, 2015, σελ 30)

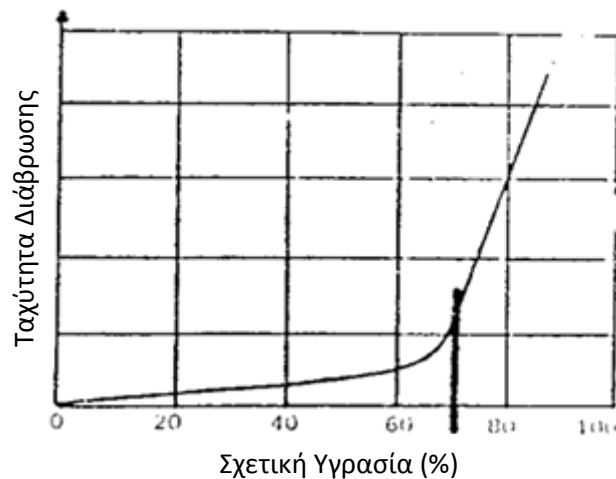
1.2 Παράγοντες που επιδρούν στην διάβρωση.

Η διάβρωση δεν εξελίσσεται σε όλες τις περιπτώσεις με την ίδια ταχύτητα. Υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες, που ευνοούν την ταχύτερη εξέλιξη της. Η γνώση των παραγόντων αυτών είναι πολύ σημαντική διότι η αποφυγή τους οδηγεί στην σημαντική μείωση της διάβρωσης. (Σπυρέλλης, 1997)

- **Η παρουσία υγρασίας στην ατμοσφαιρική διάβρωση.** Είναι γενικά γνωστό ότι στην ξηρή ατμόσφαιρα η διάβρωση των μετάλλων ή κραμάτων έχει πολύ μικρή εξέλιξη. Αντίθετα με τη παρουσία υγρασίας η ταχύτητά της αυξάνει σημαντικά. Από την άποψη της ατμοσφαιρικής διάβρωσης το σημαντικό μέγεθος είναι η σχετική υγρασία. Το σχήμα 12 δίνει την μεταβολή της σχετικής υγρασίας με την θερμοκρασία για την περίπτωση των 10 γραμμαρίων νερού σε ένα κυβικό μέτρο αέρα. Στο σχήμα 15 δίνεται η εξάρτηση της ταχύτητας διάβρωσης με την σχετική υγρασία. Από το διάγραμμα είναι φανερό η ταχύτερη αύξηση της διάβρωσης πάνω από 60 % υγρασία.

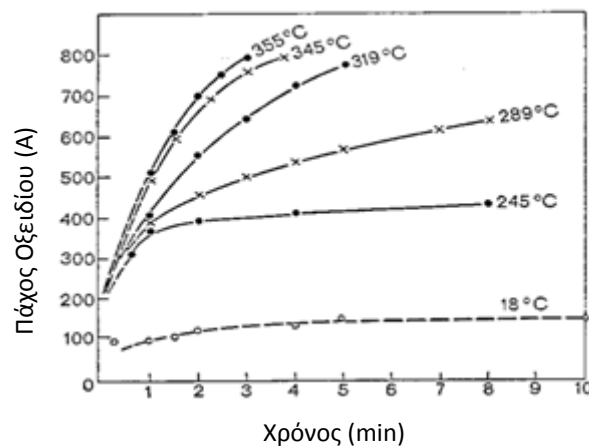


Εικόνα 14 : Η μεταβολή της σχετικής υγρασίας (42%, 78%, 100%) για την περίπτωση των 10 γραμμαρίων νερού σε ένα κυβικό μέτρο αέρα σε θερμοκρασία 25°C, 15°C και 5°C, αντίστοιχα.



Εικόνα 15 : Η εξάρτηση της ταχύτητας διάβρωσης με την σχετική υγρασία.

- **Η θερμοκρασία.** Η αύξηση της θερμοκρασίας γενικά αυξάνει την ταχύτητα της διάβρωσης. Η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10 βαθμούς αυξάνει στο διπλάσιο την ταχύτητα διάβρωσης. Η επίδραση αυτή οφείλεται στην γενική αύξηση της κινητικότητας των ατόμων και μορίων με την αύξηση της θερμοκρασίας. (Χαλατσόπουλος, 2009)

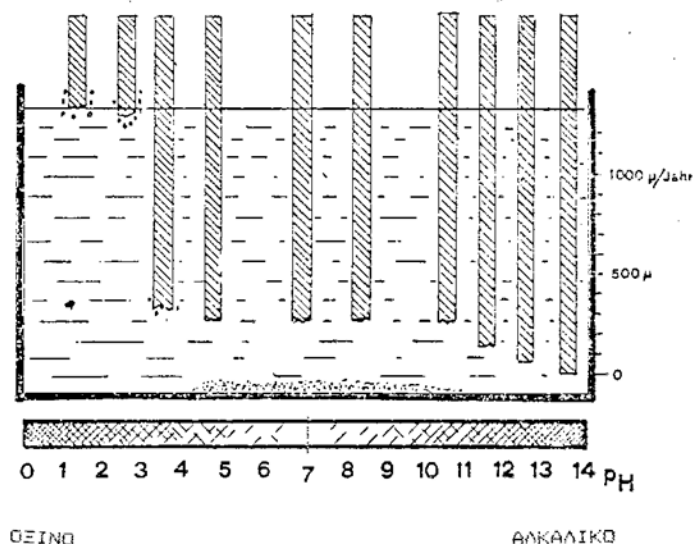


Εικόνα 16 : Η διάβρωση του χάλυβα στον αέρα σε διάφορες θερμοκρασίες.

- **Η μεταβολή όγκου κατά την διάβρωση.** Εμφανής είναι η μεταβολή του όγκου διαφόρων μετάλλων από την μεταλλική κατάσταση σε οξείδια. Ο σίδηρος έχει μεταβολή όγκου από μέταλλο σε οξείδιο 2,16 φορές. Εάν η ανάπτυξη των οξειδίων παρεμποδίζεται τότε αναπτύσσονται εξαιρετικά μεγάλες μηχανικές τάσεις όπως π.χ. στο σπλισμένο σκυρόδεμα όπου η οξείδωση του χάλυβα σπλισμού σκυροδέματος οδηγεί σε θραύση του σκυροδέματος.

- **Η τριεπιφάνεια.** Γενικά η ύπαρξη τριεπιφάνειας επιτείνει την διάβρωση. Αυτό παρατηρείται στην τριεπιφάνεια νερού-αέρα-μετάλλου, χάλυβα-σκυροδέματος-αέρα κλπ.

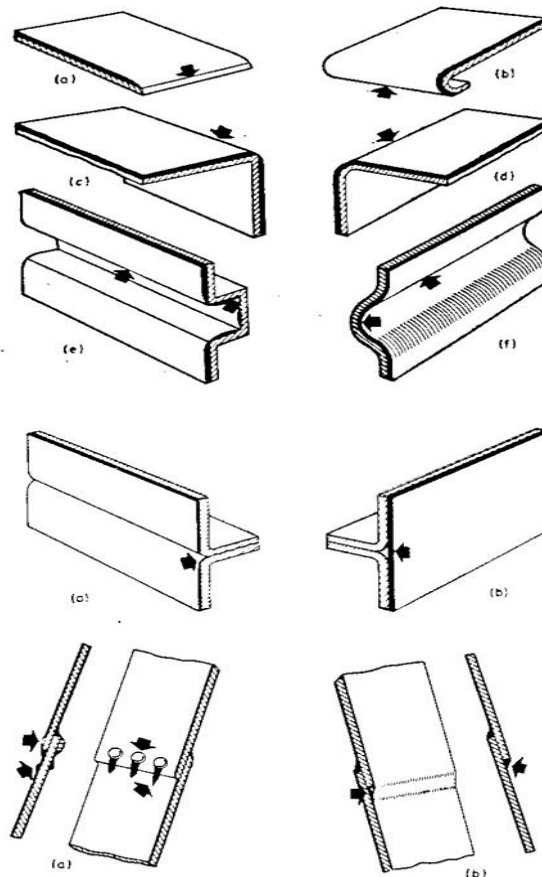
- **Η τιμή του pH.** Όσο μικρότερη είναι η τιμή του pH τόσο μεγαλύτερη είναι η διάβρωση. Το σχήμα 17 μας δίνει την μεταβολή της διάβρωσης σε συνάρτηση με το pH σχηματικά. Για την πλήρη εκτίμηση του γεγονότος αυτού πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το pH της βροχής σήμερα στην κεντρική Ευρώπη έχει την τιμή 4,5 και σε βιομηχανικές περιοχές (τοπικά) έχει ακόμη την τιμή 2,5 (φαινόμενο της όξινης βροχής). Η όξινη βροχή έχει προκαλέσει σημαντική αύξηση της διάβρωσης των μεταλλικών κατασκευών, αλλά και των κατασκευών από σκυρόδεμα. Τελικά η βροχή πέφτει στο έδαφος, οπότε τα χαρακτηριστικά του εδάφους (τουλάχιστον τα επιφανειακά) μεταβάλλονται με άμεση συνέπεια την αύξηση της διάβρωσης.



Εικόνα 17 : Η διάβρωση του χάλυβα σε αεριζόμενο νερό σε διάφορα pH σε συνήθη θερμοκρασία

- **Οι μηχανικές τάσεις.** Η ύπαρξη των μηχανικών τάσεων αυξάνει γενικά την ταχύτητα της διάβρωσης. Κάτω από ορισμένες συνθήκες μπορεί να προκαλέσει και την θραύση του μεταλλικού στοιχείου (διάβρωση με μηχανική καταπόνηση που οδηγεί σε ψαθυρή θραύση).

- **Οι μηχανικές ανωμαλίες στην επιφάνεια της μεταλλικής κατασκευής.** Γενικά προεξοχές, γωνίες, τσακίσματα υφίστανται μεγαλύτερη διάβρωση από τα γειτονικά σημεία. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει τα κομμάτια των μεταλλικών κατασκευών θα πρέπει να έχουν το κατάλληλο σχήμα, όπως στο σχήμα 18. Στο σχήμα 18, η πρώτη στήλη παρουσιάζει την λανθασμένη μορφή των μεταλλικών συσκευών, ενώ η δίπλα στήλη την προβλεπόμενη.



Εικόνα 18 : Οι μηχανικές ανωμαλίες στην επιφάνεια της μεταλλικής κατασκευής.

- **Τα διαφεύγοντα ρεύματα.** Έχει παρατηρηθεί ότι η ύπαρξη διαφυγόντων ρευμάτων αυξάνει γενικά την διάβρωση. Καταρχήν το συνεχές ρεύμα προκαλεί αύξηση της διάβρωσης ενώ το εναλλασσόμενο όχι. Όμως συχνά τα προϊόντα της διάβρωσης είναι ημιαγωγοί και προκαλούν μερική ανόρθωση του ρεύματος με συνέπεια την αύξηση της διάβρωσης.

- Η συγκέντρωση οξυγόνου

Η αύξηση της περιεκτικότητας διαλυμένου οξυγόνου σε ένα διάλυμα αυξάνει την διαβρωτικότητα του διαλύματος. Για παράδειγμα ο χαλκός παρουσία διαλυμένου οξυγόνου προσβάλλεται εφόσον το δυναμικό του είναι χαμηλότερο από το δυναμικό ισορροπίας της αναγωγής του οξυγόνου.

Σε μια μεταλλική κατασκευή οι περιοχές όπου το οξυγόνο έχει πρόσβαση είναι καθοδικές, ενώ περιοχές όπου η συγκέντρωση του οξυγόνου είναι μικρότερη προσβάλλονται εύκολα.

- **Οι στερεοί ή διαλυτοί ρυπαντές**

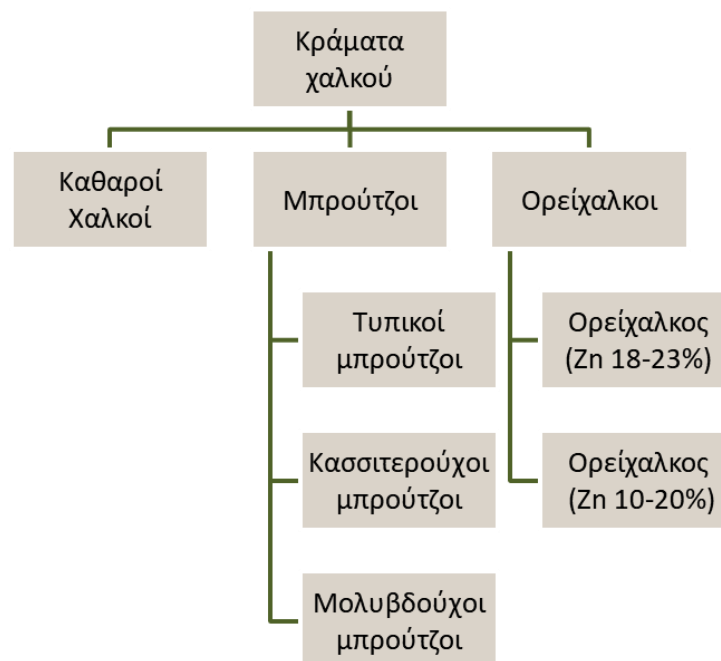
Ρυπαντές που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα είναι συνήθως υγροσκοπικοί και όταν επικάθονται στην επιφάνεια μεταλλικών υλικών συγκρατούν υγρασία, σχηματίζοντας κατά συνέπεια ηλεκτρολυτικά διαλύματα.

Στερεοί ρυπαντές συνήθως προκαλούν τοπική μεταβολή της συγκέντρωσης των διαβρωτικών ουσιών, δημιουργώντας τοπικά γαλβανικά στοιχεία.

2. Η διάβρωση του χαλκού

Χαλκός

Ο χαλκός είναι πολύ καλός αγωγός της θερμότητας και του ηλεκτρισμού. Χαρακτηρίζεται ως μαλακός με σκληρότητα 2.5-3 Mohs, δύστηκτος με σημείο τήξεως 1084,6° C. Ο χαλκός συνηθίζει να αντιδρά με οξυγόνο και θείο. Τα κράματα του χαλκού απεικονίζονται αναλυτικά στο επόμενο σχεδιάγραμμα.



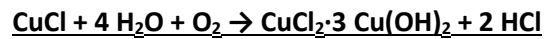
Όπως το έδαφος έτσι και το νερό λειτουργούν ως ηλεκτρολύτες στο χαλκό, συνδέοντας τις ανοδικές με τις καθοδικές περιοχές και επιτρέποντας την εκδήλωση ηλεκτροχημικής διάβρωσης. Τα ιόντα χλωρίου μπορεί να βρεθούν μέσα ή επάνω στο μέταλλο, λόγω της προσβολής από το έδαφος, το νερό (ειδικά το ενάλιο νερό), την ατμόσφαιρα, ή να υπάρχουν ως ακαθαρσίες από την κατασκευή του αντικειμένου.

Όπως παρατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις, τα ιόντα χλωρίου μπορεί να είναι παρόντα στο εσωτερικό του αντικειμένου αν το αντικείμενο δεν απομονωθεί από το νερό και/ή το οξυγόνο με αποτέλεσμα την εκδήλωση διάβρωσης του αντικειμένου.

Αρχικά ο χαλκός οξειδώνεται σε Cu^+ ιόν: $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^+ + \text{e}^-$

Το μονοσθενές ιόν του χαλκού αντιδρά με το ιόν χλωρίου προς σχηματισμό του αδιάλυτου λευκού χρώματος άλατος του χλωριούχου χαλκού: $\text{Cu}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{CuCl}$.

Ο χλωριούχος χαλκός αντιδρά με την υγρασία και το οξυγόνο προς σχηματισμό πράσινου χλωριδίου του χαλκού/ ένωση υδροξειδίου του χαλκού και υδροχλωρικού οξέος:



Είναι γνωστό ότι ο χαλκός αντέχει στην έκθεσή του κάτω από το έδαφος εκτός αν υπάρχουν υψηλές συγκεντρώσεις σουλφιδίων. Ο μπρούτζος διαβρώνεται εύκολα σε πολλά είδη εδάφους, ενώ αντίθετα άλλα κράματα χαλκού είναι πιο ανθεκτικά (Μπράβου και Στασινοπούλου, 2006, σελ 10).

Το οξείδιο του χαλκού που εμφανίζεται στην επιφάνεια του χαλκού που έρχεται σε επαφή με το οξυγόνο, είναι ένα αδιαπέραστο επιφανειακό στρώμα που εμποδίζει την διείσδυση του οξυγόνου και η οξείδωση περιορίζεται σε ένα λεπτό, παθητικό και επιφανειακό στρώμα. Με άλλα λόγια η οξείδωση του χαλκού αποτελεί και την προστασία του, ταυτόχρονα.

Όσο υπάρχει το προστατευτικό στρώμα οξείδιου ο σωλήνας χαλκού θα λειτουργεί αποτελεσματικά για πολλά χρόνια. Πρόβλημα θα αναπτυχθεί όταν το προστατευτικό στρώμα οξείδιου θα καταστραφεί. Όσο το στρώμα οξείδιου καταστρέφεται για διάφορους λόγους, τόσο θα αντικατασταείτε με ένα άλλο μέχρις ότου δημιουργηθεί οπή στο χαλκό.



Εικόνα 19 : Παραδείγματα διάβρωσης του χαλκού.

Λόγοι που μπορούν να φθείρουν το στρώμα οξειδίου του χαλκού είναι:

1. Η αυξημένη θερμοκρασία που το μαλακώνει και ευκολότερα μπορεί να αποσπαστεί από τον χαλκό.
2. Η μεγάλη ταχύτητα του νερού. Τα μόρια του νερού συγκρουόμενα με το προστατευτικό στρώμα οξειδίου του χαλκού αποσπών κομμάτια του, προχωρώντας την διάβρωση βαθύτερα.
3. Το σχήμα του εξαρτήματος (οι γωνίες, οι καμπύλες κλπ) και ακαθαρσίες στο εσωτερικό, όπου μπορούν να γίνουν οι αιτίες να εμφανιστεί τυρβώδης ροή.



Εικόνα 20 : Ανάπτυξη τυρβώδους ροής λόγω της μορφής του εξαρτήματος.

2.1 Τρόποι διάβρωσης του χαλκού στο έδαφος και σε υγρό περιβάλλον

Η διάβρωση του χαλκού στο έδαφος αποτελεί μία τυπική περίπτωση εφαρμογής της θεωρίας των μικτών δυναμικών. Το έδαφος σαν διαβρωτικό περιβάλλον χαρακτηρίζεται από την μεταβολή των συνθηκών ανάλογα την εποχή και την βροχόπτωση. Ακόμη η ρύπανση της ατμόσφαιρας μέσω της βροχής μεταβάλλει την σύσταση και ιδιαίτερα την οξύτητα του εδάφους. Έτσι η διαβρωτικότητα του εδάφους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η παρουσία υγρασίας, η παρουσία αλάτων, η δυνατότητα διάχυσης του οξυγόνου και η παρουσία διαφόρων βακτηριδίων κ.τ.λ.

Τα μέταλλα διαβρώνονται κυρίως λόγω της δημιουργίας ηλεκτρολυτικών κελιών. Ένα ηλεκτρολυτικό κελί αποτελείται από τέσσερα βασικά στοιχεία:

- Έναν ηλεκτρολύτη
- Δύο ηλεκτρόδια
- Έναν ηλεκτρικό σύνδεσμο

Ο ηλεκτρολύτης αποτελείται από μία ουσία η οποία ιονίζεται στο νερό. Το έδαφος είναι ένας ηλεκτρολύτης εκτός αν πρόκειται για αφυδατωμένο χώμα. Πολλοί είναι οι ηλεκτρολύτες που υπάρχουν στη φύση και συντελούν στη διάβρωση των μετάλλων

όταν βρίσκονται σε επαφή. Τα δύο ηλεκτρόδια θα μπορούσε να είναι δύο μέταλλα, χωρίς να είναι απαραίτητο να είναι από διαφορετικά μέταλλα. Ο ηλεκτρολυτικός σύνδεσμος μπορεί να έχει πολλές μορφές. Ρόλος του είναι να αποτελεί ένα μονοπάτι/διάδρομο μεταξύ των ηλεκτρολυτών. Βασικά κελία που μπορεί να συντελέσουν στη διάβρωση στο έδαφος παρουσιάζονται αναλυτικά στην συνέχεια. Τα παρακάτω κελία που θα αναλυθούν είναι από τα πιο συνήθη. (Μπράβου και Στασινοπούλου, 2006)

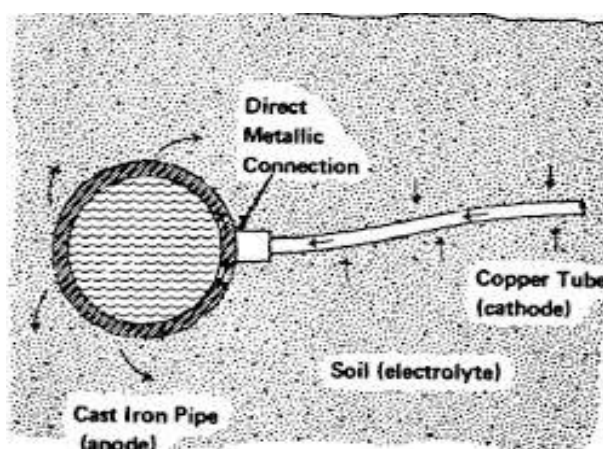
Γαλβανικά κελία

Στην περίπτωση των αγωγών (ανεξάρτητα του μεταφερομένου ρευστού) και άλλων εκτεταμένων μεταλλικών κατασκευών, που έχουν μεγάλο μήκος ένας σημαντικός παράγοντας στην δημιουργία γαλβανικών κελιών είναι η διαφορά στην σύσταση του εδάφους κατά μήκος του αγωγού. Τα γαλβανικά κελιά επιταχύνουν την διάβρωση και για το λόγο αυτό, η μελέτη της διαβρωτικότητας του εδάφους είναι σημαντική κατά την εγκατάσταση των αγωγών στο έδαφος. (Μπράβου και Στασινοπούλου, 2006, σελ 3)

Ανόμοια μεταλλικά κελιά

Το γαλβανικό αυτό κελί αποτελείται από δυο διαφορετικά μέταλλα τα οποία βρίσκονται σε επαφή. Το μέταλλο το οποίο το ρεύμα φθάνει σε αυτό από τον ηλεκτρολύτη ονομάζεται κάθοδος, ενώ το ηλεκτρόδιο που το ρεύμα κατευθύνεται προς τον ηλεκτρολύτη ονομάζεται άνοδος. Η διάβρωση όπως έχει αναφερθεί παρουσιάζεται στην άνοδο.

Στη περίπτωση του κελιού αυτού δημιουργείται μια τρύπα, όπου τα οξικά στοιχεία θα προκαλέσουν ζημιά.

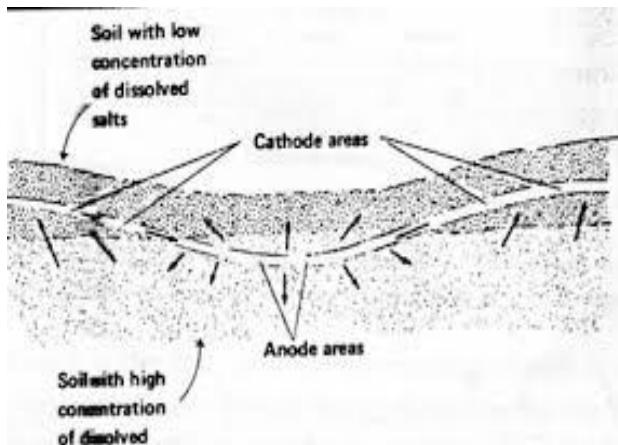


Όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 21, ο κεντρικός σιδερένιος ή εναλλακτικά χαλύβδινος αγωγός, αποτελεί την άνοδο οπότε και διαβρώνεται. Την κάθοδο αποτελεί ο χάλκινος αγωγός ενώ το έδαφος είναι ο ηλεκτρολύτης. Τέλος ο ηλεκτρολυτικός σύνδεσμος είναι το σημείο που συνδέονται ο σωλήνας και ο αγωγός. (Μπράβου και Στασινοπούλου, 2006, σελ 3)

Εικόνα 21 : Γαλβανικό κελί με δυο διαφορετικά μέταλλα.

Κελιά εμπλουτισμού

Πρόκειται για ένα κελί με δυο ηλεκτρόδια του ίδιου υλικού που περιβάλλονται μέσα σε ηλεκτρολύτη ο οποίος περιλαμβάνει διάφορες ουσίες ή την ίδια ουσία σε διαφορετικές ποσότητες. Για παράδειγμα, ο ένας ηλεκτρολύτης μπορεί να είναι αραιό διάλυμα άλατος και ο άλλος πυκνό.



Κελιά εμπλουτισμού είναι συνήθη σε διαβρώσεις στο έδαφος (Σχήμα 22). Ένα απλό παράδειγμα, είναι αγωγός που περνάει από διαφορετικά είδη εδάφους. Το τμήμα του σωλήνα που βρίσκεται σε πιο αγώγιμο έδαφος λειτουργεί ως άνοδος, ενώ στο λιγότερο αγώγιμο το τμήμα λειτουργεί ως κάθοδος.

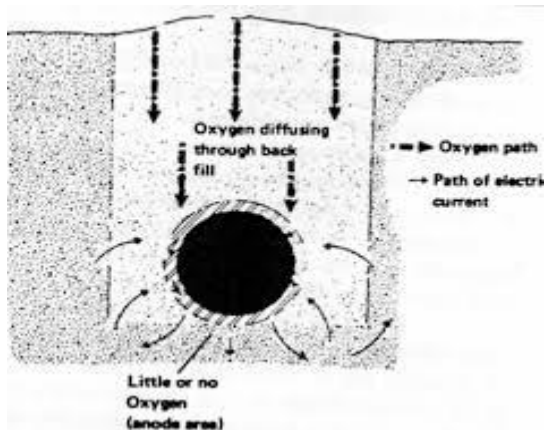
Εικόνα 22 : Κελί εμπλουτισμού από διαφορετικά είδη εδάφους.

Τα μη διαλυτά άλατα είναι πολλά και ποικίλα. Συνήθη στοιχεία είναι του αλουμινίου, καλίου, μαγνησίου και άλλων μετάλλων. Με την γνώση των στοιχείων είναι δυνατή η πρόβλεψη και τελικά η αντιμετώπιση του πριν την έναρξη της διάβρωσης. (Μπράβου και Στασινοπούλου, 2006, σελ 4)

Κελιά εμπλουτισμού με οξυγόνο

Τέτοιο κελί δημιουργείται αν τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα σε ένα ηλεκτρολύτη όπου υπάρχει διαφορά στην ποσότητα του οξυγόνου. Με την διαφορά του οξυγόνου ανάμεσα στα δυο ηλεκτρόδια αναπτύσσεται μια διαφορά δυναμικού. Το ηλεκτρόδιο που δεν φθάνει πολύ οξυγόνο λειτουργεί ως άνοδος, ενώ το άλλο ως κάθοδος.

Τέτοια κελιά είναι τα πιο συνήθη και μπορούν να παρατηρηθούν σε θαμμένους σωλήνες στο έδαφος. Για παράδειγμα ο σωλήνας σε παραχώματα έχει περισσότερο οξυγόνο σε σχέση με το έδαφος σε μεγαλύτερο βάθος. Έτσι, ευνοείται η δημιουργία κελιού εμπλουτισμού με οξυγόνο στο οποίο η άνοδος είναι ο πυθμένας της επιφάνειας του σωλήνα (Σχήμα 23).



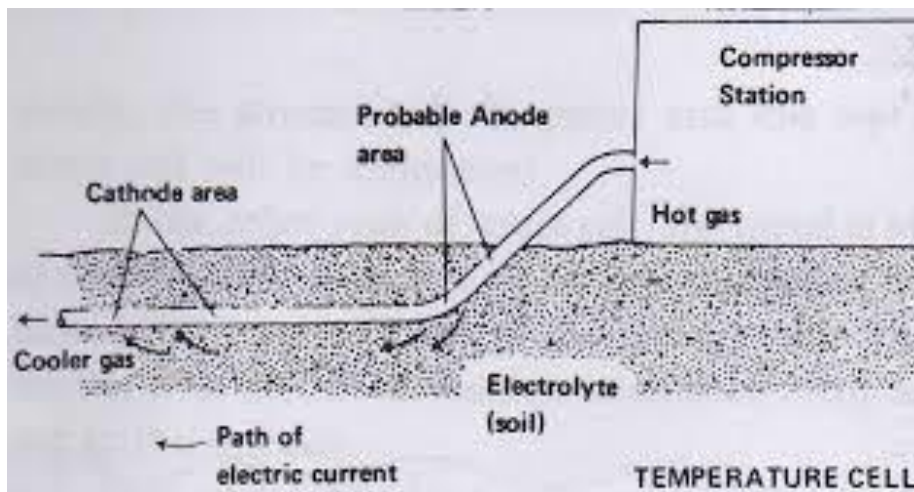
Τα κελιά εμπλουτισμού με οξυγόνο παρατηρούνται και σε μέταλλα που είναι θαμμένα στα πρώτα στάδια της θάλασσας, καθώς τα κύματα τροφοδοτούν με οξυγόνο το μέταλλο. (Μπράβου και Στασινοπούλου, 2006, σελ 4)

Εικόνα 23 : Κελί εμπλουτισμού με οξυγόνο.

Κελία θερμοκρασίας

Στο θερμοκρασιακό κελί, πιο σπάνιο από τα προηγούμενα, τα ηλεκτρόδια είναι από το ίδιο μέταλλο αλλά το ένα βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με το άλλο. Το ηλεκτρόδιο που βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργεί ως άνοδος στο σύστημα.

Ένα παράδειγμα είναι μία γραμμή μεταβίβασης αερίου (Σχήμα 24) η οποία ξεκινά από ένα σταθμό συμπίεστη και καταλήγει μέσα στο έδαφος. Το αέριο που συμπιέστηκε είναι πιο ζεστό διότι καθώς μεταφέρεται χάνει την θερμότητα του. Έτσι το ζεστό τμήμα αποτελεί την άνοδο, την κάθοδο το πιο κρύο, τον ηλεκτρολύτη το έδαφος και τον ηλεκτρικό σύνδεσμο ο σωλήνας. (Μπράβου και Στασινοπούλου, 2006, σελ 5)



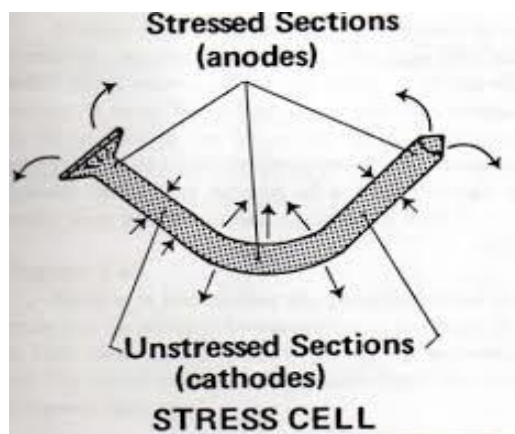
Εικόνα 24 : Κελί θερμοκρασίας

Κελιά που φορτίζονται από ηλεκτρικό ρεύμα

Μέχρι τώρα στα κελιά που έχουν αναφερθεί, η πηγή ενέργειας αποτελεί μέρος του κελιού. Στην περίπτωση των κελιών που φορτίζονται από ηλεκτρικό ρεύμα ενέργεια προέρχεται από ένα είδος ηλεκτρικού ρεύματος που προέρχεται από εξωτερική πηγή. Κάθε ηλεκτρικό ρεύμα που φτάνει στο έδαφος από οποιαδήποτε πηγή, αν συναντήσει στη πορεία του έναν αγωγό ή κάποιο άλλο μέταλλο μιας κατασκευής, συλλέγεται στο σωλήνα σε μια περιοχή και φεύγει από μία άλλη. Εκεί όπου συλλέγεται γίνεται κάθοδος και η περιοχή όπου το ρεύμα τη διαπερνά αποτελεί την άνοδο οπότε και το μέταλλο διαβρώνεται. (Μπράβου και Στασινοπούλου, 2006, σελ 6)

Κελιά που προκαλούνται από μηχανική τάση (Stress Cells)

Τα κελιά από μηχανική τάση αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια που αποτελούνται από το ίδιο μέταλλο. Η περιοχή με την υψηλότερη πίεση είναι η άνοδος, ενώ η άλλη η κάθοδος. Ένα παράδειγμα, είναι αν ένα καρφί αφηθεί σε δοχείο με αλατόνερο, όπου μετά από λίγη ώρα παρατηρείται ότι τα σημεία που σκουριάζουν είναι τα άκρα του καρφιού. Στην συνέχεια, σταδιακά μπορεί να παρατηρηθεί ένα χρώμα καφέ σαν σκουριά να αλλάζει το χρώμα του νερού.



Εικόνα 25 : Κελί από μηχανική τάση.

Τα κελιά αυτά μπορεί να εμφανιστούν σε δυο μορφές. Στην πρώτη, στο παράδειγμα με το καρφί, αν η πίεση απελευθερωθεί από θερμότητα και έπειτα από ψύξη το μέταλλο επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση ή η πίεση μειώνεται. Στον άλλο τύπο, το μέταλλο είναι κομμάτι μιας κατασκευής που υπόκειται σε πίεση. Η περιοχή της υψηλής πίεσης είναι πάντα η άνοδος του κελιού. (Μπράβου και Στασινοπούλου, 2006, σελ 6)

Βιολογική Διάβρωση

Η βιοχημική διάβρωση προκαλείται από μικροοργανισμούς πάνω σε μέταλλο, όπου συχνά παρουσιάζεται σε υπόγειες σωληνώσεις ή στα κελύφη των πλοίων. Επίσης, σημαντική είναι και η δράση αναερόβιων μικροοργανισμών οι οποίοι αναπτύσσονται σε περιβάλλον με ελάχιστο ή καθόλου οξυγόνο. Ευνοϊκό περιβάλλον για την ανάπτυξη

αυτών των μικροοργανισμών αποτελούν τα χαμηλά, συμπαγή και κακώς αεριζόμενα ουδέτερα εδάφη με άφθονο νερό και κακή απομάστευση.

Για να καταπολεμηθούν οι μικροοργανισμοί απαραίτητος είναι ο αερισμός του χώματος πλήρωσης των ορυγμάτων τοποθέτησης των σωλήνων, η διαπότιση του εδάφους με ασβέστη για αύξηση της αλκαλικότητας, η στεγανοποίηση των σωλήνων με επιστρώσεις με ασφαλτώδεις ύλες, πλαστικές ταινίες ή μπετόν και η χρήση μικροβιοκτόνων. (Μπράβου και Στασινοπούλου, 2006, σελ 7)

Διάβρωση με βελονισμούς

Η διάβρωση με βελονισμούς αποτελεί μία άλλη κατηγορία διάβρωσης η οποία είναι δυνατό να αναπτυχθεί στο έδαφος. Η διάβρωση με βελονισμούς εντοπίζεται σε ορισμένα σημεία της επιφάνειας, όπου υπάρχουν ανομοιομορφίες ή ατέλειες (διαταραχές) στην κατασκευή τού κρυσταλλικού πλέγματος.

Το φαινόμενο pitting είναι η τοπική διάβρωση που εμφανίζεται κατά κύριο λόγο σε χαλκοσωλήνες και στα σημεία συγκόλλησης του ανοξείδωτου χάλυβα που συμμετέχει σε υδραυλικές εγκαταστάσεις. Κατά κανόνα, η αιτία του φαινομένου είναι η ηλεκτρόλυση που λαμβάνει χώρα μεταξύ των μετάλλων που συνυπάρχουν στην κατασκευή. Στην περίπτωση του χαλκού, αυτό οφείλεται σε ηλετρασθενή μέταλλα που υπήρχαν στο κράμα του χαλκού από την κατασκευή του (κατασκευαστική αστοχία). Κατά την επαφή των μετάλλων αυτών με τον ηλεκτρολύτη (το έδαφος), δημιουργείται μία μικρή διαφορά δυναμικού, μικρότερη του 1V, η οποία σταδιακά αφαιρεί μάζα από το ασθενές μέταλλο και την παραδίδει στο ισχυρό μέταλλο (χαλκός ή ανοξείδωτος χάλυβας, αντίστοιχα). Έτσι, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, το πάχος του μετάλλου στο σημείο εκείνο έχει γίνει τόσο μικρό που δεν αντέχει την πίεση του νερού που κυκλοφορεί στο κύκλωμα, και έτσι δημιουργείται μία πολύ μικρή, με μέγεθος σαν το κεφάλι μίας καρφίτσας ή ακόμα μικρότερο.

Υγρή διάβρωση

Η υγρή διάβρωση είναι η πιο συχνή μορφή διάβρωσης και γίνεται σε παρουσία υγρών, όπως υδατικά διαλύματα και ηλεκτρολύτες. (Ιωαννίδης, 2018, σελ 12) Η διαβρωτική δράση του νερού εξαρτάται κυρίως από το διαλυμένο οξυγόνο μέσα σε αυτό, τα διαλυμένα άλατα και αέρια, τους μικροοργανισμούς, τα διαλυμένα ή απλώς αιωρούμενα σωματίδια. (Χαλατσόπουλος, 2009, σελ 25) Πιο συγκεκριμένα σε θαλασσινό νερό, η ύπαρξη μικροοργανισμών είτε βοηθούν στην παραγωγή αποπαθητικοποιητικών ιόντων, είτε καταλύουν ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. (Ιωσηφίδου, 2009, σελ 22)

2.2 Παράγοντες που μεταβάλλουν την διαβρωτικότητα του εδάφους.

Υπάρχουν διάφοροι κανονισμοί, που προσπαθούν να εκφράσουν την διαβρωτικότητα του εδάφους. Ο πλέον αναγνωρισμένος είναι ο DIN 50929 (DIN Standards, 1985a). Σύμφωνα με αυτόν για την εκτίμηση της διαβρωτικότητας του εδάφους θα πρέπει να ληφθούν υπόψη:

- Τα αποπλυνόμενα συστατικά του εδάφους δηλαδή όσα έχουν μέγεθος κόκκου κάτω από 0,06 mm. Εφόσον η περιεκτικότητα σε αποπλυνόμενα συστατικά είναι πάνω από 50 % το έδαφος γίνεται διαβρωτικό.
- Η ρύπανση του εδάφους από τέφρα, σκωρίες, άνθρακα, σκουπίδια και βιομηχανικά απόβλητα αυξάνουν σημαντικά την διάβρωση του εδάφους.
- Η ύπαρξη ελωδών εδαφών με οργανικό άνθρακα αυξάνει την διάβρωση στο έδαφος.
- Η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι από τα πλέον σημαντικά μεγέθη για την εκτίμηση της διαβρωτικότητας του εδάφους. Γενικά εδάφη με ειδική αντίσταση πάνω από 5.000 ohm cm δεν θεωρούνται διαβρωτικά.
- Η υγρασία του εδάφους σε ποσοστό πάνω από 20 % έχει διαβρωτική επίδραση.
- Η τιμή του pH του εδάφους και η τιμή της οξύτητας ή αλκαλικότητας έχουν σημαντική επίδραση στην διαβρωτικότητα του εδάφους.
- Η περιεκτικότητα σε θειούχα έχει διαβρωτική επίδραση σε συγκέντρωση πάνω από 5 mg/lit.
- Η περιεκτικότητα σε άλατα χλωριούχα και θειικά είναι σημαντική. Η παρουσία των αλάτων αυτών έχει καταλυτική επίδραση στην διάβρωση, όπως δείχνει και το σχήμα 11. Τα χλωριόντα διευκολύνουν την διάλυση του χάλυβα και τελικά ελευθερώνονται εκ νέου για να συνεχίσουν την διαβρωτική επίδραση τους. Η εκτίμηση της περιεκτικότητας των θειικών αλάτων έχει δύο στάδια. Πρώτα προσδιορίζεται η περιεκτικότητα σε υδατοδιαλυτά θειικά και κατόπιν η περιεκτικότητα σε οξυδιαλυτά θειικά.
- Η παρουσία υδροφόρου ορίζοντα έχει διαβρωτική επίδραση εφόσον φτάνει στον αγωγό.
- Η ομοιογένεια του εδάφους.

3. Η διάβρωση του χάλυβα

Χάλυβας

Ο χάλυβας είναι κράμα σιδήρου-άνθρακα που περιέχει λιγότερο από 2,06% κ.β. άνθρακα, λιγότερο από 1% μαγγάνιο και πολύ μικρά ποσοστά πυριτίου, φωσφόρου, θείου και οξυγόνου. Οι κραματωμένοι χάλυβες, όπως οι ανοξειδωτοι και οι εργαλειοχάλυβες αποτελούν ειδική κατηγορία χαλύβων που περιέχουν υψηλότερα ποσοστά άλλων μετάλλων. Ο χάλυβας είναι το πιο διαδεδομένο κατασκευαστικό υλικό μετά το σκυρόδεμα και το ξύλο. (Μιχάλης, και Δημητρίου, 2007)



Στο σκυρόδεμα ο κύριος σκοπός της ενίσχυσης του με χάλυβα (οπλισμού) είναι η βελτίωση της αντοχής σε εφελκυσμό και της ανθεκτικότητας του. Οι ράβδοι από χάλυβα συνήθως είναι ένα σύνθετο υλικό ενισχυμένο με ίνες. Η πλειοψηφία του χαλύβδινου οπλισμού είναι τύπου αδρανούς ανθρακούχου χάλυβα. Η διάβρωση σε χάλυβα οπλισμού συνήθως, οφείλεται στην ενανθράκωση, στην επίδραση των χλωριόντων και σε ρωγμές στο σκυρόδεμα.



3.1 Η διάβρωση του χάλυβα σε υγρό περιβάλλον

Η διάβρωση του χάλυβα (όπως και των άλλων μετάλλων) στο νερό εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

1. Τη σύσταση και την θερμοκρασία του νερού.
2. Από την περιεκτικότητα σε οξυγόνο του νερού κοντά στην μεταλλική επιφάνεια.
3. Την σχετική ταχύτητα του νερού και της μεταλλικής επιφάνειας.

4. Από το είδος, την επεξεργασία και την προστατευτική επίστρωση της μεταλλικής επιφάνειας.

Η κύρια διαφορά του θαλάσσιου με το γλυκό νερό είναι η περιεκτικότητα σε αλάτι. Μια πρώτη συγκριτική εικόνα της διαφοράς μεταξύ θαλασσινού νερού και γλυκού νερού δίνει ο ακόλουθος πίνακας 1.

Πίνακας 1 : Σύγκριση θαλάσσιου – γλυκού νερού

Ιόντα	Θαλασσινό νερό mg/l ή ppm	Γλυκό νερό mg/l ή ppm
Cl ⁻	18980	119
SO ₄ ²⁻	2650	90
HCO ₃ ⁻	140	60
Na ⁺	10556	93
K ⁺	1	8
Mg ²⁺	1272	21
Ca ²⁺	400	43
O ₂	8-20	2-6
PH	7,6-8,3	6,6-8,1
Ειδική ηλεκτρική αντίσταση (Ω.cm)	25-35	850-2900

Η σημαντική διαφορά στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση οφείλεται στην μεγάλη διαφορά στην περιεκτικότητα αλάτων. Θα πρέπει ακόμη να αναφερθεί ότι υπάρχει μια συνηθισμένη διάκριση των νερών ανάλογα την περιεκτικότητα τους σε αλάτι ως εξής:

Πίνακας 2 : Διάκριση των νερών ανάλογα την περιεκτικότητα σε αλάτι

Είδος νερού	Περιεκτικότητα σε αλάτι %
Θαλασσινό	3,0 – 4,0
Παράκτιο υφάλμυρο	1,8 - 3,0
Υφάλμυρο ποταμού	0,5 – 1,8
Ποταμίσιο ελαφρά υφάλμυρο	0,5 – 0,05
Ποταμίσιο	<0,05

Επίσης ο χώρος κοντά στα παράλια θεωρείται ότι παρουσιάζει έντονη διάβρωση λόγω του ότι έχει «θαλάσσιο περιβάλλον» που χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη σταγονιδίων θαλασσινού νερού από την δράση του ανέμου και των κυμάτων.

Ακόμη πρέπει να επισημανθεί το γεγονός ότι η ρύπανση της θάλασσας από βιομηχανικά απόβλητα προξενεί αξιοσημείωτες μεταβολές στην ταχύτητα διάβρωσης των μετάλλων και φυσικά του χάλυβα.

A. Η επίδραση της χημικής σύστασης και της θερμοκρασίας του νερού.

Ένα σημαντικό μέγεθος είναι η περιεκτικότητα σε αλάτι δηλ. η αλατότητα (salinity) η οποία εκφράζει το ποσό του αλατιού σε γραμμάρια ανά κιλό νερού. Η αλατότητα υπολογίζεται από την περιεκτικότητα σε χλωριόντα (chlorinity) στην οποία συμπεριλαμβάνονται και τα βρωμιοίοντα και τα ιωδιοίοντα και πολλαπλασιάζεται με 1,80655.

Σε θαλασσινό νερό μια πρώτη ιδέα της χημικής σύστασης δίνει ο πίνακας 3. Όμως πρέπει να τονισθεί ότι η χημική του σύσταση εξαρτάται από την γεωγραφική τοποθεσία.

Η περιεκτικότητα σε χλωριόντα στην ανοικτή θάλασσα κυμαίνεται σε 18-20. Η μέση τιμή της αλατότητας της θάλασσας θεωρείται 35 αλλά η ερυθρά θάλασσα έχει 41 η μεσόγειος 39 και η Βαλτική θάλασσα 10. Γενικά για την πραγματοποίηση πειραμάτων το θαλασσινό νερό θεωρείται ότι έχει την σύσταση του πίνακα 3.

Πίνακας 3 : Η σύσταση του τεχνητού θαλασσινού νερού

Χημική ένωση	Συγκέντρωση (mg/l)
NaCl	24,53
MgCl ₂	5,20
Na ₂ SO ₄	4,09
CaCl ₂	1,16
KCl	0,695
NaHCO ₃	0,201
KBr	0,101
H ₃ BO ₃	0,027
SrCl ₂	0,025
NaF	0,003
Ba(NO ₃) ₂	0,0000994
Mn(NO ₃) ₂	0,000034
Cu(NO ₃) ₂	0,0000308
Zn(NO ₃) ₂	0,000061
Pb(NO ₃) ₂	0,0000066
AgNO ₃	0,00000049

Περιεκτικότητα σε χλωριόντα= 19,38 , PH = 8,2

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην διάβρωση είναι σημαντική. Στις χημικές αντιδράσεις η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10 °C διπλασιάζει την ταχύτητα της. Η θερμοκρασία ανεβάζει μεν την ταχύτητα της διάβρωσης αλλά ταυτοχρόνως ελαττώνει την διαλυτότητα του οξυγόνου ενώ αυξάνει την ταχύτητα της διάχυσης του. Γενικά η ταχύτητα της διάβρωσης στις θερμές θάλασσες όπως η Ερυθρά θάλασσα και ο Ινδικός Ωκεανός υπολογίζεται κατά 1,5 φορές μεγαλύτερη από ότι στον Βόρειο Ατλαντικό ή στον Ειρηνικό Ωκεανό.

Η θερμοκρασία επίσης μπορεί να δημιουργήσει τοπικά γαλβανικά στοιχεία λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας. Ένα παράδειγμα δημιουργίας ενός τέτοιου γαλβανικού στοιχείου είναι ένα ακίνητο πλοίο με μεγάλη βύθιση. Το νερό στην επιφάνεια την ημέρα με την επίδραση του ηλίου έχει υψηλότερη θερμοκρασία από ότι τα βαθύτερα στρώματα νερού, έτσι δημιουργείται ένα γαλβανικό στοιχείο μεταξύ του τμήματος του χάλυβα στην επιφάνεια και του ευρισκόμενου στα μεγαλύτερα βάθη.

Ακόμη η ηλιακή ακτινοβολία προκαλεί εξάτμιση του νερού και αύξηση της περιεκτικότητας σε άλατα. Αυτό το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο σε τμήματα μετάλλων πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας όπου οι σταγόνες του θαλασσινού νερού εξατμίζουν το νερό τους και τέλος αφήνουν εξάνθημα αλατιού. Η επόμενη σταγόνα που θα πέσει στο ίδιο σημείο θα έχει αυξημένη ποσότητα αλατιού.

B. Η επίδραση της συγκέντρωσης του οξυγόνου.

Η περιεκτικότητα του οξυγόνου στο θαλασσινό νερό θεωρείται ότι κυμαίνεται από 8 έως 12 mg/l με τιμή κορεσμού τα 20 mg/l. Η κύρια πηγή ανανέωσης του οξυγόνου στο θαλασσινό νερό είναι ο κυματισμός. Η μεταβολή της συγκέντρωσης του οξυγόνου οδηγεί και σε διαφορετικές ταχύτητες διάβρωσης για τα μέταλλα.

Σε χώρους όπου τα νερά δεν έχουν αξιόλογο κυματισμό η περιεκτικότητα σε οξυγόνο μειώνεται σημαντικά. Όταν μάλιστα συνυπάρχουν και ουσίες οι οποίες μπορούν να οξειδωθούν καταναλώνοντας οξυγόνο τότε η συγκέντρωση του οξυγόνου πλησιάζει το μηδέν. Η ύπαρξη υδρογονανθράκων στην επιφάνεια της θαλάσσης παρεμποδίζει την εναλλαγή του οξυγόνου.

Η διαφορετική συγκέντρωση οξυγόνου σε διαφορετικά βάθη δημιουργεί τοπικά γαλβανικά στοιχεία τα οποία συνήθως αναφέρονται σαν τοπικά γαλβανικά στοιχεία διαφορικού αερισμού. Σε ένα τέτοιο γαλβανικό στοιχείο στη λιγότερο αεριζόμενη περιοχή του νερού υπάρχει η άνοδος και στην περισσότερο αεριζόμενη περιοχή του νερού η κάθοδος του στοιχείου αυτού. Η διάβρωση λόγω τέτοιων γαλβανικών στοιχείων είναι σημαντική σε εγκαταστημένες χαλύβδινες κατασκευές (π.χ. στύλους δοκούς εμφράξεως) που διατρέχουν όλο το μήκος από τον πυθμένα μέχρι πάνω από την στάθμη της θάλασσας.

Γ. Η επίδραση της ταχύτητας.

Η σχετική ταχύτητα του νερού σε σχέση με την μεταλλική επιφάνεια μεταβάλλει τους ρυθμούς διάβρωσης. Η αύξηση της ταχύτητας από την μία πλευρά περιορίζει την δημιουργία τοπικών γαλβανικών στοιχείων, αλλά από την άλλη αυξάνει την ποσότητα του οξυγόνου στην μεταλλική επιφάνεια. Γενικά η αύξηση της σχετικής ταχύτητας του νερού – μεταλλικής επιφάνειας αυξάνει τον ρυθμό διάβρωσης του χάλυβα, του χαλκού, των κραμάτων χαλκού, του νικελίου και των κραμάτων νικελίου – χαλκού. Πλέον πολύπλοκη είναι η επίδραση της ταχύτητας διάβρωσης στο αλουμίνιο και τα κράματα του λόγω του σχηματισμού προστατευτικού στρώματος οξειδίων.

Σε περίπτωση όπου το νερό μεταφέρει στερεά σωματίδια π.χ. άμμο εμφανίζεται και διάβρωση λόγω αποτριβής.

Δ. Η επίδραση των οργανισμών

Είναι γνωστό το φαινόμενο της επικάθισης διαφόρων φυτικών και ζωικών οργανισμών της θάλασσας πάνω σε μεταλλικές επιφάνειες. Η επικαθίσεις αυτές (fouling) έχουν μια σύνθετη επίδραση στην διάβρωση των μετάλλων. Γενικά θεωρείται ότι αρχικά έχουν μια προστατευτική επίδραση λόγω του διαχωρισμού της μεταλλικής επιφάνειας από το νερό. Όμως στην συνέχεια επιταχύνουν την διάβρωση λόγω του θανάτου και της αποσύνθεσης των οργανισμών αυτών στην επιφάνεια του μετάλλου. Κατά το στάδιο αυτό δημιουργούνται γαλβανικά στοιχεία στην μεταλλική επιφάνεια λόγω διαφορετικών συγκεντρώσεων.

3.2 Η διάβρωση του χάλυβα στο οπλισμένο σκυρόδεμα

3.2.1 Γενικά για το σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται ευρύτατα στις κατασκευές γιατί, σε σύγκριση με άλλα φυσικά (λίθοι) ή τεχνητά υλικά (πλίνθοι, κεραμικά, κονιάματα), οι πρώτες του ύλες είναι διαθέσιμες παντού, είναι σχετικά εύκολο να κατασκευασθεί και να μορφοποιηθεί, έχει χαμηλό κόστος και παρουσιάζει υψηλή αντοχή σε θλίψη.

Το σκυρόδεμα είναι ένα τεχνητό δομικό υλικό που παρασκευάζεται με την ανάμιξη τσιμέντου, αδρανών σκύρων και νερού το οποίο στερεοποιείται με την χημική ένωση του νερού με το τσιμέντο (ενυδάτωση), εγκλωβίζοντας μέσα στην μάζα του τα αδρανή υλικά. Ο όρος αδρανή περιλαμβάνει γενικά την άμμο, το γαρμπίλι και τα σκύρα ή χαλίκια. Εκτός από τα υλικά αυτά, με το νέο Ευρωπαϊκό πρότυπο (EN 206), προβλέπεται η προσθήκη και άλλων ομάδων συστατικών (βελτιωτικά πρόσθετα και πρόσθετα συστατικά) οι οποίες, με διαφορετική αποστολή και με διαφορετικό μηχανισμό κάθε μία, τροποποιούν κατά συγκεκριμένο τρόπο μερικές από τις ιδιότητες του. (Μπατής, 1999)

Η ποιότητα του σκυροδέματος εξαρτάται από την ποιότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών για την κατασκευή του (τσιμέντο, άμμος, χαλίκια, νερό, πρόσθετα), από την αναλογία τους, τον τρόπο ανάμιξης τους, την συμπύκνωση μέσα στα καλούπια και την συντήρησή του ιδιαίτερα τις πρώτες 7 ημέρες από την παρασκευή του, καθώς στο διάστημα αυτό αποκτάει το μεγαλύτερο ποσοστό των ιδιοτήτων του.

Είναι απαραίτητη η γνώση των ιδιοτήτων των υλικών που απαρτίζουν το σκυρόδεμα. Επισταμένη έρευνα έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη του ως το σημαντικότερο δομικό υλικό, καθώς και στην έκταση που αυτό σήμερα έχει καταλάβει στον τομέα των κατασκευών τόσο ως άοπλο, όσο και ως οπλισμένο σκυρόδεμα. Έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να τονισθεί στο σημείο αυτό η διαφορά μεταξύ τσιμέντου και

σκυροδέματος. Το τσιμέντο δεν είναι δομικό υλικό ενώ το σκυρόδεμα είναι. (Ζαχαροπούλου, 2014, σελ 8)

Το σκυρόδεμα είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται σε ένα αρκετά εκτεταμένο εύρος διαφορετικών ποιοτήτων για το σύνολο σχεδόν των κατασκευαστικών έργων. Η σπουδαιότητα των ιδιοτήτων του σκυροδέματος στην ασφάλεια ενός δομικού έργου είναι διαφορετική και εξαρτάται από το είδος της κατασκευής, το περιβάλλον που αυτή θα εκτεθεί και την ειδική χρήση που αυτή θα έχει. Έτσι άλλες απαιτήσεις υπάρχουν για το σκυρόδεμα από το οποίο θα κατασκευασθεί ένα φράγμα, άλλες για μία οικοδομή, για μία υποθαλάσσια κατασκευή, για μία γέφυρα ή για το πηγάδι μιας γεώτρησης. Οι διαφορές επίσης στις ιδιότητες του σκυροδέματος εξαρτώνται από την μεθοδολογία της παρασκευής του, την ποιότητα των πρώτων του υλών και μεταβάλλονται σημαντικά σε συνάρτηση με την βασική του ιδιότητα που είναι οι αντοχές του. Κεφαλαιώδους όμως σημασίας για την πρόβλεψη όλης της μετέπειτα συμπεριφοράς και των ιδιοτήτων του σκυροδέματος είναι η εμβάθυνση στην βασική του πρώτη ύλη που είναι το τσιμέντο και το οποίο σε πολύ μεγάλο βαθμό είναι υπεύθυνο για την ανθεκτικότητα της κατασκευής από το σκυρόδεμα. Για τον λόγο αυτό, για τα ειδικών απαιτήσεων σκυροδέματα, συνεχώς δημιουργούνται νέοι τύποι ειδικών τσιμέντων. Είναι προφανές όμως ότι υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που διαφοροποιούν τα σκυροδέματα μεταξύ των, πέραν του τσιμέντου. Υπάρχουν διαφοροποιημένες αρχές στις οποίες στηρίζεται η προτυποποίηση τους και υπάρχουν άλλες δοκιμασίες και άλλα όρια με τα οποία ελέγχεται η ποιότητα των σκυροδεμάτων.

Οι πρώτες ύλες του σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα αποτελείται από: (Ζαχαροπούλου, 2014, σελ 10)

1. Το τσιμέντο
2. Το νερό ανάμιξης
3. Τα βελτιωτικά (χημικά) πρόσθετα
4. Τα πρόσθετα συστατικά
5. και τα αδρανή υλικά.

Το τσιμέντο είναι μια υδραυλική κονία, δηλαδή ένα λεπτό αλεσμένο ανόργανο υλικό, το οποίο όταν αναμειχθεί με νερό σχηματίζει μια πάστα που λόγω των αντιδράσεων ενυδάτωσης πήζει και σκληραίνει έχοντας έκτοτε την ικανότητα να διατηρεί τις αντοχές της και τη σταθερότητα της ακόμα και κάτω από το νερό. Τα βασικά συστατικά του τσιμέντου από στοιχειακή άποψη είναι το Ca, το Si, το Al και ο Fe.

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

Σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 1008:2002 «Νερό ανάμιξης σκυροδέματος - Προδιαγραφή για δειγματοληψία, έλεγχο και αξιολόγηση της καταλληλότητας του νερού, συμπεριλαμβανομένου του νερού που ανακτάται από διεργασίες στη βιομηχανία σκυροδέματος, για τη χρήση του ως νερό ανάμιξης σκυροδέματος» .

Για το νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος μπορούμε, γενικά, να είμαστε περισσότερο ανεκτικοί, παρά για τα νερά που δρουν εξωτερικά και μόνιμα. Και τούτο γιατί η ποσοστιαία αναλογία του νερού αναμίξεως, και συνεπώς και κάθε ξένης ουσίας μέσα σ' αυτό, είναι μικρή και εξάλλου οι ουσίες αυτές δρουν μέχρι να εξαντληθούν. Στην περίπτωση όμως εξωτερικών νερών, όπως το θαλάσσιο νερό ή τα νερά των αποχετεύσεων, η δράση τους είναι μόνιμη και η ποσότητα των επιβλαβών ουσιών ανεξάντλητη, αφού τα νερά αυτά ανανεώνονται συνεχώς.

Οι κυριότερες από τις χημικές ουσίες που έχουν δυσμενή επίδραση στην εξέλιξη των χημικών αντιδράσεων, με αποτέλεσμα είτε τη μείωση της τελικής αντοχής είτε την καθυστέρηση της πήξεως είναι οι ακόλουθες:

- α) η ζάχαρη,
- β) τα οξέα, όπως το ανθρακικό οξύ ή άλλα οργανικής προέλευσης,
- γ) τα λάδια και λίπη και
- δ) οι οργανικές ουσίες.

Τέλος, το νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή σκυροδέματος, πρέπει να έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε διαλυμένες και αιωρούμενες οργανικές ουσίες καθώς και πλήρη έλλειψη σε λίπη και έλαια. Γενικά, το νερό ανάμιξης κρίνεται κατάλληλο εάν πληροί τις προϋποθέσεις του Ευρωπαϊκού προτύπου EN 1008. Λόγος νερού προς τσιμέντο είναι η κατά βάρος αναλογία του δραστικού νερού προς το τσιμέντο στο φρέσκο σκυρόδεμα. Χαρακτηριστική αντοχή είναι η τιμή εκείνη της αντοχής κάτω από την οποία αναμένεται να ευρίσκονται το 5% από το σύνολο των προσδιορισμών αντοχών.

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

Ανάλογα με την κύρια δράση τους, τα υλικά αυτά κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες, οι κυριότερες των οποίων είναι:

- Ρευστοποιητικά
- Αερακτικά
- Επιβραδυντικά
- Επιταχυντικά

- Στεγανωτικά

Εκτός από αυτά υπάρχουν και άλλα ειδικά πρόσμικτα, όπως αντιπαγετικά, διογκωτικά, αντιδιαβρωτικά. (Chess, et al. 1998)

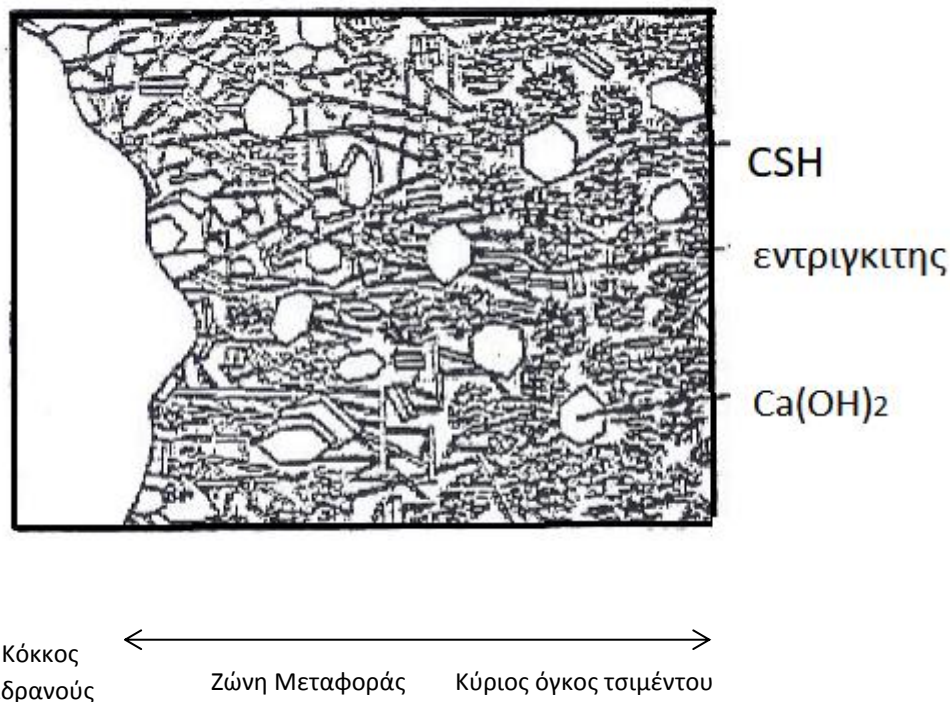
Πρόσθετα Συστατικά είναι τα λεπτομερώς διαμερισμένα ανόργανα υλικά που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα στοχεύοντας είτε να βελτιώσουν κάποιες ιδιότητές του, είτε να πετύχουν συγκεκριμένες ιδιότητες. Υπάρχουν δύο κατηγορίες προσθέτων, τα σχεδόν αδρανή πρόσθετα (τύπου I) και τα πρόσθετα που έχουν λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες (τύπου II) στα οποία περιλαμβάνονται οι ιπτάμενες τέφρες, η πυριτική παιπάλη κ.α. (Chess, et al. 1998)

Χρειάζεται να τονιστεί ότι η διάβρωση είναι μια ηλεκτροχημική διαδικασία και ξεκινά με μεταβολές στο χημικό περιβάλλον στη διεπαφή χάλυβα-σκυροδέματος. Οι βασικοί παράγοντες έναρξης της διάβρωσης είναι δυο :

- η μείωση της τοπικής αλκαλικότητας και
- η διάσπαση της παθητικότητας του οπλισμένου χάλυβα με την παρουσία ιόντων χλωρίου

Τα αδρανή υλικά οφείλουν την ονομασία τους στο γεγονός ότι παραμένουν χημικά αδρανή. Μία έννοια η οποία προέρχεται από ιστορικούς κυρίως λόγους. Είναι φανερό ότι η επιφάνεια των αδρανών αντιδρά με το ζελέ του τσιμέντου προκειμένου να δώσει την ανάπτυξη αντοχών. Σε αντίθεση με το τσιμέντο και το νερό, στη χημική δράση των οποίων οφείλεται η σκλήρυνση, του σκυροδέματος. Τα αδρανή υλικά συνδέονται και συγκολλούνται μεταξύ τους με την παρεμβολή του ζελ του τσιμέντου με δυνάμεις συνάφειας και συμβάλλουν, μηχανικά μόνο, στην αντοχή του τελικού προϊόντος. Αδρανή είναι υλικά, τα οποία προέρχονται από φυσικά ορυκτά πετρώματα και έχουν υποστεί μείωση μεγέθους με φυσικό ή τεχνητό τρόπο. Ένα έχουν υποστεί μείωση με φυσικό τρόπο τα ονομάζουμε φυσικά αδρανή και αν έχουν υποστεί μείωση μεγέθους μέσω διαφόρων θραυστήρων ονομάζονται τεχνητά. Διακρίνονται σε κανονικού βάρους με πυκνότητα σωματιδίων μεταξύ 2000 και 3000 Kg/m³ όταν προσδιορίζονται σύμφωνα με το πρότυπο EN 1097-6, σε ελαφροβαρή αδρανή όταν η πυκνότητα είναι μικρότερη των 2000 Kg/m³ και σε βαριά αδρανή όταν η πυκνότητα είναι μεγαλύτερη των 3000 Kg/m³ .

Στο αριστερό μέρος του σχήματος 26 φαίνεται ένας κόκκος αδρανούς στα πρώτα στάδια της ενυδάτωσης, ο οποίος περιβάλλεται από τις ένυδρες φάσεις του τσιμέντου, χωρίς να έχει υποστεί καμία αλλοίωση από αυτές.



Εικόνα 26 : Κόκκος αδρανούς στις πρώτες ώρες της ενυδάτωσης (Ζαχαροπούλου, 2014, σελ 11)

Για αδρανή υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν θεωρητικά οποιαδήποτε υλικά συγκεντρώνουν τις τρεις βασικές απαιτήσεις: επαρκή αντοχή, επαρκή πρόσφυση και χημική ανεκτικότητα με την τσιμεντοκονία.

Τα καταλληλότερα πετρώματα είναι τα ασβεστολιθικά ή τα πυριτικά. Τα κύρια χαρακτηριστικά των αδρανών που επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος είναι: η αντοχή τους (αντοχή του μητρικού πετρώματος), η καθαρότητα (η ύπαρξη δηλαδή ή όχι πρόσμικτων ουσιών), η πρόσφυση με την κονία, η χημική συμπεριφορά τους με άλλα συστατικά του σκυροδέματος, η κοκκομετρική τους διαβάθμιση, (σχήμα και μέγεθος των κόκκων) και η θλιπτική αντοχή τους.

3.2.1.1 Θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

Η σημαντικότερη ίσως ιδιότητα του σκυροδέματος είναι η θλιπτική του αντοχή. (Ζέρης, 2013) Το σκυρόδεμα ακόμα και το άοπλο, εμφανίζει μεγάλη αντοχή σε θλίψη γεγονός στο οποίο οφείλεται σε μεγάλο βαθμό η χρήση του υλικού στις κατασκευές.

Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος συμβολίζεται ως f_c (c: concrete) στους κανονισμούς οπλισμένου σκυροδέματος και αναφέρεται στην μοναδική θλιπτική αντοχή. Η αντοχή αυτή μετράται στις 28 ημέρες σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 150mm και ύψους 300mm ή κυβικά δοκίμια ακμής 150mm, σύμφωνα με τις διατάξεις του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος.

Ο κανονισμός οπλισμένου σκυροδέματος, ορίζει σαν βάση τη χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή f_{ck} . Χαρακτηριστική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου f_{ck} ή κυβικού δοκιμίου $f_{ck,cube}$ θεωρείται εκείνη η τιμή αντοχής κάτω της οποίας υπάρχει 5% πιθανότητα να βρεθεί η τιμή αντοχής ενός τυχαίου δοκιμίου.

Όπως είναι φυσικό, η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος f_{cm} (m : mean), δηλαδή η μέση τιμή των αντοχών δύο ή περισσότερων δοκιμίων από το ίδιο δείγμα σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη από την χαρακτηριστική αντοχή f_{ck} . Ο κανονισμός συνδέει τα δύο αυτά μεγέθη με την παρακάτω σχέση: $f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa).

3.2.1.2 Η καθαρότητα του σκυροδέματος

Στην συνέχεια αναπτύσσονται περισσότερο οι έννοιες της καθαρότητας, της κοκκομετρικής διαβάθμισης και της χημικής συμπεριφοράς. Με την έννοια της καθαρότητας εννοείται ότι τα αδρανή δεν πρέπει να έχουν στην επιφάνεια τους ή μέσα στη μάζα τους ή αναμεταξύ τους ξένες ουσίες που μπορεί να εμποδίσουν την πρόσφυση με το κονίαμα ή να έχουν επιβλαβή χημική επίδραση στο τσιμέντο ή στο σίδηρο (Sheppard, 1986, σελ 60) . Τα κυριότερα από τα επιβλαβή αυτά πρόσμικτα υλικά είναι:

α) Παιπάλη. Ως παιπάλη ορίζεται το λεπτότατο υλικό που περνάει από το Αμερικάνικο πρότυπο κόσκινο No 200 (75 μ m) και προσδιορίζεται σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος.

Η παιπάλη δεν πρέπει να υπερβαίνει το 16% του ξηρού βάρους της άμμου και το 1% των άλλων κλασμάτων (γαρμπιλιού, σκύρων κ.λ.π.). Η παιπάλη μπορεί να είναι πηλός ή άργιλος ή σκόνη από το ίδιο πέτρωμα. Ιδιαίτερη όμως σημασία έχει η κατανομή της παιπάλης μέσα στα αδρανή. Μπορεί να είναι: i) κολλημένη επάνω στην επιφάνεια των χονδρότερων κόκκων, ii) να σχηματίζει μικρούς σβώλους και iii) να είναι διασκορπισμένη ομοιόμορφα ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών. Η παιπάλη απομακρύνεται όταν τα αδρανή πλυθούν με νερό.

β) Οργανικές προσμίξεις. Στις οργανικές προσμίξεις περιλαμβάνονται υλικά οργανικής (φυτικής ή ζωικής) προέλευσης, γαϊάνθρακες και λιγνίτες. Τα οργανικά προϊόντα μπορεί να έχουν επίδραση στην πήξη της κονίας ή να δημιουργήσουν ρηγματώσεις ή αποφλοιώσεις (σκασίματα) στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Η επίδραση τους στην πήξη είναι μάλλον επιβραδυντική.

γ) Θειούχες ενώσεις. Θειούχες ενώσεις μεταξύ των αδρανών έχουν δυσμενή επίδραση στην τελική αντοχή του σκυροδέματος, και σε μεγαλύτερη ποσότητα ή όταν είναι συγκεντρωμένες σε ορισμένα σημεία, μπορούν να προκαλέσουν ρηγματώσεις από την τοπική διόγκωση του σκυροδέματος που προκαλούν. Τα αποτελέσματα των θειούχων ενώσεων εξαρτώνται από τον τύπο τους και είναι περισσότερα έντονα, όταν οι θειούχες αυτές ενώσεις είναι διαλυτές στο νερό. Σημασία επίσης έχει και η δυνατότητα ή όχι του να εισχωρήσει έπειτα στη μάζα του σκυροδέματος αέρας ή υγρασία.

δ) Ανόργανες ενώσεις που καθυστερούν την πήξη του σκυροδέματος όπως ενώσεις Ψευδαργύρου.

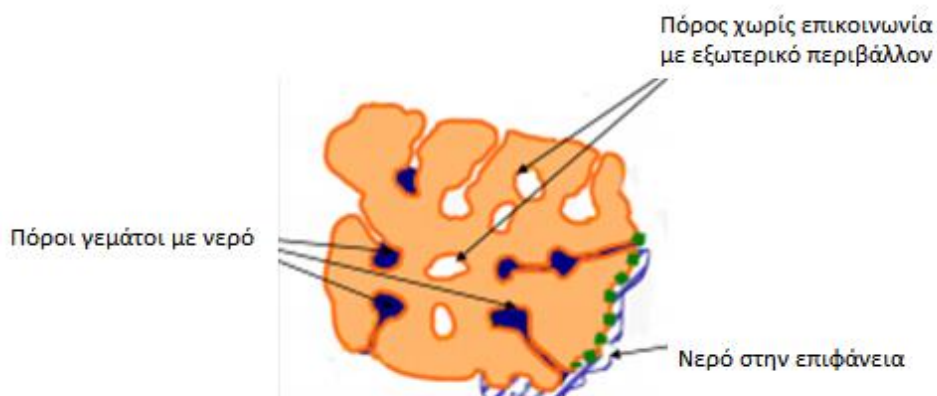
3.2.1.3 Κακκομετρική σύνθεση

Ως προς την κοκκομετρική σύνθεση ή διαβάθμιση θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι κόκκοι των αδρανών υλικών στηρίζονται ο ένας πάνω στον άλλον, αλλά λόγω του ακανόνιστου πολυγωνικού σχήματος που έχουν, δεν εφάπτονται απόλυτα μεταξύ τους, παρά αφήνουν ενδιάμεσα κενά. Τα κενά αυτά μεταξύ των αδρανών, τα γεμίζει το κονίαμα που συνδέει μ' αυτό τον τρόπο τους κόκκους σε ένα συμπαγές υλικό. Η ποσότητα του κονιάματος πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με τα μεταξύ των κόκκων κενά. Επειδή από την άλλη μεριά το κονίαμα είναι κατά κανόνα περισσότερο πορώδες και λιγότερο ανθεκτικό από το πέτρωμα των αδρανών, όσο λιγότερα είναι τα παραπάνω κενά τόσο μεγαλώνει και η αντοχή και η πυκνότητα του σκυροδέματος. Τον βαθμό πυκνότητας των αδρανών εκφράζει ο λόγος:

$$\alpha = \rho\phi / \rho\pi$$

- $\rho\phi$ = το φαινόμενο ειδικό βάρος της σωρού των αδρανών
- $\rho\pi$ = το φαινόμενο ειδικό βάρος του πετρώματος των αδρανών (δηλαδή το φαινόμενο ειδικό βάρος του πετρώματος του κόκκου).

Το ποσοστό των μεταξύ των κόκκων κενών είναι τότε: $1 - \alpha$. Ακριβέστερη εικόνα δίνει η κοκκομετρική σύνθεση, δηλαδή ο διαχωρισμός και η κατάταξη των κόκκων σε ομάδες από άποψη μεγέθους.



Εικόνα 27 : Κοκκομετρική σύνθεση

3.2.1.4 Η χημική συμπεριφορά του με άλλα συστατικά του σκυροδέματος

Αναφορικά τέλος με την χημική συμπεριφορά θα πρέπει να ελέγχεται κατά πόσον τα αδρανή περιέχουν ποιότητες πυριτίου επιδεκτές σε προσβολή από τα αλκάλια (Na₂O και K₂O) που προέρχονται από το τσιμέντο, ενώ παράλληλα το σκυρόδεμα εκτίθεται σε υγρό περιβάλλον. Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει ο κίνδυνος αντίδρασης μεταξύ των αλκαλίων και των αδρανών με αποτέλεσμα την καταστροφή του σκυροδέματος.

Τα χρησιμοποιούμενα αδρανή πρέπει να είναι σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 12620, εφ' όσον πρόκειται για κανονικά ή βαριά αδρανή και την προδιαγραφή EN 13055-1, εφ' όσον πρόκειται για ελαφροβαρή αδρανή.

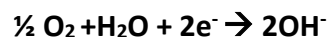
3.3 Διάβρωση σε οπλισμένο σκυρόδεμα

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η διάβρωση του σιδηροοπλισμού στο σκυρόδεμα είναι ηλεκτροχημική. Αυτό σημαίνει την ύπαρξη μιας ανοδικής, μιας καθοδικής δράσης και ενός ηλεκτρολύτη για την μεταφορά ιόντων. Η διεξαγωγή των δράσεων αυτών πραγματοποιείται στην διαφάνεια μετάλλου – ηλεκτρολύτου και ακολουθεί η μετακίνηση των ιόντων στον ηλεκτρολύτη. (Μπατής, 1999, κεφάλαιο 2 σελ.1)

Η ανοδική δράση είναι μια οξειδωτική δράση όπου λαμβάνει μέρος στον οπλισμό του σκυροδέματος δίνει ηλεκτρόνια σύμφωνα με την αντίδραση.

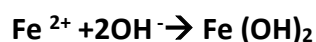


Από την άλλη, η καθοδική δράση είναι συνυφασμένη με την πρόληψη ηλεκτρονίων. Για την ολοκλήρωση της είναι αναγκαία η ύπαρξη οξειδωτικού μέσου (οξυγόνο). Η αντίδραση κατά την καθοδική δράση είναι:



Το οξυγόνο περνάει μέσα από τους πόρους του σκυροδέματος για να φτάσει στην επιφάνεια του σιδήρου.

Τα μεταλλοίοντα από την ανοδική δράση και τα υδροξυλιόντα από την καθοδική δράση μετακινούνται στον ηλεκτρολύτη και σχηματίζουν ένα στερεό προϊόν όπως στην αντίδραση.



Το υδροξείδιο του σιδήρου με το υπάρχον οξυγόνο θα μετατραπεί σε υδροξείδιο του τρισθενούς σιδήρου (Fe(OH)₃). Ο οπλισμός παίζει το ρόλο του αγωγού σύνδεσης ανοδικών – καθοδικών περιοχών (εμφάνιση γαλβανικών μακροστοιχείων).

3.3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση σε σκυρόδεμα.

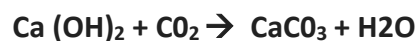
Την διάβρωση του χάλυβα στο σκυρόδεμα επηρεάζουν οι ακόλουθοι παράγοντες:(Δημάδη και Κατσεινίου, 2012, σελ 1)

- Ενανθράκωση του σκυροδέματος
- Επίδραση χλωριόντων
- Ρωγμές

Ενανθράκωση

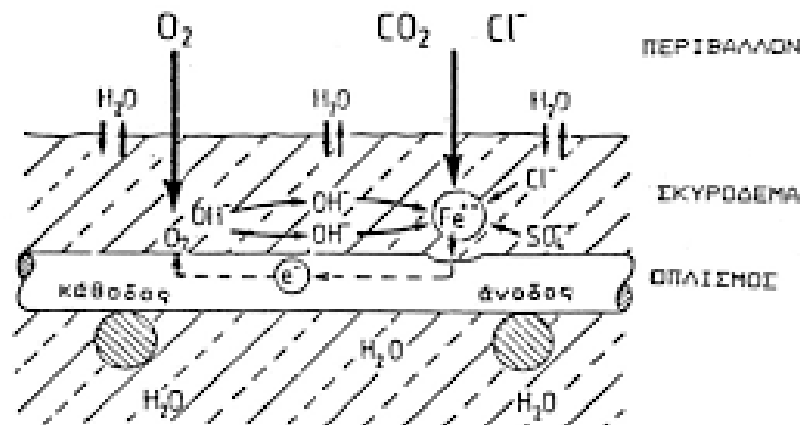
Το σκυρόδεμα κατά την ενυδάτωση περιέχει πόρους διαφορετικών διαμέτρων οι οποίοι μπορεί να είναι στεγνοί ή γεμάτοι με νερό. Στο διάλυμα του σκυροδέματος μετά την ενυδάτωση περιέχεται υδροξείδιο του ασβεστίου. Το διάλυμα αυτό έχει ένα pH 12.5 και βοηθάει στον σχηματισμό ενός παθητικού προστατευτικού οξειδίου στην επιφάνεια του χάλυβα. Αντιδράσεις όμως με διεισδύουσες όξινες ουσίες μειώνουν διαρκώς το pH. Την μέγιστη σημασία έχει εδώ η επίδραση του CO₂. Το αποτέλεσμα της απορρόφησης του CO₂ είναι η βαθμιαία εξουδετέρωση της αλκαλικότητας.(Μπατής, 1999) (Δημάδη και Κατσεινίου, 2012)

Ένας λόγος της υψηλής προστασίας από την διάβρωση είναι ότι το τσιμέντο, το οποίο είναι συστατικό του σκυροδέματος, και είναι έντονα αλκαλικό. (Μπατής, 1999, κεφάλαιο 2 σελ 4) .



Το φαινόμενο της δημιουργίας ανθρακικού ασβεστίου ονομάζεται ενανθράκωση. Η ταχύτητα της ενανθράκωση εξαρτάται από :

1. Την περιεκτικότητα σε τσιμέντο και νερό. Το νερό που δεν μπορεί να δεσμευτεί εξατμίζεται αφήνοντας τον όγκο σαν τριχοειδή και πόρους που αργότερα θα είναι η αφετηρία της ενανθράκωσης.
2. Την υγρασία του αέρα καθώς και το πάχος και η ποιότητα της επικάλυψης. Όσο το πάχος της επικάλυψης είναι μεγαλύτερο τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται για να φτάσουν τα διαβρωτικά συστατικά στον οπλισμό.



Εικόνα 28 : Οπλισμός σκυροδέματος μετά την ύπαρξη χλωριών και διοξειδίου του άνθρακα.

Η αντίδραση πραγματοποιείται παρουσία μικρής ποσότητας νερού. Το νερό που δημιουργείται μετά την αντίδραση διαχέεται στο εσωτερικό του σκυροδέματος όπως επίσης και το CO₂ μέσω της αέριας φάσης των πόρων. Αποτέλεσμα είναι το pH του σκυροδέματος να μειώνεται σε τιμές κάτω του 9. Με την διαδικασία της ενανθράκωσης, ο χάλυβας αποπαθητικοποιείται οπότε πλέον αρχίζει η διάβρωση. (Δημάδη και Κατσενίου, 2012, σελ 2)

Επίδραση Χλωριόντων

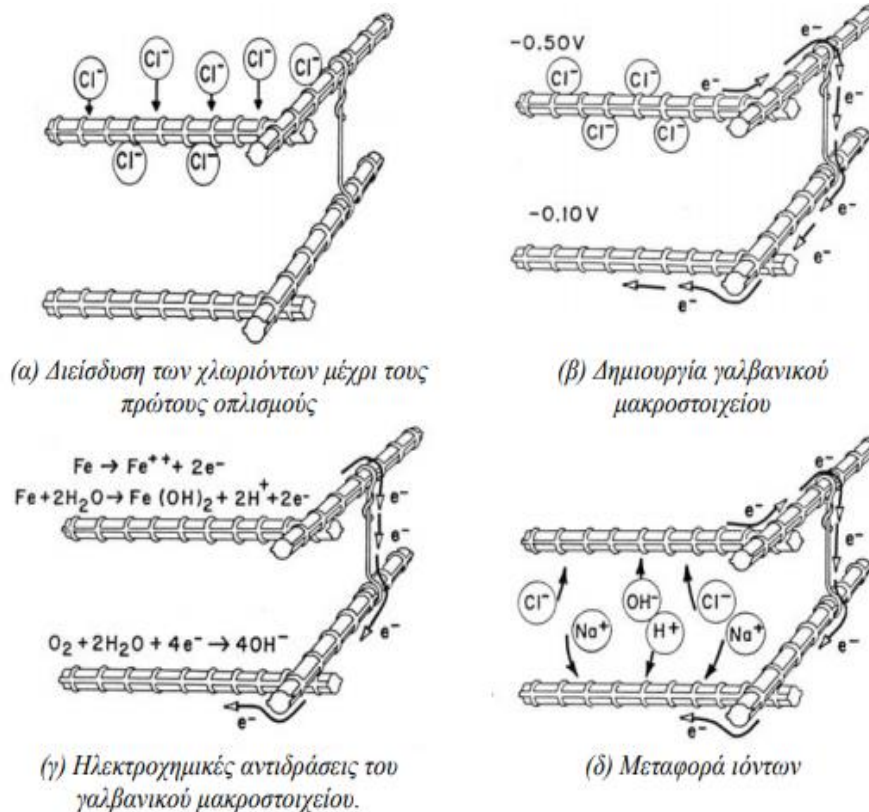
Τα χλωριόντα είτε μπορούν να εμφανιστούν από τα υλικά κατασκευής του σκυροδέματος (π.χ. άμμος θαλάσσης, γλυκό νερό) ή μεταφέρονται από το περιβάλλον στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Η ύπαρξη των χλωριόντων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αγωγιμότητας του σκυροδέματος και την αποπαθητικοποίηση του χάλυβα. Η παρουσία των χλωριόντων στην μάζα του σκυροδέματος εξαρτάται από: (Μπατής, 1999, κεφ. 2 σελ 18)

- Το πορώδες και την κατανομή των μεγεθών των πόρων
- Το είδος του χρησιμοποιημένου τσιμέντου.
- Την ποσότητα νερού στους πόρους
- Τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

Τα χλωριόντα μέσα από του πόρους μπορούν να διαπεράσουν το προστατευτικό σκυροδέμα οξειδίων με αποτέλεσμα την τοπική ή γενική καταστροφή και οξείδωσή του. Η ενανθράκωση επιταχύνει την διείσδυση χλωριόντων. Τα υδροξείδια του ασβεστίου δεσμεύει τα χλωριόντα, περιορίζοντας την ποσότητα αυτών σε συγκέντρωση όπου προστατεύεται η επικάλυψη οξειδίου του χάλυβα. (Δημάδη και Κατσενίου, 2012, σελ 3) (Μπατής, 2007)

Εκτός από τα τοπικά γαλβανικά στοιχεία που αναλύθηκαν προηγούμενο κεφάλαιο, μπορούν να παρατηρηθούν και μακροστοιχεία αλλά σε μεγαλύτερες εκτάσεις του οπλισμού. Τα μακροστοιχεία οφείλονται στην όλη συγκρότηση και λειτουργία του οπλισμένου σκυροδέματος και όχι μόνο στον χάλυβα. Ένα μακροστοιχείο δημιουργείται και στην περίπτωση της επαφής δύο διαφορετικών μετάλλων. Για παράδειγμα αν ένας επιψευδαργυρωμένος (γαλβανιζέ) χάλυβας έλθει σε ηλεκτρικά αγώγιμη επαφή με έναν κοινό χάλυβα μέσα σε σκυρόδεμα, δημιουργείται γαλβανικό μακροστοιχείο λόγω διαφορετικών μετάλλων. Το ίδιο μπορεί να συμβεί και στην περίπτωση επαφής ανοξείδωτου χάλυβα με κοινό χάλυβα.

Σε οπλισμένο σκυρόδεμα η εμφάνιση των μακροστοιχείων οφείλεται σε επιδράσεις του περιβάλλοντος. Στα σχήματα 29α, 29β, 29γ και 29δ απεικονίζεται η δημιουργία μακροστοιχείου λόγω τις επιρροής του από τα χλωριόντα. Όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 29α, τα χλωριόντα λόγω του θαλασσινού περιβάλλοντος εισέρχονται στο σκυρόδεμα από μια διεύθυνση. Τα χλωριόντα με την πάροδο του χρόνου φθάνουν στους πρώτους οπλισμούς, ενώ οι οπλισμοί που βρίσκονται στο εσωτερικό του κτηρίου δεν έχουν χλωριόντα γύρω τους. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 29β, μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών χαλύβων δημιουργείται μακροστοιχείο. Οι οπλισμοί που έχουν χλωριόντα γύρω τους αποτελούν την άνοδο ενώ οι οπλισμοί χωρίς αποτελούν την κάθοδο του γαλβανικού μακροστοιχείου (Σχήμα 29γ). Μέσω των πόρων του σκυροδέματος αρχίζει η μεταφορά των ιόντων, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 29δ. Η ταχύτητα διάβρωσης εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος του γαλβανικού μακροστοιχείου. Ενώ η ένταση του ρεύματος του γαλβανικού μακροστοιχείου εξαρτάται από το δυναμικό, την ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος και τον λόγο μεταξύ ανοδικής και καθοδικής επιφάνειας. (Μπατής, 2007, σελ 4)

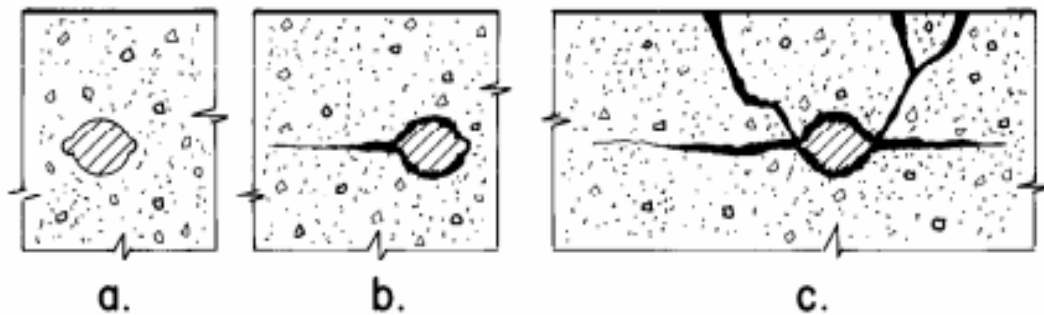


Εικόνα 29 : Σχηματισμός μακροστοιχείου σε σκυρόδεμα με χλωριόντα. (Μπατής, 1999, σελ 24)

Ρωγμές

Η παρουσία ρωγμών στο σκυρόδεμα έχει σαν διευκόλυνση την μεταφορά του οξυγόνου, του διοξειδίου του άνθρακα και των χλωριόντων στην επιφάνεια οπλισμού. Οι ρωγμές αυτές μπορεί να προέρχονται από συστολή ξήρανσης, από υψηλές εντάσεις ή από διάφορες συγκρούσεις. (Μπατής, 1999, σελ 26) (Δημάδη και Κατσενίου, 2012, σελ 3)

Με αλλά λόγια η δομή θα πρέπει να είναι κατάλληλα σχεδιασμένη για τη διάβρωση σε συγκεκριμένο περιβάλλον και όλοι οι παράγοντες να προβλεφθούν σωστά. Συνήθως η πρώτη ένδειξη διάβρωσης είναι ένα καφέ χρώμα στην επιφάνεια του σκυροδέματος που βρίσκεται πλησιέστερα στον ενσωματωμένο χάλυβα. Το αποτέλεσμα αυτό προκαλείται από την διείσδυση ιόντων σιδήρου μέσα από μικροσκοπικές ρωγμές του σκυροδέματος. Οι ρωγμές αυτές συχνά συνοδεύονται από συσσωμάτωση του δοκιμίου και μείωση της θλιπτικής του αντοχής. (Μπατής, 1999, σελ 26)



Εικόνα 30 : Σχηματική παράσταση δημιουργίας ρωγμών στο σκυρόδεμα λόγω σχηματισμού προϊόντων διάβρωσης. (Μπατής, 2007, σελ 3)

3.3.2 Διάβρωση σε οπλισμένο σκυρόδεμα σε θαλασσινό νερό

Ο εξοπλισμός οπλισμένου σκυροδέματος που βρίσκεται σχεδόν βυθισμένος σε θαλασσινό νερό είναι ιδιαίτερα επιρρεπής στην διάβρωση λόγω ποικίλων αιτιών. Οι λόγοι αυτοί περιλαμβάνουν κυρίως τα υψηλά ποσοστά χλωρίου στην συγκέντρωση του σκυροδέματος λόγω της παρουσίας του θαλασσινού νερού, επίσης το υγρό ή το ξηρό κύκλωμα και τέλος η υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία (οξυγόνο). (Daily, 2002, σελ 1)

Τρεις περιοχές σε οπλισμένο σκυρόδεμα μπορούν να διακριθούν όσον αφορά την διάβρωση εάν αυτό βρίσκεται βυθισμένο σε θαλασσινό νερό. (Chess, et al. 1998, σελ 42)

1. Η βυθισμένη ζώνη
2. Η ζώνη εκτόξευσης, η παλιρροιακή ζώνη (υγρή και ξηρή περιοχή) και
3. Η ατμοσφαιρική ζώνη (σπάνια βρεγμένη περιοχή)

Κάθε μια από τις προηγούμενες ζώνες χαρακτηρίζεται από διαφορετικό βαθμό διάβρωσης (NACE, 1983). Για παράδειγμα η διάβρωση στην περιοχή όπου είναι βυθισμένη σε νερό είναι περιορισμένη λόγω του χαμηλού ποσοστού οξυγόνου, χλωρίου και υγρασίας. Η διάβρωση είναι πιο σοβαρή στην περιοχή της εκτόξευσης και της παλιρροιακής ζώνης όπου η διαβροχή και η ξήρανση ταυτόχρονα οδηγούν σε υψηλή περιεκτικότητα σε χλώριο και οξυγόνο. Επίσης η υψηλή υγρασία στην περιοχή αυτή συμβάλλει στην υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα του σκυροδέματος. (Daily, 2002, σελ 2)

3.3.3 Διάβρωση οπλισμένου σκυροδέματος στην ατμόσφαιρα

Η διάβρωση του σκυροδέματος στην ατμόσφαιρα οφείλεται σε αλάτι, αλλά και ταυτόχρονα στην υγρασία που την χαρακτηρίζει. Η ποιότητα του σκυροδέματος, το πάχος της επίστρωσης γύρω από αυτό διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην είσοδο ιόντων χλωρίου και συνεπώς στο χρόνο που θα λάβει μέρος η διάβρωση. Στην συνέχεια η διαδικασία με την οποία διοχετεύεται διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα διαμέσου των πόρων στο σκυροδέμα εξουδετερώνει την αλκαλικότητα του περιβάλλοντος και βοηθά στην καταστροφή του παθητικού φιλμ του χάλυβα και σαν αποτέλεσμα συμβάλει στην διάβρωση που προκαλείται από το χλώριο (Daily, 2002, σελ 2).

Οι δομές σκυροδέματος σε θερμό, τροπικό, θαλάσσιο περιβάλλον είναι ιδιαίτερα επιρρεπή στην επιδείνωση του σκυροδέματος, δεδομένου ότι τα ποσοστά διάβρωσης επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία και την ειδική αντίσταση. Έχει διαπιστωθεί ότι η περιεκτικότητα σε υγρασία 2% κατά βάρος του κονιάματος που έρχεται σε επαφή με τον χάλυβα θα είναι αιτία σημαντικής διάβρωσης.

Υπάρχουν δυο τύποι διάβρωσης που μπορούν με την σειρά τους να επηρεάσουν αρνητικά το σκελετό των κτηρίων:

A. Ομοιόμορφη διάβρωση

Η διάβρωση αυτή παρουσιάζεται ως ομοιόμορφο στρώμα σκουριάς στην επιφάνεια του χάλυβα. Αυτή είναι η πιο συνηθισμένη μορφή διάβρωσης που εμφανίζεται στον σκελετό από χάλυβα στα κτήρια (Daily and Somerville, 2002, σελ 2).

B. Pitting διάβρωση

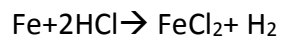
Η διάβρωση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική απώλεια χαλύβδινου τμήματος. Αν και αυτή η διάβρωση είναι ασυνήθιστη σε κτήρια, μπορεί από την άλλη να βρεθεί σε παραθαλάσσια κτήρια όπου τα άλατα μπορούν να διεισδύσουν μέσα από τους πόρους του σκυροδέματος στο χαλύβδινο οπλισμό και τα χλώρια με την σειρά τους να επιδράσουν αρνητικά στην παθητική του μεμβράνη (Daily and Somerville, 2002, σελ 2).

4. Καθοδική προστασία

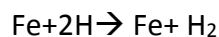
Τα περισσότερα μέταλλα εμφανίζονται στην φύση σε χημικά συνδυασμένη μορφή και απαιτείται ενέργεια έτσι ώστε να παρεμποδιστεί η μετατροπή τους στο αρχικό μέταλλευμα. Μόλις τα μέταλλα εξαγονται και εκτίθενται στο φυσικό περιβάλλον προσπαθούν να επιστρέψουν στην αρχική τους μορφή. Η μετατροπή αυτή ονομάζεται διάβρωση. Πολλές φορές η διαδικασία είναι αναπόφευκτη και η πρόληψή της δύσκολη, αλλά η προστασία του υλικού από αυτή είναι πολύ σημαντική. Βασική μέθοδο αποφυγής της διάβρωσης είναι η **καθοδική προστασία**.

Άξιο προς μνημόνευση είναι η αναφορά για τη πρώτη εφαρμογή καθοδικής προστασίας από τον Sir Humphrey Davy το 1824, όπου έκανε χρήση μικρών κομματιών ψευδάργυρου ή σιδήρου πάνω σε χάλκινη επιφάνεια πλοίων πολέμου και κατάφερε να προλάβει τη γρήγορη διάβρωση του χαλκού. (Ashworth and Booker, 1986)

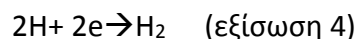
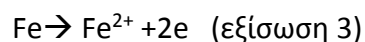
Για παράδειγμα, ο σίδηρος σε διάλυμα αραιού οξέος παράγει όπως φαίνεται συμφωνά με την παρακάτω αντίδραση υδρογόνο:



Εάν υποθεθεί, ότι το οξύ και ο χλωριούχος σίδηρος είναι πλήρως ιονισμένος, τότε τα ιόντα χλωρίου υπάρχουν ταυτόχρονα και στις δυο μεριές της εξίσωσης και έτσι μπορούν να παραληφθούν:



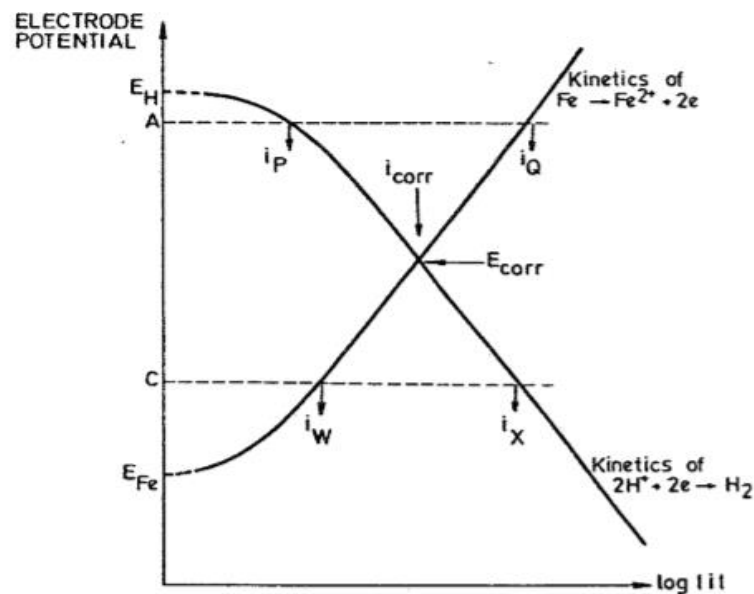
Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να χωριστεί στην μεταλλική και στην μη μεταλλική αντίδραση:



Η ηλεκτροχημική αντίδραση (εξίσωση 3) που αναφέρεται στην διάβρωση του μετάλλου και απελευθερώνονται ηλεκτρόνια λαμβάνουν μέρος οι αντιδράσεις οξείδωσης και παίρνει τον όρο ανοδική αντίδραση. Ενώ, η ηλεκτροχημική αντίδραση (εξίσωση 4) όπου καταναλώνονται τα ηλεκτρόνια παίρνει τον όρο καθοδική αντίδραση. Η ποσότητα των ηλεκτρονίων που παράγονται είναι ισοδύναμα με αυτά που καταναλώνονται στις αντιδράσεις.

Το μέταλλο σε συνθήκες διάβρωσης αποκτά αυθόρμητα δυναμικό. Έτσι, με την ηλεκτρική παρέμβαση στην αντίδραση διάβρωσης θα συμβούν μεταβολές στους ρυθμούς της ανοδικής και καθοδικής αντίδρασης. Για να γίνει αντιληπτή η διαδικασία ρύθμισης του δυναμικού, στην περίπτωση που τα ηλεκτρόνια απομακρυνθούν από το σίδηρο θα διαλυθούν γρήγορα, ο ρυθμός της παραγωγής του υδρογόνου θα μειωθεί και το δυναμικό του μετάλλου θα αυξηθεί. Από την άλλη μεριά, αν τα ηλεκτρόνια

τροφοδοτηθούν από μια εξωτερική πηγή ενέργειας, η αντίδραση της κατανάλωσης ηλεκτρονίων θα επιταχυνθεί, ο ρυθμός ανάπτυξης του υδρογόνου θα αυξηθεί, ο ρυθμός διάλυσης του σιδήρου θα επιβραδυνθεί και αντίστοιχα το δυναμικό του ηλεκτροδίου θα πέσει. Έτσι με την εισαγωγή ηλεκτρονίων από εξωτερική πηγή ενέργειας πάνω στο μέταλλο, μειώνει ή ακόμη καλύτερα σταματάει η διάβρωση του μετάλλου. Αύτη είναι και η αρχή της καθοδικής προστασίας. Φανερό είναι ότι η καθοδική προστασία μπορεί να εφαρμοστεί όταν το μέταλλο εκτίθεται σε αγώγιμο ηλεκτρολυτικά περιβάλλον. (ISO Standards, 2006)



Εικόνα 31 : Η κινητική της καθοδικής και της ανοδικής αντίδρασης συναρτήσει του ηλεκτρικού δυναμικού. (Ashworth and Booker, 1986, σελ 17)

Οι τιμές της αντίδρασης μπορούν να περιγραφούν με την ποσότητα του υδρογόνου που δημιουργείται και από την ποσότητα του διαλυμένου μετάλλου (πχ σιδήρου). Αλλά, σε κάθε αντίδραση είτε σε αυτή που παράγονται, αλλά είτε σε αυτή που καταναλώνονται ηλεκτρόνια, οι τιμές τους μπορούν εύκολα να περιγραφθούν σαν ηλεκτρικό ρεύμα πυκνότητας (density i). Από σύμβαση, η απελευθέρωση ηλεκτρονίων παρουσιάζεται σαν θετικό ρεύμα, από την άλλη η κατανάλωση σαν αρνητικό ρεύμα. Το δυναμικό E_H που παρουσιάζει τον καθαρό ρυθμό απελευθέρωσης υδρογόνου φαίνεται στο διάγραμμα ως αρκετά μικρός, στην πραγματικότητα όμως είναι μηδέν. Η τιμή του δυναμικού εξαρτάται τόσο από το pH του περιβάλλοντος, αλλά τιμές πάνω από το E_H η αντίδραση της ανάπτυξης υδρογόνου δεν πραγματοποιείται. Ισοδύναμα, ο καθαρός ρυθμός ανοδικής αντίδρασης E_{Fe} εξαρτάται από την συγκέντρωση ιόντων σιδήρου. Τιμές κάτω από το E_{Fe} η ανοδική διάσπαση του σιδήρου σύμφωνα με την αντίδραση 3 δεν ισχύει. Με άλλα λόγια η τιμή του E_{Fe} αντιπροσωπεύει το κατώφλι για την έναρξη της διάσπασης του σιδήρου.

Μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι στο E_{Corr} η ανοδική και η καθοδική αντίδραση είναι ισοδύναμες σε μέγεθος και αντίθετες στα σημεία, αυτό σημαίνει ότι όλα τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται στην ανοδική αντίστοιχα καταναλώνονται και στην καθοδική. Αυτή είναι η κατάσταση που κυριαρχεί αυθόρμητα όταν λαμβάνει χώρα η διάβρωση.

Έτσι το E_{corr} ονομάζεται δυναμικό διάβρωσης και η αντίστοιχη πυκνότητα ρεύματος που παριστάνει τον ρυθμό διάβρωσης, ονομάζεται πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης. Με την αύξηση του δυναμικού (από E_{corr} σε A) επέρχεται αύξηση του ρυθμού διάλυσης (από i_{corr} σε i_a) του σιδήρου και αντίστοιχη μείωση της παραγωγής υδρογόνου (από i_{corr} σε i_p). Από την γραφική αναπαράσταση επίσης είναι εμφανές ότι εάν το δυναμικό κατέβει σε τιμές χαμηλότερες του σημείου C, ο ρυθμός διάλυσης μειώνεται (από i_{corr} σε i_w) και η παραγωγή του υδρογόνου αυξάνεται (από i_{corr} σε i_x). Ωστόσο, η τιμή A ή C για το δυναμικό είναι ανέφικτη καθώς και στις δυο περιπτώσεις πάντα θα υπάρχει περίσσεια ηλεκτρονίων προς απελευθέρωση ($i_a - i_p$) και ηλεκτρόνια προς κατανάλωση ($i_x - i_w$). Συμπερασματικά για την ανύψωση του δυναμικού πάνω από την τιμή E_{corr} θα πρέπει ηλεκτρόνια να αποσυρθούν από το μέταλλο, ενώ αντίθετα μείωση του δυναμικού κάτω από την τιμή E_{corr} θα πρέπει ηλεκτρόνια να παρέχονται σε αυτό. (Ashworth and Booker, 1986, σελ 18)

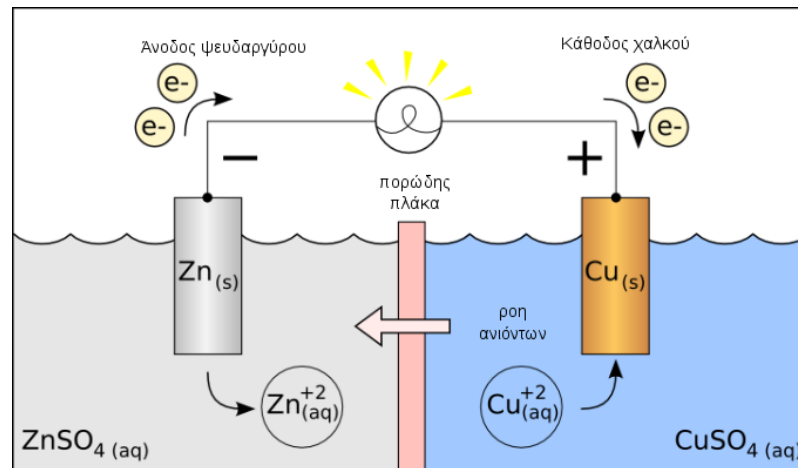
Το ρεύμα προστασίας μπορεί να προέρχεται από:

- Ένα πιο ενεργό μέταλλο όπως ο ψευδάργυρος ή το μαγνήσιο.
- Μια εξωτερική πηγή ενέργειας όπως ένας ανορθωτής.

4.1 Καθοδική προστασία με γαλβανικές ανόδους

Στην καθοδική προστασία με γαλβανικές ανόδους, γίνεται σύνδεση έντονα ανοδικών μετάλλων με μεταλλικές επιφάνειες. Το χαρακτηριστικό αυτής της προστασίας είναι ότι το διαθέσιμο ρεύμα από τις ανόδους είναι μικρό και έτσι αν οι άνοδοι απαιτείται να προσφέρουν ένα μεγάλο ποσό ρεύματος, η ηλεκτρική αντίσταση επαφής μεταξύ των ανόδων και του περιβάλλοντος εδάφους/ νερού πρέπει να είναι χαμηλή. Αυτό σημαίνει ότι οι γαλβανικές άνοδοι χρησιμοποιούνται σε εδάφη χαμηλής αντίστασης (Baesmann et al., 1997).

Η απεικόνιση που ακολουθεί παρουσιάζει την άνοδο ψευδαργύρου και την κάθοδο χαλκού να βρίσκονται σε ένα ηλεκτρικά αγώγιμο ηλεκτρολύτη. Το ρεύμα μεταξύ τους επιταχύνει την διάβρωση της ανόδου όπου θυσιάζεται και θα πρέπει να αντικαθίσταται κατά περιόδους.



Εικόνα 32 : Η άνοδος και η κάθοδος σε ηλεκτρικά αγώγιμο ηλεκτρολύτη. (Αργυροπούλου, 2018, σελ 27)

Το μέγεθος της ανόδου επιλέγεται ανάλογα με την κατανάλωση του ρεύματος και τη διάρκεια ζωής του συστήματος σε σχέση με τον ηλεκτροχημικό παράγοντα. Οι μηχανικοί διάβρωσης έχουν αναπτύξει διάφορες μεθόδους για να υπολογίσουν την εκτιμώμενη έξοδο ρεύματος και στη συνέχεια την κανονική διάρκεια ζωής των γαλβανικών ανόδων. Για αυτήν την περίπτωση γίνεται χρήση εξισώσεων του Dwight και του Ohm για να επιτευχθεί ο υπολογισμός της αντίστασης της ανόδου στο διαβρωτικό περιβάλλον και ο εκτιμώμενος χρόνος ζωής της ανόδου. Έτσι, για να ακολουθηθεί το βήμα του σχηματισμού των ανόδων θα πρέπει να γνωρίζουμε την αντίσταση της ανόδου στο ηλεκτρολύτη και το ρεύμα που χρειάζεται για να επιτευχθεί η προστασία. (American Gas Association, 1986, σελ 47)

$$R = \frac{0.0626P}{L} \left[\log \frac{4L}{r} - 1 \right]$$

- R= η αντίσταση κυλινδρικής ανόδου (ohm)
- P= η αντίσταση του εδάφους (ohm-cm)
- L= το μήκος της ανόδου (inches)
- r= η ακτίνα της ανόδου (inches)

$$I = \frac{E}{R}$$

- I = το ρεύμα εξόδου (Amperes)
- E = το δυναμικό (Volt)
- R = η αντίσταση της ανόδου (ohm)

$$L = \frac{W * U * E}{CO * CR}$$

- L = η διάρκεια ζωής(χρόνια)
- W = το βάρος (lbs)
- U = συντελεστής χρησιμοποίησης
- E = αποδοτικότητα ανόδου
- CO = ρεύμα εξόδου (amperes)
- CR = κατανάλωση ανόδου(lbs per ampere-year)

Η προστασία της επιφάνειας μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της μέτρησης του δυναμικού σε σύγκριση με ένα κατάλληλο ηλεκτρόδιο αναφοράς που βρίσκεται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη. Ακολούθως, ενεργοποιείται η τροφοδοσία της ανόδου με ρεύμα στη κατασκευή έτσι ώστε να αυξηθεί το ηλεκτρολυτικό δυναμικό στους -0,85. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρολύτη το δυναμικό πόλωσης μπορεί να κυμανθεί από - 0,8 μέχρι -0,9. Ανάλογα με την τελική τιμή του δυναμικού θα βγει το συμπέρασμα αν το υλικό προστατεύεται από την καθοδική προστασία.

Επιπλέον, για να γνωρίζουμε το είδος, τον αριθμό και το μέγεθος των ανόδων χρειάζεται να γνωρίσουμε το απαιτούμενο ρεύμα. Ακόμη όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο σημείο ο τύπος την ανόδου καθορίζεται και από την αντίσταση του ηλεκτρολύτη.

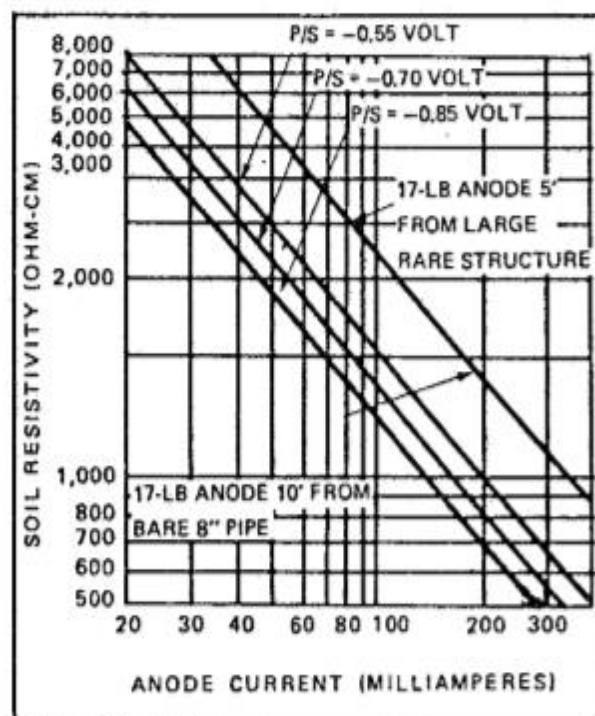
Οι γαλβανικές άνοδοι συνήθως κατασκευάζονται από μαγνήσιο ή ψευδάργυρο σε μορφή κυλίνδρων. Ένα λεπτό σύνθετο υλικό καλύπτει την επιφάνεια της ανόδου έτσι ώστε να αποτραπεί η πόλωση. Η άνοδος μαγνησίου χρησιμοποιείται ευρέως σε γαλβανικά συστήματα καθοδικής προστασίας. Η χρήση του είναι συχνή όταν η αντίσταση του ηλεκτρολύτη είναι μεγάλη (συνήθως μεγαλύτερη από 1000 ohms/ centimeter) ή όταν απαιτείται υψηλή φορτίο ρεύματος. (US Navy, 1974, σελ 4, 5, 17) Οι προσμίξεις στο κράμα μαγνησίου δεν πρέπει να ξεπερνούν τα παρακάτω ποσοστά:

Si: 0.1 %

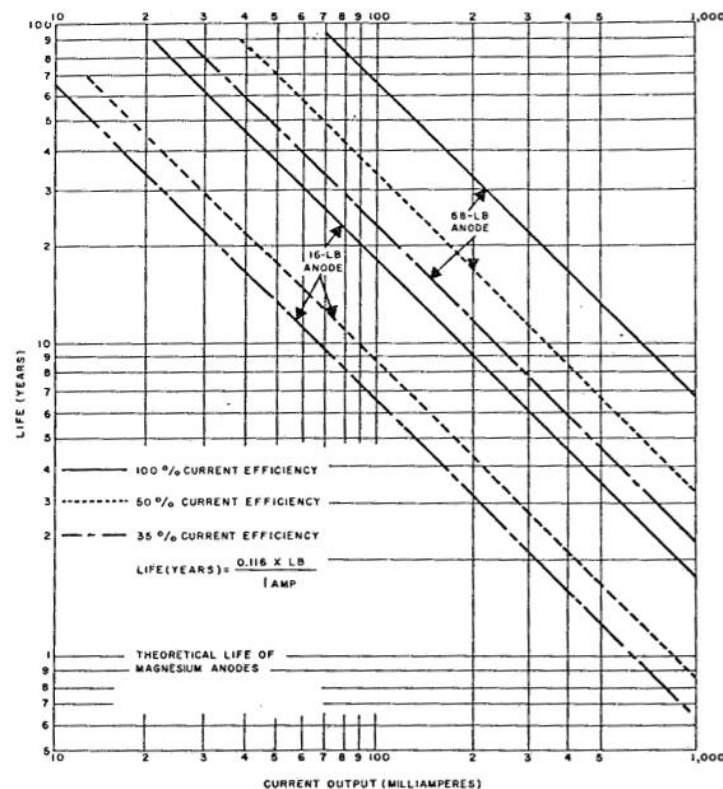
Cu: 0.02 %

Ni 0.002 %

Βασικό επίσης είναι επιλεγεί η κατάλληλη τοποθέτηση των ανόδων για να εξασφαλιστεί η ομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος κατά μήκος της μεταλλικής δομής. Η τοποθέτηση των ανόδων πρέπει να προτιμάται να πραγματοποιείται σε περιοχές με χαμηλή αντίσταση και πλησίον των σημείων όπου η διάβρωση είναι πιο έντονη. Η απόσταση των ανόδων με την υπό προστασία μεταλλική δομή θα πρέπει να είναι πάνω από 3 μέτρα και περισσότερο από 15 μέτρα από άλλη μεταλλική δομή. Η προτιμητέα επίσης τοποθέτηση των ανόδων μαγνησίου θα πρέπει να γίνει σε βάθος έτσι ώστε να βρίσκεται κάτω από τον πυθμένα της κατασκευής.



Εικόνα 33 : Καμπύλη απόδοσης για ανόδους μαγνησίου



Εικόνα 34 : Εκτίμηση χρόνου ζωής ανοδίων μαγνησίου σε σχέση με το απαιτούμενο ρεύμα προστασίας.
 (US Navy, 1974, σελ 4-5-18)

Τα θετικά της εφαρμογής γαλβανικών ανόδων (American Gas Association, 1986, σελ 46) είναι :

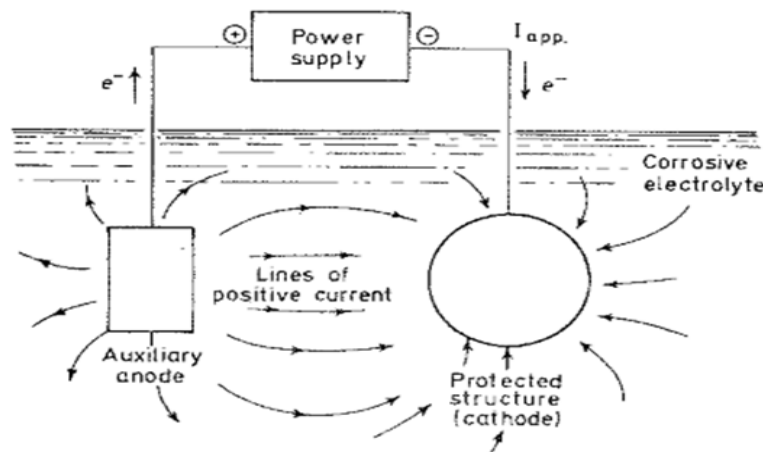
1. Το ρεύμα παράγεται από τον εαυτό του. Δεν απαιτούνται εξωτερικές πηγές ενέργειας με αυξανόμενο συνεχόμενο κόστος.
2. Ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης.
3. Σχετικά χαμηλό κόστος εγκατάστασης.
4. Ελάχιστα προβλήματα παρεμβολής εξαιτίας των χαμηλών επιπέδων ρεύματος που δημιουργούνται.

Αλλά εκτός από τα θετικά παρατηρούνται και ορισμένα προβλήματα (American Gas Association, 1986, σελ 46).

1. Περιορισμένες τάσεις προστασίας.
2. Μικρή ικανότητα εξόδου του ρεύματος
3. Κακή απόδοση σε περιβάλλον υψηλής αντίστασης

4.2 Καθοδική προστασία με επιβολή ρεύματος.

Η μέθοδος αυτή διαφέρει από την καθοδική προστασία με χρήση γαλβανικών ανόδων καθώς εκεί το ρεύμα που διαχέεται είναι αποτέλεσμα φυσικού δυναμικού μεταξύ της ανόδου και της προστατευμένης επιφάνειας. Η πυκνότητα του ρεύματος που απαιτείται εξαρτάται τόσο από το αν το υλικό είναι επικαλυμμένο και τόσο και από την αντίσταση του ηλεκτρολύτη. Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα τροφοδοτείται από εξωτερική πηγή και εφαρμόζεται μεταξύ της καθόδου (προστατευμένη δομή) και της ανόδου.

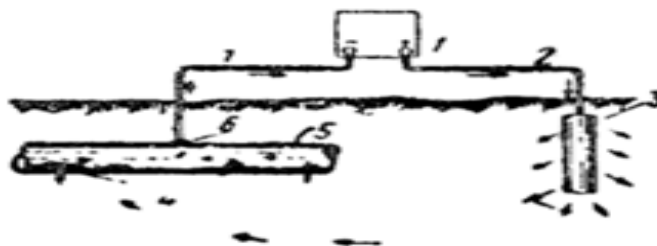


Εικόνα 35 : Το σύστημα της καθοδικής προστασίας με επιβολή ρεύματος.

Η πιο κοινή πηγή ενέργειας είναι οι μετασχηματιστές/ανορθωτές. Ο μετασχηματιστής/ανορθωτής μετατρέπει την ηλεκτρική ισχύ του εναλλασσόμενου ρεύματος σε ισχύ συνεχούς ρεύματος χαμηλής τάσης. Η διάβρωση γίνεται αντιληπτή στην περιοχή της ανόδου όπου ρεύμα περνάει από την μεταλλική δομή προς τον ηλεκτρολύτη (χώμα ή νερό). Εάν η προς προστασία επιφάνεια λειτουργήσει ως κάθοδος τότε ρεύμα διέρχεται από τον ηλεκτρολύτη στη μεταλλική επιφάνεια και η μεταλλική επιφάνεια με αυτόν τον τρόπο δεν διαβρώνεται. Δυο είδη τάσης υπάρχουν στο σύστημα, το δυναμικό της τροφοδοσίας, αλλά και το δυναμικό των δυο μετάλλων (άνοδος κάθοδος). Τα δύο αυτά δυναμικά πρέπει να είναι κατάλληλα για λειτουργήσει αποτελεσματικά η καθοδική προστασία. Στο ηλεκτρολυτικό διάλυμα δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια. Η ροή του ρεύματος πραγματοποιείται από τα ανιόντα και τα κατιόντα.

Όπως γίνεται αντιληπτό και στο παρακάτω σχήμα το ρεύμα ρέει από τον θετικό πόλο της πηγής (σημείο 1) μέσα από το μεταλλικό αντικείμενο (σημείο 2) ως που φτάνει στη γειωμένη άνοδο (άνοδος σε καλή επαφή με το έδαφος) και μετέπειτα στο χώμα. Έπειτα

μέσα από το έδαφος το ρεύμα ρέει μέσα από την επιφάνεια του μετάλλου σε σημεία που η μόνωση είναι ελαττωματική 4 και ρέει κατά μήκος της κατασκευής προς το σημείο σύνδεσης 6, έπειτα στο σημείο 7 και μετά πίσω στον αρνητικό πόλο της πηγής ρεύματος. Η καθοδική προστασία δεν εξαλείφει την διάβρωση, αλλά την μεταφέρει από την δομή που θέλουμε να προστατεύσουμε σε μια θυσιαζόμενη επιφάνεια που έχει τοποθετηθεί. Η θυσιαζόμενη επιφάνεια αναφέρεται συνήθως ως άνοδος (Pritula, 1953, σελ 5).

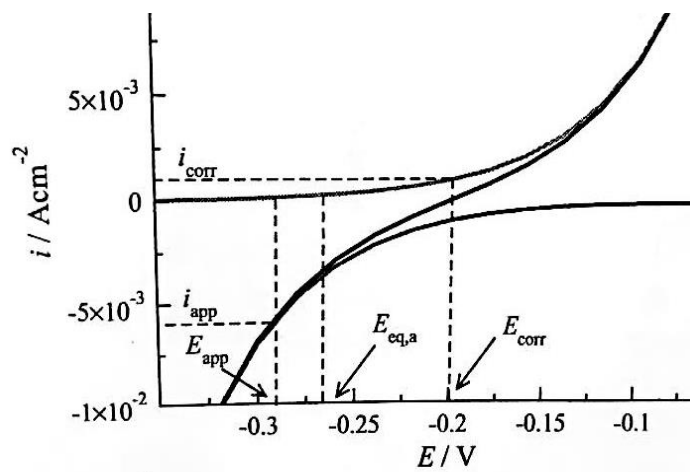


Εικόνα 36 : Η εφαρμογή της καθοδικής προστασίας στο έδαφος.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της καθοδικής προστασίας με επιβολή ρεύματος είναι:

1. Μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε μέταλλο ή κράμα σε διαβρωτικό περιβάλλον.
2. Ο ρυθμός διάβρωσης μπορεί να εκμηδενιστεί
3. Η προστασία μπορεί να διατηρηθεί επ' άπειρον
4. Αλλά το σημαντικό ίσως μειονέκτημα είναι ότι η προστασία με μεγάλο ποσό ρεύματος δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα.

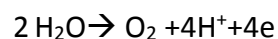
Όπως γνωρίζουμε, με την εμβάπτιση του μετάλλου σε διαβρωτικό περιβάλλον, το μέταλλο αποκτά δυναμικό E_{corr} και διαβρώνεται με ρυθμό i_{corr} . Σε αυτήν την περίπτωση αν εφαρμοστεί καθοδικό ρεύμα i_{app} το δυναμικό του μετάλλου γίνεται $E_{app} < E_{eq,a}$. Τέλος το μέταλλο υπό προστασία έχει μετατραπεί σε κάθοδος και το ανοδικό ρεύμα με την σειρά του έχει εκμηδενιστεί σε αντίθεση με το ανοδικό που είναι $i_{app} > i_{corr}$ (Καραντώνης, 2018).



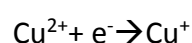
Εικόνα 37 : Καθοδική προστασία ενός μετάλλου με εφαρμογή ρεύματος i_{app} (Καραντώνης, 2018).

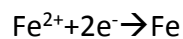
Το συνολικό ρεύμα που απαιτείται έτσι ώστε το δυναμικό του μετάλλου να μετατοπιστεί σε αρνητικότερο δυναμικό του $E_{eq,a}$ εξαρτάται από το εμβαδόν του μετάλλου που προστατεύεται. Προκειμένου να μειωθεί η ποσότητα του ρεύματος και έτσι να χαρακτηριστεί και πιο οικονομική η διαδικασία καθοδικής προστασίας είναι η επιφάνεια του μετάλλου να βαφεί ή να μονωθεί κατάλληλα. Στην περίπτωση αυτή το εμβαδόν είναι η επιφάνεια των μικροσκοπικών πόρων της βαφής ή της μόνωσης. Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η πιο οικονομικά συμφέρουσα αλλά και ταυτόχρονα πιο αποδοτική μέθοδο καθοδικής προστασίας είναι η καθοδική προστασία με επιβολή ρεύματος σε μέταλλο που είναι καλυμμένο με προστατευτική επίστρωση. Είναι φυσικό ότι όσο καλύτερη είναι η ποιότητα της επίστρωσης με βαφή ή μονωτικό υλικό τόσο μικρότερες είναι οι απαιτήσεις σε ρεύμα προστασίας.

Η επιτυχία του συστήματος της καθοδικής προστασίας επιβεβαιώνεται όταν γίνει αντιληπτό το δυναμικό μεταξύ του αγωγού και της γείωσης. Στην επιφάνεια της ανόδου πραγματοποιείται η οξείδωση του νερού (υγρασίας) που βρίσκεται στο έδαφος προς μοριακό οξυγόνο, σύμφωνα με την αντίδραση,



Στην μεταλλική επιφάνεια λαμβάνει χώρα η αναγωγή του οξυγόνου, σύμφωνα με την αντίδραση. Λόγω της καθοδικής προστασίας του σωλήνα, η αντίδραση της οξείδωσης του μετάλλου (πχ Cu, Fe) πρακτικά δεν πραγματοποιείται





Στην περίπτωση που εκτός από την κάθοδο και την άνοδο παραβρεθεί και ένα άλλο μεταλλικό υλικό (πχ σωλήνα) θα υπάρξει ηλεκτρική επαφή μεταξύ τους. Συνεπώς, ηλεκτρικό ρεύμα θα ρέει τόσο από την άνοδο προς την κάθοδο μέσω του εδάφους όσο και από την άνοδο προς την κάθοδο μέσω του μεταλλικού σωλήνα. Για να διασφαλιστεί η ηλεκτρική συνέχεια, η επιφάνεια του σωλήνα που βρίσκεται πλησίον της ανόδου θα προστατεύεται (θα συμπεριφέρεται ως κάθοδος), ενώ η επιφάνεια που βρίσκεται πλησίον της δεξαμενής θα διαβρώνεται (συμπεριφέρεται ως άνοδος), λόγω των διαφυγόντων ρευμάτων. Έτσι ώστε να βρεθεί λύση στο πρόβλημα των διαφυγόντων ρευμάτων θα πρέπει μια επιπλέον άνοδος να τοποθετηθεί συμμετρικά του σώματος που επιθυμούμε να προστατεύσουμε. Επίσης βραχυκυκλώνουμε το υλικό (αυτό που προστατεύουμε) με τον μεταλλικό σωλήνα, συνδέοντας τα με ένα μονωμένο μεταλλικό σύρμα. Τέλος το ρεύμα περνάει από το την άνοδο προς τη κάθοδο και έτσι μπορεί να διασφαλιστεί η προστασία του υλικού που επιθυμούμε να προστατεύσουμε αλλά και του σωλήνα (δρουν ως κάθοδος).

Μια απομακρυσμένη μεγάλη άνοδος έχει την δυνατότητα να δημιουργήσει μια ομοιόμορφη πυκνότητα ρεύματος στο έδαφος και έτσι μια ομοιόμορφη κλίση στο δυναμικό κατά μήκος του θαμμένου μεταλλικού υλικού. Όσο πιο απομακρυσμένη είναι η θαμμένη μεταλλική κατασκευή από την άνοδο τόσο το δυναμικό εξασθενεί. Η αποτελεσματική κατανομή του ρεύματος μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση πολλαπλών σημείων ανόρθωσης.

Τα θετικά της εφαρμογής επιβαλλόμενου ρεύματος είναι :

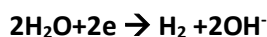
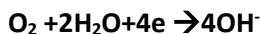
1. Δυνατότητα μεγάλου φορτίου ρεύματος χωρίς περιορισμούς
2. Η τάση και το ρεύμα εξόδου μπορούν να αλλάζουν έτσι ώστε να ανταπεξέρχονται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες.
3. Μεγάλη μεταλλική δομή μπορεί να προστατευτεί από μια μόνο εγκατάσταση.

Αλλά εκτός από τα θετικά παρατηρούνται και ορισμένα προβλήματα.

1. Σύνθετη σχεδίαση
2. Δυνατότητα πρόκλησης καθοδικών παρεμβολών
3. Απαιτεί ηλεκτρική συντήρηση και επιθεώρηση
4. Μπορεί να προκαλέσει έκκλιση υδρογόνου σε μέταλλα ή κράματα υψηλής αντοχής, καθώς και τοπικά εμφανιζόμενες περιοχές υπερπροστασίας που οφείλονται σε ανομοιογενή σύνθεση του ηλεκτρολύτη (παράδειγμα στο τσιμέντο). (Chang, 2002, σελ 662)
5. Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε επικίνδυνες τοποθεσίες (κίνδυνος φωτιάς ή έκρηξης σε περιοχές με εύφλεκτα υλικά και τάση μεγαλύτερη από 4V).

4.3 Επίδραση της καθοδικής δράσης στην καθοδική προστασία

Στην περίπτωση μετάλλου που είναι βαμμένο και βρίσκεται σε περιβάλλον νερού παρουσία οξυγόνου. Οι καθοδικές δράσεις στην επιφάνεια του μετάλλου είναι:



Τα πρότυπα δυναμικά ισορροπίας των δράσεων είναι $E^{\text{O}_2/\text{OH}^-} = 0.401 \text{ V}$ $E^{\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2} = -0.8277 \text{ V}$.

Όπως γνωρίζουμε αν $E_{\text{app}} < E_{\text{eq,a}} < E_{\text{corr}}$, το μέταλλο προστατεύεται καθώς μειώνεται πλήρως ο ρυθμός ανοδικής δράσης. Από την άλλη αν $E_{\text{app}} < E_{\text{eq,H}_2\text{O}/\text{H}_2}$, υπάρχει προστασία αλλά η αναγωγή νερού έχει ως αποτέλεσμα την έκλυση υδρογόνου εντός των πόρων της βαφής. Σαν αποτέλεσμα της έκλυσης των φυσαλίδων του υδρογόνου, οι πόροι μπορούν να διανοιχτούν και η βαφή να αποκολλήσει. (Καραντώνης, 2018, σελ 27)

4.4 Ηλεκτρικές μετρήσεις για τον έλεγχο της καθοδικής προστασίας

Οι βασικές μετρήσεις που πραγματοποιούμε για τον έλεγχο της διάβρωσης είναι το DC δυναμικό (E) μετρούμενο σε volts, το ρεύμα (I) μετρούμενο σε amperes και η αντίσταση (R) μετρούμενη σε ohms (American Gas Association, 1986, σελ 19) (Baecmann et al., 1997, σελ 79).

Δυναμικό

Η τάση είναι μέτρο της ηλεκτρικής δύναμης που προκαλεί την ροή ρεύματος μέσω ενός κυκλώματος. Η μονάδα μέτρησης είναι το volt και μετριέται με την χρήση ενός βολτόμετρου.

Ένα απλό βολτόμετρο αποτελείται από ένα αμπερόμετρο συνδεδεμένο σε σειρά με την αντίσταση. Η αντίσταση επιτρέπει να ρέει μόνο μια μικρή ποσότητα ρεύματος μέσω του μετρητή. Ένα βολτόμετρο συνδέεται παράλληλα με το κύκλωμα που δοκιμάζεται. Οι τρεις αυτές μεταβλητές συνδέονται με τον νόμο του Ohm ο οποίος δηλώνει ότι η τάση είναι άμεσα ανάλογη με τον ρεύμα και την αντίσταση $E = I * R$. Το ηλεκτρολυτικό δυναμικό είναι η τάση που υπάρχει μεταξύ μιας μεταλλικής δομής σε διαβρωτικό περιβάλλον και ενός ηλεκτροδίου αναφοράς τοποθετημένο στο ίδιο διαβρωτικό περιβάλλον. Για την αποφυγή σφαλμάτων που προκαλούνται από την αντίσταση επαφής των ηλεκτροδίων, χρησιμοποιούνται όργανα συνεχούς ρεύματος. Η ηλεκτρική επαφή με

την μεταλλική δομή μπορεί να γίνει μέσω συνδετήρα σύνδεσης ή απευθείας ή ακόμα μέσω ράβδου ανίχνευσης.

Ρεύμα

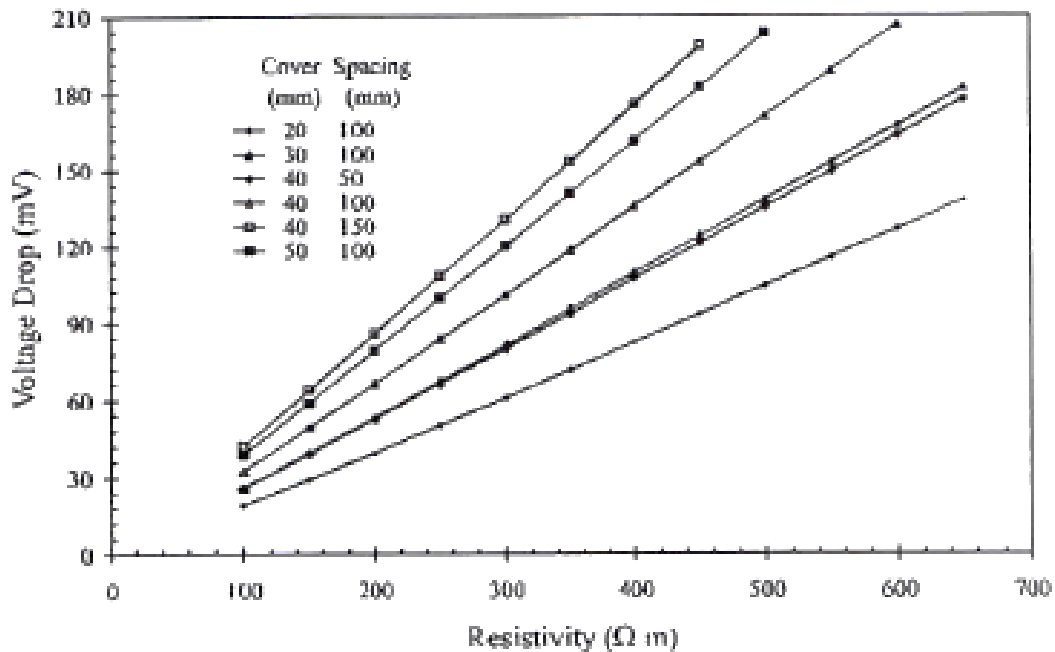
Το ρεύμα μετριέται σε amperes. Η μέτρηση του ρεύματος που προστατεύει τη κατασκευή πραγματοποιείται συνήθως στο σημείο σύνδεσης της κατασκευής με την/τις ανόδους. Το συνεχές ρεύμα που ρέει ένα μακρύ σε μήκος αγωγό αναφέρεται ως ρεύμα γραμμής και μπορεί να μας πληροφορήσει για τη ροή του ρεύματος στο μήκος ενός αγωγού αρκετών χιλιομέτρων. Δεν είναι εύκολο να μετρηθεί το ρεύμα γραμμής, επομένως συχνά υπολογίζεται από μετρήσεις της πτώσης της τάσης E μεταξύ δύο σημείων στον αγωγό. Χρησιμοποιώντας μια γνωστή αντίσταση R του σωλήνα μεταξύ αυτών των σημείων είναι δυνατόν να υπολογίσουμε την πτώση τάσης μεταξύ αυτών και τελικά το ρεύμα χρησιμοποιώντας το νόμο του Ohm που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Αντίσταση

Η αντίσταση μετριέται σε ohm. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι μέθοδοι για τον προσδιορισμό της ηλεκτρικής αντίστασης. Η απλή συσκευή μετρήσεως της αντίστασης είναι ο ohmmeter, ο οποίος μετρά την αντίσταση περνώντας ένα εξωτερικό ρεύμα συνεχούς ρεύματος διαμέσου της αντίστασης που μετριέται. Ο μετρητής δείχνει την αντίσταση σε ohm ως συνάρτηση της ροής ρεύματος. Αν ο μετρητής χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της αντίστασης των ηλεκτρικών εξαρτημάτων, δεν πρέπει ποτέ να χρησιμοποιείται σε ένα κύκλωμα όταν υπάρχει ηλεκτρική τάση. Για το λόγο αυτό, οι μετρήσεις αντίστασης για τον έλεγχο της διάβρωσης συνήθως γίνονται με τη χρήση οργάνων τύπου γέφυρας AC ή με τη μέτρηση της τάσης και του ρεύματος που ρέει στο κύκλωμα και στην συνέχεια τον υπολογισμό της αντίστασης χρησιμοποιώντας το νόμο του Ohm.

Η ειδική αντίσταση ενός ηλεκτρολύτη είναι ένα μέτρο της ικανότητάς αυτού να μετατρέψει την ηλεκτρική ενέργεια. Με άλλα λόγια, όσο χαμηλότερη είναι η ειδική αντίσταση, τόσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητα του ηλεκτρολύτη να μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια.

Στο σκυρόδεμα, όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα, η αύξηση της ειδικής αντίστασης, της επικάλυψης του σκυροδέματος και της απόστασης μεταξύ των ράβδων του οπλισμού αυξάνει το ρυθμό πτώσης στην τάση (Hassanein et al., 2002, σελ 164).



Εικόνα 38 : Η πτώση της τάσης σε σχέση με την ειδική αντίσταση, την απόσταση των ράβδων και το βάθος της επικάλυψης του σκυροδέματος.

Η συχνότητα λειτουργικών ελέγχων αναγράφεται στον πίνακα 4 στην συνέχεια.

Πίνακας 4 : Συχνότητα των λειτουργικών ελέγχων

Functional check	Frequency
Galvanic anode stations	Annually or more frequently if required by operational conditions
Impressed current station	Every 3 months or more frequently if required by operational conditions
Drainage stations	Every month or more frequently if stray current is severe
Connections to foreign structures	Annually or more frequently if required by operational conditions
d.c. decoupling devices and earthing systems	Annually or more frequently if required by operational conditions
Safety and protection devices	Annually or more frequently if required by operational conditions
Test stations	Annually at selected locations and every three years at all locations (see 10.3.3.2)

Ο παρακάτω πίνακας 5 παρουσιάζει τις τιμές του δυναμικού διάβρωσης, του δυναμικού προστασίας και του δυναμικού υπέρ-προστασίας διαφόρων τύπων μετάλλων στο έδαφος, στην ατμόσφαιρα και σε θαλασσινό νερό, σύμφωνα με το BS EN 12954: 2001 (British Standards, 2001).

Πίνακας 5 : Free corrosion potentials, protection potentials and limiting critical potential of some common metals in soil and in fresh and salt water

Metal or metal alloy	Medium	Free corrosion potential: E_a (without cell formation) Indicative value V	Protection potential: E_p V	Limiting critical potential: E_c V	
Non alloy and low alloy Fe materials with yield strength $\leq 800 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$	Water and soil aerobic conditions	Normal condition $T < 40^\circ\text{C}$	-0,65 to -0,40	-0,85 ^a	-
		$T > 60^\circ\text{C}$	-0,80 to -0,50	-0,95 ^a	^b
		Aerated sandy soil $100 < \rho < 1000 \Omega\cdot\text{m}$	-0,50 to -0,30	-0,75	-
		Aerated sandy soil $\rho > 1000 \Omega\cdot\text{m}$	-0,40 to -0,20	-0,65	-
	Water and soil anaerobic conditions		-0,80 to -0,65	-0,95	-
Ferritic or austenitic stainless steels with yield strength $< 800 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$	Neutral and alkaline fresh water and soil	at ambient temperatures	- 0,10 to + 0,20	- 0,45	-
	Acid fresh water and soil	at ambient temperatures	- 0,10 to + 0,20	^c	^c
	Sea and brackish water	at ambient temperatures	- 0,10 to + 0,20	- 0,45	-
Ferritic or austenitic stainless steels with yield strength $< 800 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ with $\geq 16\% \text{ Cr}$	Neutral and alkaline fresh water and soil	at ambient temperatures	- 0,10 to + 0,20	- 0,20	-
Ferritic/martensitic stainless steels with yield strength $> 800 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$	Water	at ambient temperatures	- 0,10 to + 0,20	- 0,45	^c
Copper, cupronickel alloys	Water and soil		- 0,20 to $\pm 0,00$	- 0,20	-
Lead	Water and soil		- 0,60 to - 0,40	- 0,85	- 0,95
Aluminium alloys ^d	Fresh water		- 0,70 to - 0,50	-0,80	-1,15 ^e
	Sea and brackish water		- 0,80 to - 0,50	-0,90	-1,15 ^e
Steel in concrete	Water and soil ^f		- 0,60 to - 0,10	- 0,75	^g
Galvanized steel	Water and soil		- 1,10 to - 0,90	- 1,20	-
NOTE 1 All potentials are IR free and refer to a copper/saturated copper sulphate reference electrode. $E_{Cu} = E_H - 0,32 \text{ V}$.					
NOTE 2 During the lifetime of the structure any possible changes of resistivity of the medium around the structure are to be taken into account. For high strength steels there is a risk of hydrogen embrittlement when the potential is more negative than the start of hydrogen evolution.					
^a For temperatures $40^\circ\text{C} \leq T \leq 60^\circ\text{C}$ the protection potential may be interpolated.					
^b The risk of NaOH-induced stress corrosion cracking increases with increase of temperature.					
^c Protection potential should be determined by testing in each single case as well as the limiting critical potential for ferritic and martensitic stainless steels					
^d These values are only valid for aluminium alloys without Zn and Cu (e.g. AlMgSi-alloys). For all other aluminium alloys the protection potential may be different.					
^e Corrosion risk in stagnant conditions because of alkalinity caused by cathodic protection which dissolves the passive layer.					
^f For structures in the air in accordance with EN 12696					
^g Limiting critical potential should be determined by testing in each single case for pre- and post-tensioned steels with yield strength $> 700 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. In any case, potentials lower than -1,1 V should be considered dangerous.					

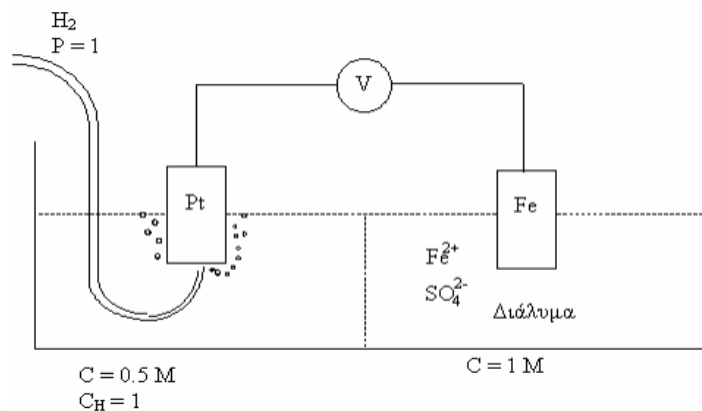
4.5 Ηλεκτρόδιο αναφοράς

Τα ηλεκτρόδια αναφοράς χρησιμοποιούνται για την μέτρηση των δυναμικών ημιστοιχείων. Τα ηλεκτρόδια αναφοράς μπορεί να είναι φορητές συσκευές ή μόνιμα ενσωματωμένοι ανιχνευτές στη κατασκευή. Τα ηλεκτρόδια αναφοράς εγκαθίσταται σε κρίσιμες θέσεις για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος, όπου ο έλεγχος διάβρωσης είναι κρίσιμος .

Δεν υπάρχει τρόπος να μετρηθεί το δυναμικό ενός μόνο ηλεκτροδίου, η μέθοδος που εφαρμόζεται για το υπολογισμό των κανονικών δυναμικών των ηλεκτροδίων είναι η χρησιμοποίηση ενός ηλεκτροδίου ως ηλεκτρόδιο αναφοράς, με συμβατικά προκαθορισμένη τιμή, και η μέτρηση της ΗΕΔ (Ηλεκτρεγερτική Δύναμη) στοιχείων που αποτελούνται από το ηλεκτρόδιο αναφοράς και το προς μέτρηση ηλεκτρόδιο. Ως ηλεκτρόδιο αναφοράς έχει ληφθεί το ηλεκτρόδιο υδρογόνου (Π.Η.Υ – SHE, Standard Hydrogen Electrode – NWE Normal Wasserstoff Elektrode). Στο ηλεκτρόδιο αυτό η ΗΕΔ εκ παραδοχής ισούται με μηδέν, επομένως η όποια αριθμητική τιμή προκύπτει στο στοιχείο που σχηματίζεται, με το προς μέτρηση ηλεκτρόδιο (με ενεργότητα του ηλεκτρολυτικού διαλύματος ίση με 1) αυτή είναι και η τιμή του δυναμικού του ηλεκτροδίου το οποίο ονομάζεται κανονικό δυναμικό (E^*). Κατά τον σχηματισμό ενός γαλβανικού στοιχείου, για την αυθόρμητη λειτουργία του, το ηλεκτρόδιο υδρογόνου μπορεί να είναι είτε το δεξί, είτε το αριστερό ανάλογα με την αναγωγική ή οξειδωτική τάση του άλλου ηλεκτροδίου.

Πιο συγκεκριμένα, το Π.Η.Υ. αποτελείται από επιπλατινωμένο πλακίδιο Pt βυθισμένο σε διάλυμα με συγκέντρωση H^+ ίση με 1N στο οποίο διοχετεύεται υδρογόνο πίεσης μιας ατμόσφαιρας. Το δυναμικό του Π.Η.Υ. θεωρείται συμβατικά ίσο με μηδέν $E_H = 0$ (αντιστοιχεί στη δράση $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$). Οι μετρήσεις του δυναμικού κάθε ηλεκτροδίου καθορίζονται ανάλογα από το ηλεκτρόδιο του υδρογόνου.

Στο Σχήμα 39 φαίνεται η διαμόρφωση γαλβανικού στοιχείου με ηλεκτρόδιο αναφοράς το Π.Η.Υ. και ηλεκτρόδιο Fe/Fe^{2+} . (Υφαντής, 2000, σελ 25)



Εικόνα 39 : Διαμόρφωση γαλβανικού στοιχείου με ηλεκτρόδιο αναφοράς το Π.Η.Υ. και Fe/Fe²⁺.

Το δεύτερο ηλεκτρόδιο είναι το $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e$ όπου η συγκέντρωση των ιόντων του σιδήρου είναι ίση με τη μονάδα. Στην περίπτωση αυτή το ηλεκτρόδιο του υδρογόνου παίρνει το μέρος της καθόδου και το ηλεκτρόδιο του Fe της ανόδου. Το δυναμικό του ηλεκτροδίου του Fe/ Fe²⁺ κατά σύμβαση θεωρείται αρνητικό και ίσο με -0.441 Volt. Επειδή το ηλεκτρόδιο του υδρογόνου είναι δύσχρηστο στην πράξη χρησιμοποιούνται διάφορα άλλα ηλεκτρόδια αναφοράς.

Στον Πίνακα 6 που ακολουθεί δίνονται οι τιμές των κανονικών δυναμικών. Οι τιμές αυτές αποτελούν τα κανονικά δυναμικά αναγωγής, δηλαδή δυναμικά σε πρότυπες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας). Σύμφωνα με την παραδοχή που έχει υιοθετηθεί από την IUPAC οι ημιαντιδράσεις σημειώνονται πάντα ως αντιδράσεις αναγωγής. Η διατύπωση αυτή προϋποθέτει ότι η τιμή E* του ηλεκτροδίου, είναι η ΗΕΔ ενός στοιχείου, στο οποίο κάθοδος (δεξιά) είναι το αναφερόμενο ηλεκτρόδιο και άνοδος (αριστερά) το ηλεκτρόδιο υδρογόνου.

Πίνακας 6 : Κανονικά δυναμικά ηλεκτροδίων

Ηλεκτρόδιο	Αντίδραση ηλεκτροδίου	E* (V)
Li Li ⁺	Li ⁺ + e ⁻ ⇌ Li	-3.045
Pt Ca Ca(OH) ₂ OH ⁻	Ca(OH) ₂ + 2e ⁻ ⇌ 2OH ⁻ + Ca	-3.03
K K ⁺	K ⁺ + e ⁻ ⇌ K	-2.925
Cs Cs ⁺	Cs ⁺ + e ⁻ ⇌ Cs	-2.923
Ba Ba ²⁺	Ba ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Ba	-2.90
Ca Ca ²⁺	Ca ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Ca	-2.87
Na Na ⁺	Na ⁺ + e ⁻ ⇌ Na	-2.714
Mg Mg ²⁺	Mg ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Mg	-2.37
Al Al ³⁺	Al ³⁺ + 3e ⁻ ⇌ Al	-1.66
Pt H ₂ PO ₂ ⁻ , HPO ₃ ²⁻ , OH ⁻	HPO ₃ ²⁻ + 2H ₂ O + 2e ⁻ ⇌ H ₂ PO ₂ ⁻ + 3OH ⁻	-1.65
Zn ZnO ₂ ²⁻ , OH ⁻	ZnO ₂ ²⁻ + 2H ₂ O + 2e ⁻ ⇌ Zn + 4OH ⁻	-1.216
Pt SO ₃ ²⁻ , SO ₄ ²⁻ , OH ⁻	SO ₄ ²⁻ + H ₂ O + 2e ⁻ ⇌ SO ₃ ²⁻ + 2OH ⁻	-0.93
Pt H ₂ , OH ⁻	2H ₂ O + 2e ⁻ ⇌ H ₂ + 2OH ⁻	-0.828
Zn Zn ²⁺	Zn ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Zn	-0.763
Ni Ni(OH) ₂ OH ⁻	Ni(OH) ₂ + 2e ⁻ ⇌ Ni + 2OH ⁻	-0.72
Pb PbCO ₃ CO ₃ ²⁻	PbCO ₃ + 2e ⁻ ⇌ Pb + CO ₃ ²⁻	-0.506
Fe Fe ²⁺	Fe ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Fe	-0.440
Cd Cd ²⁺	Cd ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Cd	-0.403
Sn Sn ²⁺	Sn ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Sn	-0.136
Pb Pb ²⁺	Pb ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Pb	-0.126
Fe Fe ³⁺	Fe ³⁺ + 3e ⁻ ⇌ Fe	-0.036
Pt D ₂ , D ⁺	2D ⁺ + 2e ⁻ ⇌ D ₂	-0.0034
Pt H ₂ , H ⁺	2H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ H ₂	0.000
Pt Sn ²⁺ , Sn ⁴⁺	Sn ⁴⁺ + 2e ⁻ ⇌ Sn ²⁺	+0.15
Pt Cu ⁺ , Cu ²⁺	Cu ²⁺ + e ⁻ ⇌ Cu ⁺	+0.153
Pt S ₂ O ₃ ²⁻ , S ₄ O ₆ ²⁻	S ₄ O ₆ ²⁻ + 2e ⁻ ⇌ S ₂ O ₃ ²⁻	+0.17
Cu Cu ²⁺	Cu ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Cu	+0.337
Pt I ₂ I ⁻	I ₂ + 2e ⁻ ⇌ 2I ⁻	+0.5355
Pt Fe(CN) ₆ ⁴⁻ , Fe(CN) ₆ ³⁻	Fe(CN) ₆ ³⁺ + e ⁻ ⇌ Fe(CN) ₆ ⁴⁻	+0.69
Pt Fe ²⁺ , Fe ³⁺	Fe ³⁺ + e ⁻ ⇌ Fe ²⁺	+0.771
Ag Ag ⁺	Ag ⁺ + e ⁻ ⇌ Ag	+0.7991
Hg Hg ²⁺	Hg ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Hg	+0.854
Pt OH ⁻ , HO ₂ ⁻	HO ₂ ⁻ + H ₂ O + 2e ⁻ ⇌ 3OH ⁻	+0.88
Pt Hg ₂ ²⁺ , Hg ²⁺	2Hg ²⁺ + 2e ⁻ ⇌ Hg ₂ ²⁺	+0.92
Pt Br ₂ , Br ⁻	Br ₂ + 2e ⁻ ⇌ 2Br ⁻	+1.0652
Pt MnO ₂ Mn ²⁺ , H ⁺	MnO ₂ + 4H ⁺ + 2e ⁻ ⇌ Mn ²⁺ + 2H ₂ O	+1.23
Pt Cr ³⁺ , Cr ₂ O ₇ ²⁻ , H ⁺	Cr ₂ O ₇ ²⁻ + 14H ⁺ + 6e ⁻ ⇌ 2Cr ³⁺ + 7H ₂ O	+1.33
Pt Cl ₂ , Cl ⁻	Cl ₂ + 2e ⁻ ⇌ 2Cl ⁻	+1.3595
Pt Ce ³⁺ , Ce ⁴⁺	Ce ⁴⁺ + e ⁻ ⇌ Ce ³⁺	+1.61
Pt Co ²⁺ , Co ³⁺	Co ³⁺ + e ⁻ ⇌ Co ²⁺	+1.82
Pt SO ₄ ²⁻ , S ₂ O ₈ ²⁻	S ₂ O ₈ ²⁻ + 2e ⁻ ⇌ 2SO ₄ ²⁻	+1.98

Το συνηθέστερο ενσωματωμένο ηλεκτρόδιο αναφοράς για κατασκευές από σκυρόδεμα είναι το Ag/AgCl. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/ClAg συχνή είναι η χρήση του σε εργαστήρια, σε θαλασσινό νερό και απαραίτητη είναι η προστασία του από το φως. Γενικότερα, τα ηλεκτρόδια αναφοράς μετά την χρήση τους σε θαλασσινό νερό απαιτούν συντήρηση διότι χλωρίοντα είναι πιθανών να έχουν εισχωρήσει και ως συνέπεια το δυναμικό του να έχει μεταβληθεί. Από ένα τέτοιο πρόβλημα είναι απαλλαγμένο το ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl. Άλλη επιλογή ηλεκτροδίου αναφοράς είναι η άνοδος υψηλής καθαρότητας ψευδαργύρου. Αν ένα μικρό ρεύμα περάσει μεταξύ της δομής και του ηλεκτροδίου, η επιφάνεια του ψευδαργύρου θα παραμείνει φρέσκια και μη αφυδατωμένη, χωρίς προβλήματα πόλωσης. Τέλος ένα ηλεκτρόδιο ευρείας χρήσης λόγω του ότι είναι οικονομικό και εύκολο στη συντήρηση και λειτουργία του είναι αυτό του Cu/CuSO₄ (καλομέλινα). Το ηλεκτρόδιο αποτελείται από ένα κομμάτι χαλκού

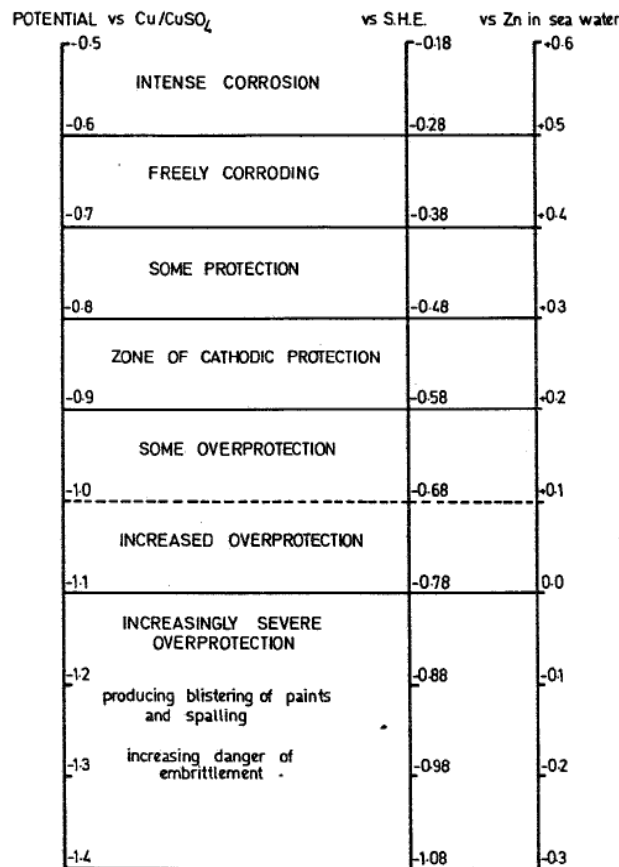
εμβαπτισμένο σε κορεσμένο διάλυμα θειικού χαλκού. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς καλομέλανα είναι συχνό στο έδαφος.

Η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων αναφοράς σε μια κατασκευή θα είναι διαφορετική για τα θυσιαζόμενα και τα επιβαλλόμενα με εξωτερικό ρεύμα συστήματα. Όταν η προστασία είναι από θυσιαζόμενες ανόδους, η παρακολούθηση σχεδιάζεται έτσι ώστε να ανιχνεύει την περιοχή όπου υπάρχει κίνδυνος διάβρωσης. Από την άλλη όταν το σύστημα χρησιμοποιεί ρεύμα, ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της προστασίας και για να ελέγχουν την ένταση του ρεύματος.

Το ηλεκτρόδιο αναφοράς θα πρέπει να έχει ξεχωριστό σημείο ηλεκτρικής επαφής έτσι ώστε να μπορεί να μετρηθεί το δυναμικό. Για μεγαλύτερη διευκόλυνση του συστήματος, το καλώδιο που φέρει το ηλεκτρόδιο αναφοράς και τα καλώδια της επαφής με τη κατασκευή πρέπει να τερματίζονται σε κλειψύδρα στον μετασχηματιστή/ανορθωτή.

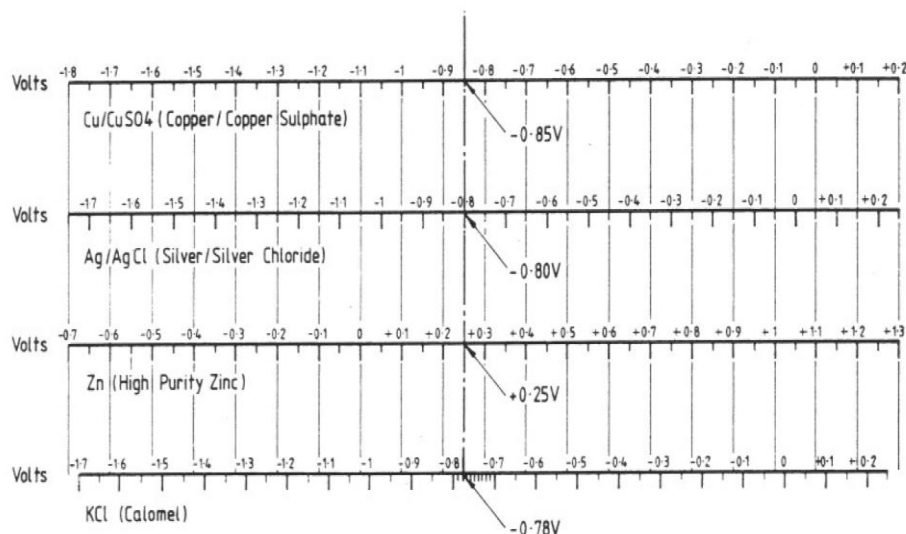
4.6 Επιβεβαίωση προστασίας

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα προηγουμένως, η κατάλληλη ένδειξη για την αποτελεσματικότητα της προστασίας είναι το δυναμικό σε κάθε τμήμα της διατομής του μετάλλου σε σχέση με το ηλεκτρόδιο αναφοράς. Στο σχήμα στην συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η σχέση μεταξύ του δυναμικού του χάλυβα και τη πιθανότητα διάβρωσης ή καθοδικής προστασίας αυτού. Για να επιτευχθεί η πλήρη προστασία στη διάβρωση του χάλυβα σε ατμόσφαιρα $-0,85$ V είναι η συνιστούμενη τιμή χρησιμοποιώντας Cu/CuSO₄ ως ηλεκτρόδιο αναφοράς. Για την πλήρη προστασία από τη διάβρωση λόγω μικροβίων που παρευρίσκονται στην ατμόσφαιρα συνίσταται ένδειξη $-0,95$ V.



Εικόνα 40 : Η σχέση μεταξύ E και της πιθανότητας διάβρωσης και καθοδικής προστασίας του χάλυβα.(Ashworth and Booker, 1986, σελ28)

Τα στοιχεία προηγουμένως του δυναμικού ισχύουν με την χρήση καλομέλινα ως ηλεκτρόδιο αναφοράς. Μέσω της χρήσης του επόμενου σήματος 41 μπορεί να γίνει συσχέτιση των παραπάνω τιμών με τις τιμές που θα ίσχυαν κάνοντας χρήση ως ηλεκτρόδιο αναφοράς το Ag/AgCl και το ηλεκτρόδιο του ψευδαργύρου.



Εικόνα 41 : Σύγκριση των δυναμικών χρησιμοποιώντας Cu/CuSO₄, Ag/AgCl και Zn.(British Standards, 2000)

5. Αρχή Λειτουργίας STOPCOR

Στην συνέχεια, θα παρουσιαστεί αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού (STOPCOR) σύμφωνα με τον κατασκευαστή. (www.Stopcor.gr)

Η αρχή λειτουργίας του STOPCOR βασίζεται στο θυσιαζόμενο ανόδιο μαγνησίου, το οποίο με την σειρά του επιφορτίζει αρνητικά την εγκατάσταση που επιδιώκουμε να προστατεύσουμε. Έτσι με αυτόν τον τρόπο ενώ η εγκατάσταση πριν λειτουργούσε ως άνοδος μετατρέπεται σε κάθοδο από όπου και προστατεύεται.



Πιο συγκεκριμένα, το ανόδιο μαγνησίου που περιέχεται στον εξοπλισμό του STOPCOR είναι πιο ηλεκτροθετικό από τη μεταλλική επιφάνεια που επιδιώκεται να προστατευθεί. Καθώς συνδέεται και με τη γείωση, παράγεται μία τάση της τάξεως του -1,2 Volt, η οποία επιβάλλεται στη μεταλλική εγκατάσταση. Με αυτόν τον τρόπο, καταργείται το οξειδωτικό περιβάλλον και δημιουργείται αναγωγικό περιβάλλον, το οποίο επιβραδύνει σε μεγάλο βαθμό ή και αποτρέπει ολοκληρωτικά σε πολλές περιπτώσεις τα δύο φαινόμενα, της ηλεκτρολυτικής διάβρωσης και της χημικής οξείδωσης. Με την αναπαραγωγή του αναγωγικού ρεύματος, το ανόδιο μαγνησίου που περιέχεται στη συσκευή σταδιακά φθείρεται και χρειάζεται αντικατάσταση μετά από κάποιο χρονικό διάστημα (τρία ή περισσότερα χρόνια σύμφωνα με τον κατασκευαστή), ανάλογα με την ένταση των ηλεκτρολυτικών φαινομένων της κάθε εφαρμογής.

Στην σημερινή εποχή η αντιδιαβρωτική προστασία μεταλλικών κατασκευών είναι αρκετά σημαντική, καθώς μπορεί και να εξαρτάται η λειτουργία επιχειρήσεων ή και πολλές φορές ακόμα και η ασφάλεια όσων ζουν ή εργάζονται εκεί. Με αυτόν τον τρόπο είναι απαραίτητο να υπάρχουν τρόποι για να μπορεί κανείς να ελέγχει ότι πράγματι η εγκατάσταση είναι προστατευμένη και ότι τα φαινόμενα διάβρωσης έχουν εξαλειφθεί.

Οι κυριότεροι και συνηθέστεροι τρόποι για να ελέγξει κανείς πρακτικά την απόδοση των συσκευών STOPCOR είναι οι εξής:

A. Η μέτρηση της ηλεκτρολυτικής τάσης

Αρχικά με ένα ψηφιακό μιλιβολτόμετρο μετράμε την διαφορά δυναμικού μεταξύ ενός σημείου της υπό προστασία κατασκευής και της γείωσης, συνδέοντας το θετικό ακροδέκτη στη κατασκευή και τον αρνητικό στη γείωση. Μεγάλη προσοχή θα πρέπει να δοθεί έτσι ώστε να μην χρησιμοποιηθεί ως γείωση η ηλεκτρική γείωση ενός μηχανήματος ή του κτιρίου. Η γείωση που χρειαζόμαστε είναι ένα μέταλλο σφηνωμένο στο έδαφος σε σημείο όπου παρουσιάζεται αντίσταση εδάφους.

Η συνηθισμένη ηλεκτρική τάση που μετράει το όργανο κυμαίνεται μεταξύ των τιμών +0,5V και -0,5V. Όσο μεγαλύτερη είναι η διακύμανση, τόσο πιο έντονο είναι το πρόβλημα της ηλεκτρόλυσης και τόσο πιο γρήγορα προχωράει η διάβρωση της εγκατάστασης. Επίσης, η θετική τάση δηλώνει πιο έντονο πρόβλημα ηλεκτρόλυσης, ενώ η αρνητική τάση δηλώνει λιγότερο έντονο πρόβλημα, επειδή προφανώς κάποιο άλλο μέταλλο της κατασκευής μας τυχαίνει να λειτουργεί ως άνοδος και να προστατεύει μερικώς το μέταλλο που μετρήσαμε.

Δέκα λεπτά μετά την τοποθέτηση της συσκευής STOPCOR πραγματοποιούμε ακριβώς την ίδια μέτρηση και διαπιστώνουμε ότι η ηλεκτρική τάση έχει σταθεροποιηθεί σε μία αρνητική τιμή που συνήθως βρίσκεται μεταξύ των τιμών -1V και -1,7V. Το γεγονός ότι η τάση δεν παρουσιάζει πλέον διακύμανση οφείλεται στο ότι το ανόδιο μαγνησίου της συσκευής, επειδή είναι πιο δραστικό από τα άλλα μέταλλα που συμμετέχουν στο κύκλωμα, «επέβαλε» τη δική του τάση και άρα έχει σταματήσει η ηλεκτρολυτική διάβρωση των υπόλοιπων μετάλλων. Σε κάποιες περιπτώσεις η σταθεροποίηση της τάσης δεν συμβαίνει τόσο γρήγορα. Στην πιο ακραία περίπτωση πρέπει να περάσουν 14 μέρες.

B. Το οπτικό αποτέλεσμα

Σε περιπτώσεις δικτύων ύδρευσης, πυρόσβεσης, θέρμανσης κτλ. όπου το νερό είναι χρωματισμένο εξαιτίας της σκουριάς, θα παρατηρηθεί αύξηση του φαινομένου τον πρώτο καιρό και στη συνέχεια μείωση έως κατάργησή του, καθώς θα ξεπλένεται το δίκτυο και θα απομακρύνεται και η παλιά σκουριά από τις σωληνώσεις.

Γ. Έλεγχος σε βάθος χρόνου

Αν, για παράδειγμα, η εμπειρία λέει ότι μέσα σε κάθε εξάμηνο είχαμε κατά μέσο όρο πέντε σημεία που παρουσίαζαν διάβρωση και έχρηζαν επισκευής μέσα στην εγκατάστασή μας και διαπιστωθεί ότι μέσα σε ένα εξάμηνο από την εγκατάσταση των συσκευών STOPCOR δεν παρουσιάστηκε άλλο κρούσμα διάβρωσης, αυτό αποτελεί απόδειξη ότι οι συσκευές αποδίδουν το προστατευτικό έργο για το οποίο εγκαταστάθηκαν.

Δ. Ανόδιο μαγνησίου

Η άνοδος μαγνησίου, συγκριτικά με έναν ανορθωτή, μπορεί να διανέμει ρεύμα πολύ πιο εύκολα, δεδομένου ότι περιέχεται σε μικρές συσκευασίες (STOPCOR), όπου είναι εύκολες στην διαχείριση. Το μαγνήσιο συνιστάται σε εδάφη με χαμηλή αντίσταση (μικρότερη από 3000ohm-cm) και όπου η ανάγκη για ρεύμα είναι μικρή. (Parker, 1999, σελ 45) Στον επόμενο πίνακα 7 παρουσιάζονται ορισμένες από τις διαφορές μεταξύ θυσιαζόμενης ανόδου και επιβαλλόμενης τάσης από εξωτερική πηγή, σύμφωνα με το ISO 12473.(ISO Standards, 2006)

Πίνακας 7 : Διαφορές μεταξύ θυσιαζόμενης ανόδου και επιβαλλόμενης τάσης από εξωτερική πηγή. (Francis, 1981, σελ 9)

	Sacrificial systems	Impressed current systems
Environment	Use may be impracticable except in soils or waters of low resistivity	Use is less restricted by resistivity of soil or water but may get Cl ₂ in sea water
Installation	Simple to install	Needs careful design otherwise may be complicated
Power source	Independent of any source of electric power. Cannot be wrongly connected electrically	External supply necessary. Care needs to be taken to avoid electrical connection in wrong direction
Anodes	Bulk of anode material may restrict water flow and introduce turbulence and drag penalties	Usually lighter and few in number. Anodes may be designed to have minimum effect on water flow
Control	Tendency for their current to be self adjusting	Controllable. Control usually automatic and may be continuous
Interaction	They are less likely to affect any neighbouring structures	Effects on other structures situated near the anodes need to be assessed
Maintenance	Generally not required. May be renewed in some circumstances	Equipment designed for long life but regular checks required on electrical equipment in service. Continual power required
Damage	Anodes are robust and not very susceptible to mechanical damage. Where a system comprises a large number of anodes, the loss of a few anodes has little overall effect on the system. Connections must be able to withstand any forces applied to the structure	Anodes lighter in construction and therefore less resistant to mechanical damage. Loss of anodes can be more critical to the effectiveness of a system

Το ανόδιο μαγνησίου που περιέχει η συσκευή STOPCOR έχει, από τη φύση του, την ιδιότητα να παράγει αδιαλείπτως συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα με σταθερή τάση και ένταση, μέχρι την πλήρη εξάντληση και οξείδωση της μάζας του ανοδίου. Το ανόδιο μαγνησίου απαιτεί σχεδόν μηδενική απασχόληση για την συντήρησή του, εφόσον δεν χρειάζεται επαναφόρτιση όπως μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία. Η επιβαλλόμενη τάση (impress current) στα μέταλλα που υπόκεινται στην ηλεκτρόλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί με τροφοδοσία από εξωτερική πηγή ενέργειας. Ο παρακάτω πίνακας 8 παρουσιάζει την απόδοση τάσεων κραμάτων μαγνησίου από όπου και θα λειτουργήσει η καθοδική προστασία.

Πίνακας 8 : Απόδοση τάσεως κραμάτων μαγνησίου

HIGH POTENTIAL	
Aluminium	0,05 max
Zinc	0,3 max
Copper	0,02
Silicon	0,05 max
Manganese	0,5 - 1,5
Iron	0,03 max
Nickel	0,002 max
Magnesium	Reminder
Others (each)	0,03 max
Solution potential	1,7V
Output capacity amp hrs/per kg	1230

Τα κράματα μαγνησίου έχουν καταστεί πολύ χρήσιμα σε περιβάλλον υψηλής ειδικής αντίστασης καθώς το αρνητικό δυναμικό τους και η υψηλή παραγωγή ρεύματος ανά μονάδα βάρους είναι χρήσιμα. Το μαγνήσιο συναντάται σε δεξαμενές αποθήκευσης αλμυρού και γλυκού νερού. Ως άνοδοι χρησιμοποιούνται επίσης αποτελεσματικά και ταινίες μαγνησίου κοντά στη θάλασσα έτσι ώστε ο χάλυβας να πολωθεί και στην συνέχεια να μειωθούν οι απαιτήσεις της καθόδου από 40% έως και 50%. (Baermann et al., 1997)

Η γαλβανική σειρά είναι η ταξινόμηση των μετάλλων και κραμάτων μετάλλων σύμφωνα με το ηλεκτροδιακό δυναμικό τους σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον. Γίνεται φανερό από τον παρακάτω πίνακα 9 πως το μαγνήσιο κατέχει το δραστικό ανοδικό άκρο της γαλβανικής σειράς των μετάλλων (λιγότερο ευγενές). Η αντίσταση στη διάβρωση των κραμάτων μαγνησίου είναι ιδιαίτερα μειωμένη όταν περιέχουν σημαντικά ποσοστά συγκεκριμένων στοιχείων (βαρέων μετάλλων), όπως για παράδειγμα σίδηρο, χαλκό και νικέλιο, ή όταν βρίσκονται εκτεθειμένα σε περιβάλλον με σημαντικές ποσότητες ιόντων χλωρίου.

Ποσοστό του σιδήρου που ξεπερνάει το 3,5% είναι ανεκτό, αλλά η αποδοτικότητά του δεν είναι σπουδαία. Ο επιθυμητός στόχος είναι μικρότερες συγκεντρώσεις σιδήρου με μικρότερο ποσοστό μαγνησίου. Στην συνέχεια κράμα χαμηλό σε περιεκτικότητα χαλκού (< 0,5%) θα επιφέρει χαμηλή ισχύ ρεύματος. Επίσης, το μαγγάνιο σε ένα κράμα μαγνησίου είναι ένα σπουδαίο στοιχείο το οποίο έχει την δυνατότητα να ελέγξει τυχόν ακαθαρσίες που έχουν προσβάλει το κράμα. Τέλος το νικέλιο, μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την αποδοτικότητα τις ανόδου σε ποσοστά χαμηλότερα από 0,5% στο κράμα. (Baermann et al., 1997, σελ 191)

Πίνακας 9 : Γαλβανική σειρά διαφόρων μετάλλων και κραμάτων(Αργυροπούλου, 2018, σελ 30)

Magnesium	Active (Anode)
Zinc	↑
Galvanized Steel	
Aluminum	
Mild Steel	
Cast Iron	
Lead	
Brass	
Copper	
Bronze	
Monel	
Nickel (passive)	
Stainless Steel 304 (passive)	
Stainless Steel 316 (passive)	
Silver	
Titanium	
Gold	
Graphite	
Platinum	Noble (Cathode)

Το μαγνήσιο έχει πολύ μικρό δυναμικό σε σχέση με άλλες γαλβανικές ανόδους (ψευδάργυρος και αλουμίνιο). Η θεωρητική απόδοση του μαγνησίου είναι 2200 Ah kg^{-1} (1000 Ah lb^{-1}). Η πρακτική όμως απόδοση του μαγνησίου σπανίως υπερβαίνει τα 50-60 %. Σε αντίθεση με το αλουμίνιο και τον ψευδάργυρο που η απόδοσή τους μπορεί να ξεπεράσει το 90 %. Στην πράξη ο ψευδάργυρος και το αλουμίνιο στην θάλασσα έχουν χωρητικότητα 760 Ah kg^{-1} και 2500 Ah kg^{-1} , αντίστοιχα. Για αυτόν το λόγο ο ρόλος τους στην καθοδική προστασία έτσι ώστε να υπάρξει προστασία του επιδιωκόμενου μετάλλου είναι σπουδαίος.

Οι ανόδους μαγνησίου πρέπει να δοκιμάζονται σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G 97 97 (ASTM Standards, 2013). Οι τιμές που λαμβάνονται από τις δοκιμές αποτελούν τη βάση για το σχεδιασμό του συστήματος. Μια τυπική σύνθεση ανόδων μαγνησίου συνηθίζεται να είναι όπως απεικονίζεται στον επόμενο πίνακα 10 από ISO 15589-1.(ISO Standards, 2003).

Πίνακας 10 : Τυπική χημική σύνθεση του τυποποιημένου κράματος που χρησιμοποιείται στις ανόδους μαγνησίου

Element	Composition mass fraction, %	
	min.	max.
Cu	—	0,02
Al	5,3	6,7
Si	—	0,1
Fe	—	0,003
Mn	0,15	—
Ni	—	0,002
Zn	2,5	3,5
Mg	Remainder	
The maximum amount of other elements shall be 0,005 % (mass fraction) each.		

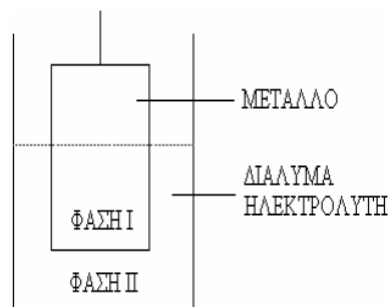
6. Πειραματικό μέρος

6.1 Γενικά

Στόχος του πειράματος είναι ο έλεγχος της λειτουργικότητας του STOPCOR, το οποίο περιέχει ανόδιο μαγνησίου. Το βασικό χαρακτηριστικό του μαγνησίου είναι η ηλεκτροθετικότητά του ως προς τα άλλα μέταλλα που επιδιώκουμε να προστατεύσουμε και για αυτό το λόγω λαμβάνει ως ανορθωτής τάσης στο πείραμα καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενο ρεύμα. Το εργαλείο του STOPCOR θα δοκιμαστεί σε περιβάλλοντα έντονα διαβρωτικά (θαλασσινό νερό και χώμα με έντονο το ποσοστό υγρασίας). Τα δοκίμια που εξετάστηκαν για το φαινόμενο της διάβρωσης είναι οπλισμένο σκυρόδεμα (χάλυβας) μέσα σε θαλασσινό νερό και χάλκινοι σωλήνες μέσα στο έδαφος και στο θαλασσινό νερό. Ως άνοδος στα πειράματά χρησιμοποιήθηκε για αρχή ο εξοπλισμός που δόθηκε μαζί με την συσκευή STOPCOR. Τέλος για την επιτυχή καταμέτρηση του δυναμικού έτσι ώστε να χαρακτηριστεί επιτυχής η καθοδική προστασία έγινε χρήση ηλεκτροδίου αναφοράς και βολτομέτρου.

6.2 Ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl

Στο ηλεκτρόδιο μέρος μιας μεταλλικής πλάκας βρίσκεται βυθισμένη σε διάλυμα ηλεκτρολύτη. Έτσι δημιουργείται σύστημα δύο φάσεων σε επαφή μεταξύ τους (Σχήμα 42). (Υφαντής, 2000, σελ 15)



Εικόνα 42 : Ηλεκτρόδιο στην ηλεκτροχημεία (απλουστευμένο)

Στο ηλεκτρόδιο ηλεκτρικά η μία φάση είναι αγωγός ηλεκτρονίων, ενώ η άλλη είναι αγώγιμη μέσω των ιόντων του ηλεκτρολύτη. Με άλλα λόγια ένας αυστηρός ηλεκτροχημικός προσδιορισμός του ηλεκτροδίου είναι ο εξής:

Ηλεκτρόδιο είναι σύστημα ηλεκτρικά αγώγιμων φάσεων όπου στη μία τουλάχιστον φάση υπάρχουν ιόντα (εννοείται ότι μπορεί να υπάρχουν και τρεις φάσεις π.χ. Ag/AgCl/KCl, Φάση I/II/III που χρησιμοποιείται ως ηλεκτρόδιο αναφοράς). (Υφαντής, 2000)

Ο σχηματισμός της ηλεκτροχημικής διπλοστοιβάδας στη μεταλλική επιφάνεια, που περιγράφηκε προηγουμένως, προκαλεί διαφορά δυναμικού μεταξύ μετάλλου και διαλύματος που ονομάζεται δυναμικό ηλεκτροδίου.

Οι επιθυμητές ιδιότητες ενός ηλεκτροδίου αναφοράς είναι:

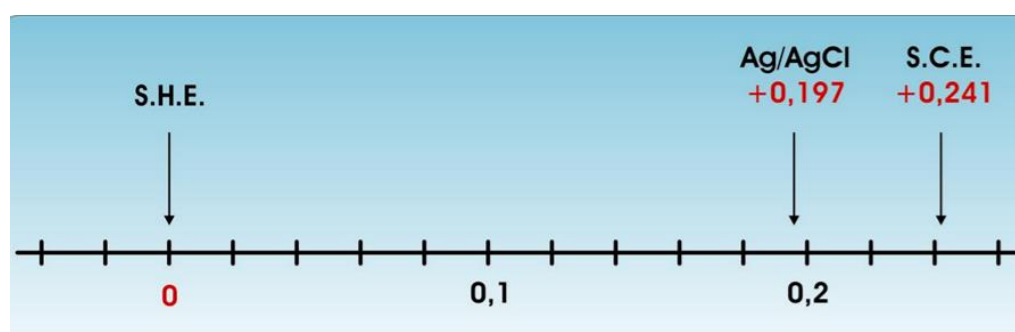
1. η ανάπτυξη δυναμικού σταθερού και ανεξάρτητου συστάσεως του διαλύματος,
2. η διατήρηση δυναμικού σταθερού κατά τη διαρροή του από μικρό ρεύμα (τάξεως μερικών n A) για μεγάλα χρονικά διαστήματα (π.χ. όσο διαρκεί η μέτρηση της ΗΕΔ του στοιχείου) ή μεγαλύτερο ρεύμα (της τάξεως μερικών μΑ) για πολύ σύντομα χρονικά διαστήματα (π.χ. κλάσμα s),
3. η εύκολη, αναπαραγωγική, χαμηλού κόστους κατασκευή, ο μικρός θερμικός συντελεστής δυναμικού και το ελάχιστο δυναμικό υγρού συνδέσμου.

Το πρότυπο ηλεκτρόδιο υδρογόνου είναι ευαίσθητο και οι μετρήσεις με αυτό δεν είναι απλές. Γι' αυτό χρησιμοποιήθηκε στην πράξη ηλεκτρόδιο αναφοράς με σταθερό δυναμικό γνωστό ως προς το Π.Η.Υ. Το δυναμικό του ηλεκτροδίου αναφοράς αργύρου/χλωριούχου αργύρου Ag/AgCl/Cl⁻ (silver/silver chloride, Silber/ Silber Chlorid), σε σχέση με του υδρογόνου παίρνει τιμές συναρτήσει της θερμοκρασίας σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο.

$$E_{\text{Ag/AgCl/Cl}^-} = 0.2250 - 7.44 \cdot 10^{-4} (\theta - 25) \text{ V}$$

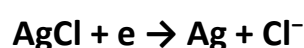
Στη εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα δυναμικά δυο από τα πιο συνηθισμένα ηλεκτρόδια αναφοράς ως προς το ηλεκτρόδιο του υδρογόνου.

- Κορεσμένο Ηλεκτρόδιο Καλομέλανος (Saturated Calomel Electrode, S.C.E.).

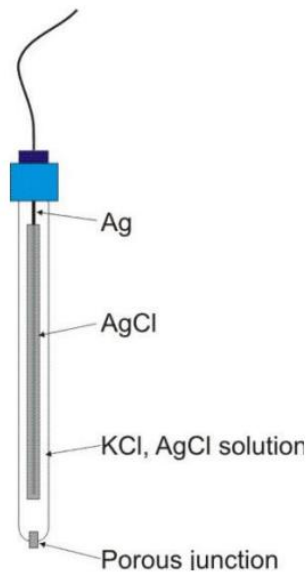


Εικόνα 43 : Δυναμικό ως προς S.H.E (V)

Στην σχηματική απεικόνιση στην συνέχεια παρουσιάζει το δυναμικό του ηλεκτροδίου αναφοράς Ag/AgCl/Cl⁻ ως προς το ηλεκτρόδιο του υδρογόνου, όπου και θα γίνει χρήση του στα πειράματα καθοδικής προστασίας. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς αποτελείται από σύρμα ή έλασμα Ag, ηλεκτρολυτικά επικαλυμμένο με AgCl, που είναι βυθισμένο σε διάλυμα KCl γνωστής συγκεντρώσεως, κορεσμένο με AgCl. Η ηλεκτροδιακή ημι-αντίδραση είναι:



Είναι ευρύτατα χρησιμοποιημένο, εύκολο στην κατασκευή και την χρήση, κατάλληλο για χρήση σε υψηλές θερμοκρασίες ($T < 275^{\circ}\text{C}$) ενώ παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής μικροηλεκτροδίων. Χρησιμοποιείται κυρίως ως εσωτερικό ηλεκτρόδιο εκλεκτικών ηλεκτροδίων ιόντων (ΕΗΙ). Η λειτουργία των εκλεκτικών ηλεκτροδίων ιόντων στηρίζεται στη χρήση καταλλήλων μεμβρανών που να αποκρίνονται σε ένα μόνο ιόν (ιδανικά).



Εικόνα 44 : Ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl/Cl⁻.

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη (δυναμικό) του στοιχείου, που απεικονίζεται στο βολτόμετρο όπου και θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο,

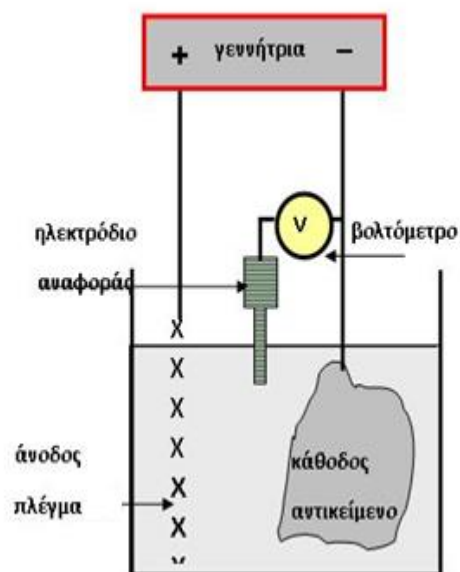
$$E_{\text{στοιχ}} = E_{\text{ενδ}} - E_{\text{αναφ}}$$

- $E_{\text{ενδ}}$ είναι το δυναμικό ενδεικτικού ηλεκτροδίου (εξαρτώμενο από την ενεργότητα του προσδιοριστέου συστατικού - φορέας της αναλυτικής πληροφορίας)
- $E_{\text{αναφ}}$ είναι το δυναμικό ηλεκτροδίου αναφοράς (ανεξάρτητο συστάσεως διαλύματος).

6.3 Βολτόμετρο

Ως Βολτόμετρο περιγράφεται ένα σύνολο ηλεκτροχημικών τεχνικών ανάλυσης, στις οποίες η αναλυτική πληροφορία προκύπτει με μέτρηση της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΗΕΔ) ενός ηλεκτροχημικού στοιχείου. Όπως περιγράφεται και προηγουμένως το ηλεκτροχημικό στοιχείο αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια, το ενδεικτικό ηλεκτρόδιο και το ηλεκτρόδιο αναφοράς.

Πιο συγκεκριμένα, η αποτελεσματικότητα της καθοδικής προστασίας παρακολουθείται με τη μέτρηση, μέσω βολτομέτρου, της ηλεκτρεγερτικής δύναμης για την προστατευμένη επιφάνεια με τον προσδιορισμό του δυναμικού μεταξύ της επιφάνειας και ενός κατάλληλου ηλεκτροδίου αναφοράς. Το βολτόμετρο, πρέπει να είναι υψηλής αντοχής για να εμποδίσει το ρεύμα έλξης το οποία θα μπορούσε να πολώσει το ηλεκτρόδιο αναφοράς. Η χρήση στην πράξη του βολτομέτρου, του ηλεκτροδίου αναφοράς, της καθόδου και της ανόδου απεικονίζεται στο σχήμα 45.



Εικόνα 45 : Έλεγχος μέσω του βολτομέτρου της αποτελεσματικότητας της καθοδικής προστασίας.

Ως βολτόμετρο χρησιμοποιήθηκε το FLUKE 910 (κατάλληλα πιστοποιημένο για μετρήσεις εργαστηρίου).

Το σχήμα περιλαμβάνεται μια ωμική συμβολή $IR (V)$ όταν το καθοδικό ρεύμα I περνάει από την αντίσταση που βρίσκεται ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο αναφοράς και τη επιφάνεια που θέλουμε να προστατεύσουμε. Μόνο η πόλωση της επιφάνειας το προστατευόμενου μετάλλου μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά στην καθοδική προστασία. Για να ελεγχθεί ακριβώς το δυναμικό της επιφάνειας του μετάλλου και να εξαλειφθεί η ωμική συμβολή όσο το δυνατόν περισσότερο, θα πρέπει το ηλεκτρόδιο αναφοράς να τοποθετηθεί όσο το δυνατόν κοντά στην επιφάνεια του μετάλλου. Πολλές φορές αυτό καθίσταται αδύνατο για μεγάλα κυκλώματα τα οποία είναι βαθιά θαμμένα στην θάλασσα ή στο έδαφος.

Για την καταμέτρηση των δυναμικών και μετέπειτα την αναγνώριση της λειτουργίας της καθοδικής προστασίας στα διάφορα διαβρωτικά περιβάλλοντα, θα πρέπει να τηρηθούν κάποιιο κανόνες. Μετά από το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12473:2000 (EN Standards, 2000b) στο νερό η μέτρηση του δυναμικού όταν ρεύμα περνάει από ανορθωτή ή από άνοδο αντιστοιχεί στην μέτρηση του δυναμικού όταν το ρεύμα αυτό σταματάει να

διέρχεται στο κύκλωμα ($E_{on} = E_{off}$). Η διαφορά δυναμικού με ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl σε χάλυβα δεν θα πρέπει να πάρει τιμή μεγαλύτερη από -800mV και μικρότερη από -1100mV . Ενώ σε χαλκό η τιμή δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από -450mV . Ακολούθως μετά από το ευρωπαϊκό πρότυπο BS EN 12954:2001 (British Standards, 2001) οι τιμές της διαφοράς δυναμικού με ηλεκτρόδιο αναφοράς Cu/CuSO₄ σε χώμα για το χαλκό δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από -200mV , ενώ για το σίδηρο μεγαλύτερη από -850mV . Οι τιμές στο χώμα που αναφέρθηκαν προηγουμένως θα πρέπει να ισχύουν μετά την διακοπή του επιβαλλόμενου ρεύματος που κυκλοφόρησε στο σύστημα για 10 δευτερόλεπτα και μετά από το πέρασ 3 δευτερολέπτων μετά το κλείσιμο του ανορθωτή. Τέλος, σε οπλισμένο σκυρόδεμα μετά το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12696:2000 (EN Standards, 2000a) ο έλεγχος της αποτελεσματικότητας της καθοδικής προστασίας επιβεβαιώνεται όταν η διαφορά δυναμικού στο κύκλωμα όταν ρέει το ρεύμα και στο κύκλωμα όταν αφεθεί για 1 λεπτό χωρίς παροχή ρεύματος είναι μικρότερη από 100mV .

6.4 Καθοδική προστασία σε οπλισμένο σκυρόδεμα

Δυο βασικοί παράγοντες για τον σχεδιασμό ενός συστήματος καθοδικής προστασίας είναι η πυκνότητα ρεύματος που απαιτείται για την προστασία του χάλυβα και η διαδρομή που θα ρέει το ρεύμα αυτό. Άλλοι δευτερεύοντες παράγοντες μπορεί να είναι το κόστος, η αισθητική, το βάρος, η ανθεκτικότητα, η διάρκεια ζωής του συστήματος καθοδικής προστασίας. (Daily and Somerville, 2002, σελ 3)

6.4.1 Το ρεύμα

Εάν το σκυρόδεμα που περιβάλλει το χάλυβα είναι αλκαλικό, υπάρχει μικρή ποσότητα χλωρίου και ο ρυθμός διάχυσης του είναι χαμηλός, τότε μια πολύ μικρή ποσότητα ρεύματος θα είναι αρκετή για να παρουσιαστεί διάβρωση στο μέλλον. Από την άλλη πλευρά, ένα ζεστό υγρό περιβάλλον, κυμαινόμενο σε υψηλά επίπεδα οξυγόνου και χλωρίου θα έχει πολύ μεγάλη απαίτηση πυκνότητας ρεύματος.

Η διαδικασία διάβρωσης του χάλυβα του οπλισμένου σκυροδέματος είναι παρόμοια με την τροφοδοσία ενέργειας από μια μπαταρία. Σε μια μπαταρία και όταν ο χάλυβας διαβρώνεται, το μέταλλο διαλύεται και αυτό οδηγεί στην παραγωγή ενός μικρού ρεύματος ανάμεσα στον θετικό πόλο και στον αρνητικό.

Πιο συγκεκριμένα, το ρεύμα ρέει από το ανοδικό τμήμα (όπου και διαβρώνεται) σε τμήμα του χάλυβα που ονομάζεται κάθοδος (όπου δεν παρουσιάζεται διάβρωση) μέσω του σκυροδέματος. Με άλλα λόγια, ο χάλυβας διαλύεται και σχηματίζεται οξείδιο σιδήρου στο ανοδικό τμήμα. Η μεγάλη διαφορά του δυναμικού ανάμεσα σε διαφορετικές περιοχές στο χάλυβα μέσα στο σκυρόδεμα μπορούν να προκληθούν από την ύπαρξη φυσικών διαφορών ή μη ομοιόμορφων επιφανειών του οπλισμού. Όπως, για παράδειγμα, συγκολλήσεις, ύπαρξη οξυγόνου ή ακόμα μολύνσεις από χλώριο. Το χλώριο μπορεί να υπάρχει είτε ως συστατικό του αρχικού μείγματος του σκυροδέματος είτε μπορεί να διεισδύσει σε αυτό από μια εξωτερική πηγή όπως το θαλασσινό περιβάλλον.

Για την αποφυγή της διάβρωσης είναι δυνατόν να γίνει χρήση τεχνητής ανόδου όπου και θα προστεθεί ένα νέο και υψηλότερο ρεύμα αντίθετης κατεύθυνσης στο κύκλωμα

διάβρωσης. Έτσι, όλη η ενίσχυση με το οξείδιο λαμβάνει μέρος στην κάθοδο από όπου και πήρε το όνομα η διαδικασία της καθοδικής προστασίας.

6.4.2 Η διαδρομή

Ίση και μεγάλη σημασία πρέπει να δοθεί στον τρόπο εξάπλωσης του ρεύματος. Η βέλτιστη κατανομή ρεύματος θα εξαρτηθεί από την διάταξη του οπλισμού και τον βαθμό της διάβρωσης.

Βασικός παράγοντας στην κατανομή ρεύματος είναι ο τύπος την ανόδου και η διαφορές στην ειδικής αντίσταση του σκυροδέματος. Όταν υπάρχουν περιορισμένες μεταβολές της ειδικής αντίστασης του τσιμέντου, οι επιφανειακά τοποθετημένες άνοδοι, δίνουν ομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος. Από την άλλη πλευρά άνοδοι οι οποίοι είναι ενσωματωμένοι στο σκυρόδεμα δίνουν σφαιρική κατανομή γύρω από τον άξονα της ανόδου.

Η εξασφάλιση της ηλεκτρικής συνέχειας του χαλύβδινου οπλισμού με την παρουσία γωνιών, ενισχυτών και άλλων ενσωματωμένων μεταλλικών αντικειμένων αποτελεί ουσιώδες στοιχείο στην εφαρμογή της καθοδικής προστασίας. Η ηλεκτρική ασυνέχεια θα εμποδίζει την είσοδο του ρεύματος στον χάλυβα, και συνεπώς θα οδηγήσει στην διάβρωση των στοιχείων.

Διαφορά δυναμικού μικρότερη από 1 mV είναι ενδεικτική τιμή ηλεκτρικής συνέχειας μεταξύ μεταλλικών στοιχείων ενσωματωμένων στο σκυρόδεμα. Επίσης, η αλλαγή του δυναμικού στο χαλύβδινο αντικείμενο μέσω της εφαρμογής της καθοδικής προστασίας είναι ένα άλλος τρόπος αξιολόγησης της ηλεκτρικής συνέχειας. Το δυναμικό αυτό μετρείται με την βοήθεια ενσωματωμένου ή φορητού ηλεκτροδίου αναφοράς.

Η καθοδική προστασία οπλισμών με επένδυση από χαλύβδινες δομές είναι εφικτή διότι συνεχές ρεύμα διέρχεται μέσα από το κονίαμα σε χαλύβδινο πλαίσιο.

Η συνάφεια κατά την πλήρωση του κονιάματος είναι ένα παράγοντας που επηρεάζει την ηλεκτρική συνέχεια σε ένα οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα κενά μεγαλύτερα από >25mm συνήθως δεν επηρεάζουν την διάβρωση σε μεγάλο βαθμό και δεν απαιτείται προστασία. Από την άλλη μεριά, τα κενά μπορεί να έχουν ένα άνοιγμα <10 mm και η διάβρωση να είναι εμφανείς. Όμως, λόγω των μικρών μεγεθών στα κενά, τα προϊόντα διάβρωσης τείνουν να γεμίσουν τα μικρά αυτά κενά και σαν αποτέλεσμα να λειτουργήσουν ως ηλεκτρολύτες για το προστατευτικό ρεύμα.

Το πορώδες, σε δομές με επένδυση από χάλυβα, έχει μεγάλη επίδραση στην αντίσταση του ηλεκτρολύτη. Όπως γνωρίζουμε η αντίσταση, είναι το αντίστροφο της αγωγιμότητας. Με άλλα λόγια, όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική αντίσταση του κονιάματος (που βρίσκεται σε επαφή με τον χάλυβα) τόσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα διάβρωσης.

Ένα σύστημα καθοδικής προστασίας σε σκυρόδεμα αποτελείται από τέσσερις βασικούς παράγοντες:

1. Μια ελεγχόμενη πηγή ρεύματος συνεχούς ρεύματος - συνήθως ένας ανορθωτής.

2. Μια άνοδο (υλικό που είναι τοποθετημένο επάνω ή μέσα στο σκυρόδεμα ή ακόμα και στον ηλεκτρολύτη που περιβάλλει το σκυρόδεμα, αρκεί να μπορεί να επιτραπεί η ροή του ρεύματος)
3. Έναν ηλεκτρολύτη (νερό που υπάρχει στο σκυρόδεμα ή στην περίπτωση ανόδων το νερό, το έδαφος και η λάσπη στα οποία τοποθετούνται).
4. Μια ηλεκτρική διαδρομή (όπου βρίσκεται ο ηλεκτρικά συνεχής χάλυβας που πρέπει να προστατευθεί).

6.4.3 Άνοδοι

Όπως έχει γίνει κατανοητό από την λειτουργία της καθοδικής προστασίας ένα από τα πιο κρίσιμα στοιχεία της είναι η άνοδος. Χρησιμοποιείται για την κατανομή του προστατευτικού ρεύματος στο χάλυβα και επίσης παρέχει θέσεις που λαμβάνει μέρος η ανοδική αντίδραση. (Baermann et al., 1997)

Η χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα γύρω από την άνοδο είναι η έκλυση του οξυγόνου ή η ανάπτυξη του χλωρίου. Η ανάπτυξη ιόντων υδρογόνου (H^+) κατά την διάρκεια της ανοδικής αντίδρασης μειώνει το pH (την αλκαλικότητα) του σκυροδέματος και βοηθάει στην ανάπτυξη οξέων

Με την χρήση σχετικά αδρανών υλικών σε ανόδους, όπως το τιτάνιο, η διάβρωση τους πραγματοποιείται με αργό ρυθμό και το προσδοκώμενο ζωής τους είναι αυξημένο συγκριτικά με υπόλοιπα. Σύμφωνα με δοκιμές, το προσδοκώμενο ζωής μπορεί να υπερβεί τα 75 χρόνια. Διακριτές άνοδοι τιτανίου κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας μικτές ράβδους οξειδίου του μετάλλου και καταλυμένα πλέγματα τιτανίου. Οι άνοδοι μπορούν να εγκατασταθούν στο εξωτερικό του κτηρίου ή ακόμα και στο εσωτερικό εάν επιτρέπεται πρόσβαση. Οι άνοδοι τιτανίου χρησιμοποιούνται κυρίως όταν απαιτείται μέγιστη διείσδυση ρεύματος στην δομή. (Daily, 2002, σελ 6)

Στην περίπτωση όπου μεταλλικές δομές είναι τοποθετημένες σε περιβάλλον θαλασσινού νερού ή χώματος θεωρείται ότι η δομή βρίσκεται σε σχεδόν ουδέτερο περιβάλλον ηλεκτρολύτη με σχετικά υψηλή αγωγιμότητα και απείρων διαστάσεων συγκρινόμενο με την υπό προστασία δομή. Από την άλλη πλευρά ο χάλυβας σκυροδέματος, έρχεται σε επαφή με πολύ αλκαλικό πηκτή τσιμέντου, πόρους νερού τα οποία συνδυαζόμενα με άμμο και συσσωματώματα μπορούν να αντιμετωπιστούν ως μη αγωγίμα. Στο οπλισμό σκυροδέματος η επαφή με τον ηλεκτρολύτη είναι περιορισμένη σε συγκεκριμένη δομή σκυροδέματος.

Παρόλο που η καθοδική προστασία μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς να αντικατασταθεί το μολυσμένο σε χλώριο σκυρόδεμα, οι μακροσκοπικές ρωγμές στο σκυρόδεμα περιορίζουν σημαντικά την ροή του προστατευτικού ρεύματος στον οπλισμό. Επομένως είναι απαραίτητο, να ανιχνευθούν και να επισκευαστούν όλες οι απαραίτητες αστοχίες πριν την εφαρμογή του συστήματος καθοδικής προστασίας.

6.4.4 Κατασκευή δοκιμίων

Μετά από ελέγχους που διεξήχθησαν για την καθοδική προστασία σε οπλισμένο σκυρόδεμα ή σε μεταλλικές δομές, οι οποίες βρίσκονται εκτεθειμένες σε διαβρωτικό περιβάλλον, είναι φανερό ότι η καθοδική προστασία είναι μια οικονομική σκέψη και σε συνδυασμό με προστατευτικές επικαλύψεις, συνήθως μπορεί να εξασφαλίσει μεγάλη διάρκεια ζωής στα προϊόντα.

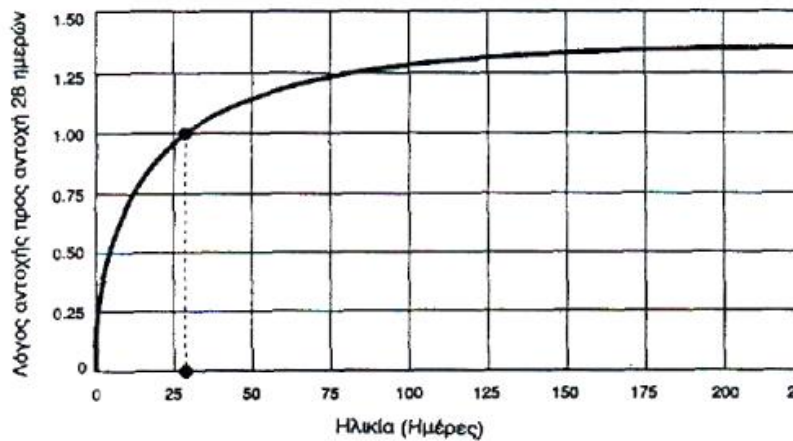
Στα πλαίσια του πειράματος, πριν ξεκινήσει η διαδικασία κατασκευής των δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος απαιτείται ο καθαρισμός των ράβδων χάλυβα που θα χρησιμοποιηθούν ως ενίσχυση καθώς και ο καθαρισμός των καλουπιών μέσα στα οποία θα τοποθετηθεί ο τσιμεντοπολτός μέχρι τη σκλήρυνση.

Πριν την χρήση των καλουπιών, απαιτείται ο καθαρισμός και η λείανση της εσωτερικής επιφάνειας αυτών για το εύκολο ξεκαλούπωμά τους μετά την σκλήρυνση του τσιμεντοκονιάματος, αλλά και για την αποφυγή ανωμαλιών στην επιφάνειά του δοκιμίου.

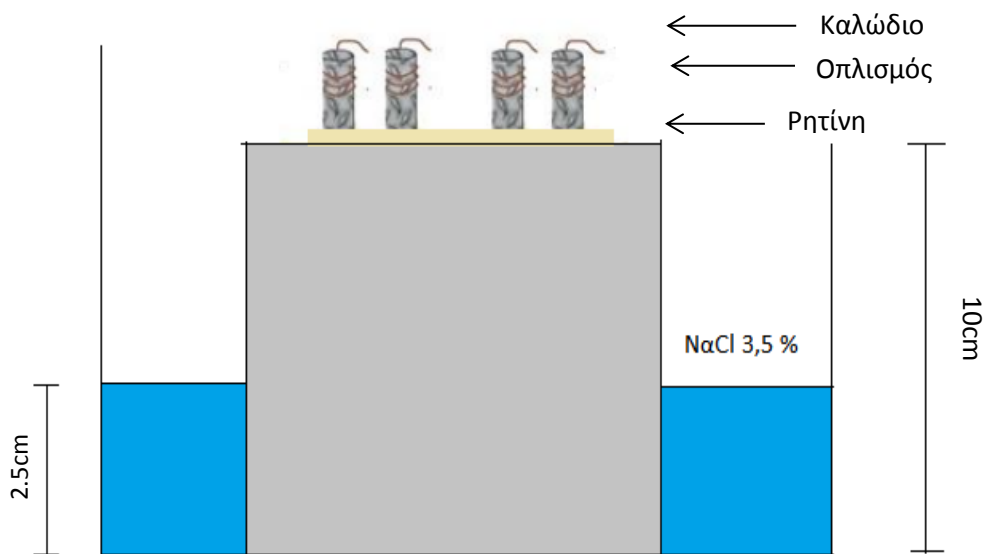
Ο καθαρισμός των ράβδων του χάλυβα είναι πολύ σημαντική και απαραίτητη διαδικασία πριν από τη χρήση τους. Οι ράβδοι του χάλυβα τοποθετήθηκαν σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος d_{HCl} και παρέμειναν σε αυτό περίπου 10-15 λεπτά. Στη συνέχεια ξεπλύθηκαν διαδοχικά με νερό βρύσης, απιονισμένο νερό και τέλος εμβαπτίσθηκαν σε ακετόνη. Η διαδικασία του καθαρισμού του χάλυβα είναι πολύ σημαντική και σκοπός της είναι η ενεργοποίηση της επιφάνειάς του, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί καλύτερη πρόσδεση με το τσιμεντοκονίαμα. Ένας ακόμη λόγος που καθιστά την διαδικασία καθαρισμού του οπλισμού αναγκαία είναι οι σκόρες και τα οξείδια και άλλα ανεπιθύμητα σωματίδια, που απομακρύνονται από την επιφάνειά του.

Σε επόμενο βήμα, μετά τον καθαρισμό της επιφάνειας κάθε ράβδος ζυγίζεται σε ζυγό ακριβείας και καταγράφεται το βάρος της με ακρίβεια τέταρτου δεκαδικού ψηφίου.

Για την κατασκευή των δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος αναμίξαμε τσιμέντο και νερό σε αναλογία 1:3. Κατά την ανάμειξη του τσιμέντου με το νερό δημιουργείται μια γκριζοπράσινη πολτώδης μάζα, η τσιμεντοσκονία. Το μίγμα τοποθετήθηκε στα κυβικά καλούπια και τοποθετήθηκαν την ίδια στιγμή και οι χαλύβδινοι ράβδοι μήκους 10 cm, όπου προεξέχουν περίπου 2 cm. Το μείγμα φαίνεται να πήζει προοδευτικά έως ότου στερεοποιηθεί τελείως. Στο παρακάτω διάγραμμα 46 απεικονίζεται η ανάπτυξη της αντοχής του τσιμεντοπολτού με το χρόνο. (Μιχάλης, και Δημητρίου, 2007, σελ 16) Σχηματικά ένα δοκίμιο οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 47.



Εικόνα 46 : Ανάπτυξη της αντοχής του τσιμεντοπολτού νε το χρόνο.



Εικόνα 47 : Δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος σε θαλασσινό νερό (3,5% NaCl)

Το πείραμα έλαβε μέρος με 3 κυβικά δοκίμια σκυροδέματος, όπου κάθε κυβικό δοκίμιο περιλαμβάνει τέσσερις χαλύβδινους οπλισμούς. Μετά από 28 ημέρες (σύμφωνα με τις διατάξεις του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος), όπου η αντοχή του σκυροδέματος έχει σταθεροποιηθεί, τα δοκίμια απομακρύνθηκαν από τα καλούπια.



Εικόνα 48 : Δημιουργία του σπλισμένου σκυροδέματος.

Σε δεύτερο στάδιο, τοποθετήθηκαν κατάλληλα τα καλώδια για τη τροφοδοσία του ρεύματος και τη δυνατότητα μέτρησης του δυναμικού. Για να αποφευχθεί η διάβρωση των καλωδίων από το έντονο διαβρωτικό περιβάλλον καλύφθηκαν με ρητίνη. Όπως φαίνεται και στις εικόνες στην συνέχεια, η ρητίνη βοηθάει στην απομόνωση του σημείου ένωσης του δοκιμίου με το καλώδιο από το ηλεκτρολυτικό περιβάλλον, προκειμένου να αποφευχθούν σημεία που θα παρατηρηθεί έντονη διάβρωση.



Εικόνα 49 : Εφαρμογή καλωδίων και ρητίνης για την ολοκλήρωση της καθοδικής προστασίας.

Στην συνέχεια, τα δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος τοποθετήθηκαν σε λεκάνες με νερό και παρέμειναν για άλλες 3 ημέρες με σκοπό την ενυδάτωση των δοκιμίων. Το θαλασσινό νερό όπου και τοποθετήθηκαν ήταν περιεκτικότητας 3,5% NaCl. Όπως απεικονίζεται, τα δυο δοκίμια βρίσκονται ημι-βυθισμένα μέσα στο θαλασσινό νερό και το τρίτο στον αέρα αλλά σε επαφή με τα άλλα δύο.



Εικόνα 50 : Διάταξη των δοκιμίων σε νερό (3,5% NaCl) και αέρα.

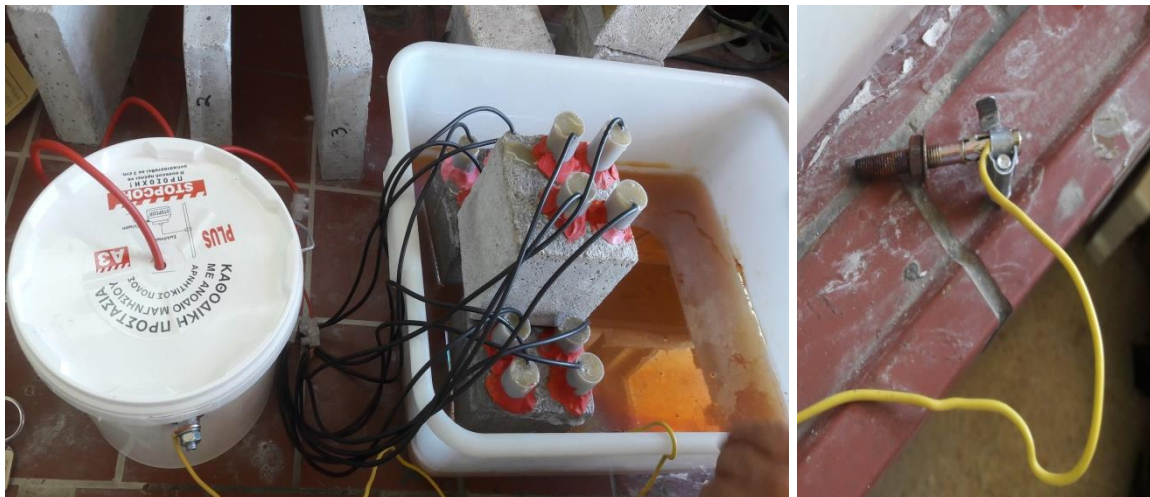
6.4.5 Εφαρμογή καθοδικής προστασίας

Σε επόμενο βήμα, τα δοκίμια ενώθηκαν με θυσιαζόμενη άνοδο μαγνησίου (STOPCOR) που λειτουργεί ως ανορθωτής, ο οποίος προσφέρει ρεύμα στο σύστημα. Στόχος του είναι η αναστροφή του φαινομένου διάβρωσης στην τοποθετημένη άνοδο και η προστασία αντιστοίχως της καθόδου (οπλισμένο σκυρόδεμα). Το κίτρινο καλώδιο που φαίνεται στην εικόνα συνδέεται με την άνοδο, όπου και αυτό βρίσκεται στο ίδιο διαβρωτικό περιβάλλον με τους οπλισμούς, έτσι ώστε να μπορεί να κλείνει το κύκλωμα.



Εικόνα 51 : Εφαρμογή της καθοδικής προστασίας και χρήση ποτενσιόμετρου.

Αρχικά, όπως μπορεί να γίνει φανερό από την εικόνα στην συνέχεια, σε σχετικά έντονα διαβρωτικά περιβάλλοντα περιεκτικότητας 3,5% σε NaCl, το σύστημα είχε αστοχία την οποία την εμφάνισε σε απρόβλεπτα σύντομη χρονική περίοδο.



Εικόνα 52 : Αστοχία προτεινόμενης ανόδου μετά το πέρας 2 ημερών.

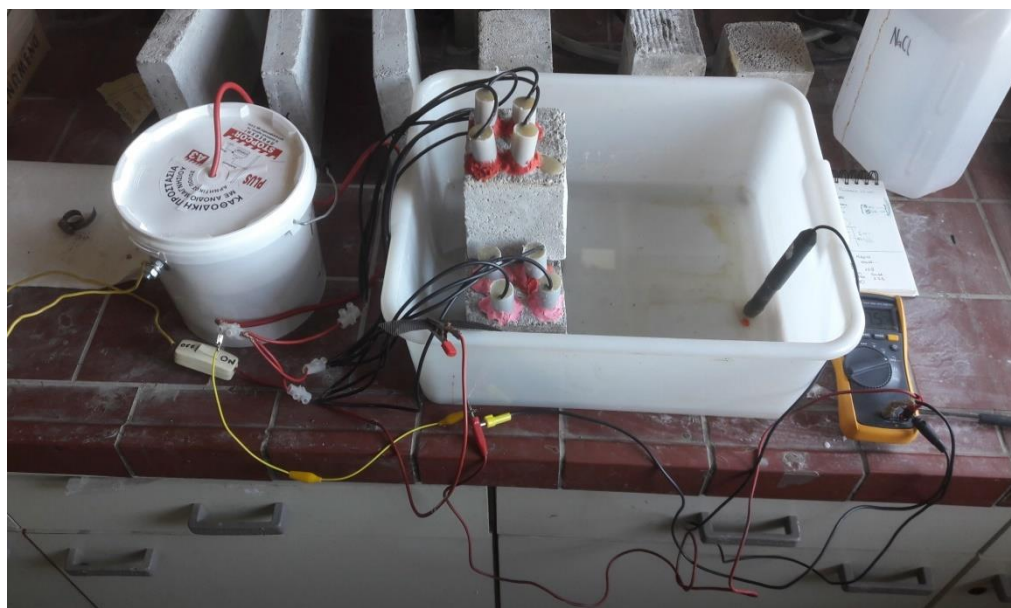
Όπως έγινε φανερό η άνοδος του εξοπλισμού που μας δόθηκε από τον προμηθευτή του υλικού διαβρώθηκε με αποτέλεσμα να οδηγηθούμε σε επανάληψη της δοκιμής του συστήματος καθοδικής προστασίας με την χρήση ανοξείδωτου χάλυβα στην θέση της ανόδου. Η τοποθέτηση της νέας ανόδου από ένα πιο ευγενές μέταλλο σε ένα αρκετά διαβρωτικό περιβάλλον ήταν απαραίτητη προκειμένου το φαινόμενο της διάβρωσης να παρεμποδιστεί μακροπρόθεσμα. Το αποτέλεσμα ήταν ότι μετά το πέρας μιας εβδομάδας ούτε ο ανοξείδωτος χάλυβας δεν λειτούργησε αποτελεσματικά στις συνθήκες αυτές.



Εικόνα 53 : Αστοχία ανόδου από ανοξείδωτο χάλυβα μετά το πέρας μιας εβδομάδας.

Για το λόγο αυτό (αστοχία και του ανοξείδωτου χάλυβα), μετά από έλεγχο των πινάκων της γαλβανικής σειράς των μετάλλων και κραμάτων και καταλήξαμε στο συμπέρασμα πως με τη χρήση τιτανίου σαν υλικό ανόδου η διάβρωση της ανόδου θα ήταν σχεδόν αδύνατη.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών μετρήσεων περιλάμβανε βολτόμετρο για την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων και ηλεκτρόδια αναφοράς. Ως ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο κεκορεσμένου καλομέλανα $Ag / AgCl / KCl$. Ως ηλεκτρόδιο εργασίας είναι ο υπό εξέταση σπλισμός. Ο ηλεκτρολύτης ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ήταν το διαβρωτικό διάλυμα $NaCl$.



Εικόνα 54 : Εφαρμογή καθοδικής προστασίας με άνοδο το τιτάνιο.

6.4.6 Μέτρηση των δυναμικών προστασίας

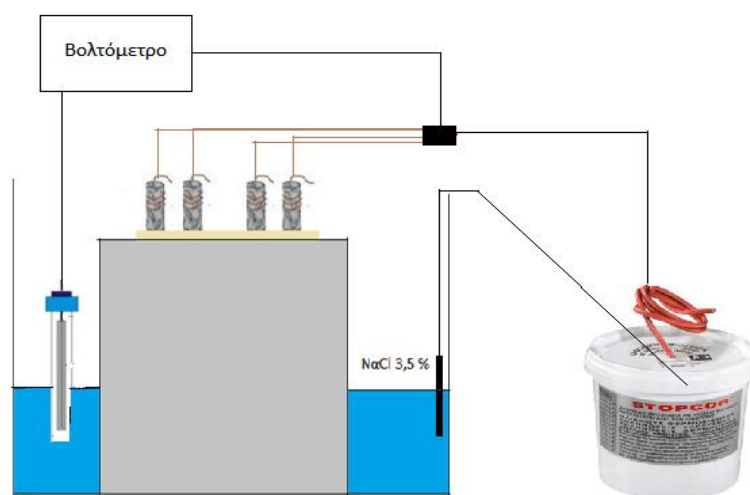
Η μέτρηση του δυναμικού του χάλυβα ως προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς παρέχει πληροφορίες για την πιθανότητα διάβρωσής του. Ως ηλεκτρόδια αναφοράς χρησιμοποιούνται το ηλεκτρόδιο καλομέλανος Ag / AgCl / KCl . Απαραίτητη επίσης η χρήση ενός βολτομέτρου.

Αναφορικά με το ASTM C 876-91 (ASTM, 1999, σελ 4), οι τις τιμές του μετρούμενου δυναμικού διάβρωσης πριν την επιβολή καθοδικής προστασίας, διακρίνονται στα εξής:

- Όταν $E > -200$ mV, κατά πιθανότητα 90%, δεν συμβαίνει διάβρωση.
- Όταν $E < -350$ mV, κατά πιθανότητα 90%, συμβαίνει διάβρωση.
- Όταν -200 mV $> E > -350$, δεν είναι βέβαιο αν συμβαίνει ή όχι διάβρωση.
- μετριέται το συνολικό δυναμικό μεταξύ ανόδου και καθόδου.

Για την αποδοτικότητα της μεθόδου καθοδικής προστασίας , απαιτείται ο προσδιορισμός του δυναμικού διάβρωσης του χάλυβα. Εφαρμόζονται διάφορα δυναμικά στο χάλυβα , όπου είναι μερικές δεκάδες mV μεγαλύτερα και μικρότερα από το δυναμικό διάβρωσης του χάλυβα. Εφαρμογή δυναμικών αρκετά διαφορετικών από το δυναμικό διάβρωσης μπορεί να μεταβάλλει τη διεπιφάνεια μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος.

Για την μέτρηση του δυναμικού προστασίας, το ηλεκτρόδιο αναφοράς τοποθετήθηκε στο διάλυμα χλωριούχου νατρίου στο οποίο ήταν εμβαπτισμένα τα δοκίμια και ταυτόχρονα συνδέθηκε με το βολτόμετρο. Στο βολτόμετρο επίσης συνδέθηκε το καλώδιο που έφερε το θυσιαζόμενο ανόδιο μαγνησίου (STOPCOR), όπου και είχε συνδεθεί με το χάλυβα του τσιμεντοκονιάματος. Οι μετρήσεις του δυναμικού που ελήφθησαν για κάθε δοκίμιο κατεγράφησαν στον πίνακα 11. Για την ευκολότερη κατανόηση του συστήματος σε οπλισμένο σκυρόδεμα σχεδιάστηκε το παρακάτω σχέδιο.



Εικόνα 55 : Εφαρμογή καθοδικής προστασίας.

Οι μετρήσεις του δυναμικού προστασίας έγιναν σύμφωνα με τα κριτήρια καθοδικής προστασίας σε οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα κριτήρια για τον έλεγχο της αποδοτικότητας της καθοδικής προστασίας είναι δυο.

1. Σύμφωνα με EN 12696:2000 (EN Standards, 2000a), η διαφορά δυναμικού σε κύκλωμα με και χωρίς ροή ρεύματος για 1 λεπτό πρέπει να είναι μικρότερη από 100mV ($E_{on} - E_{off} \leq 100mV$),
2. Σύμφωνα με EN 12954:2001 (British Standards, 2001), το δυναμικό προστασίας E_{on} πρέπει να μην ξεπερνάει την τιμή $-0,75V$ ($E_{on} \leq -0,75V$), αλλά ούτε να κυμανθεί σε τιμές πολύ χαμηλότερες του (περίπου $-1,2V$). Στις πολύ χαμηλές τιμές υπάρχει κίνδυνος έκλυσης υδρογόνου στο χαλύβδινο οπλισμό του σκυροδέματος.

6.4.7 Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

Στον επόμενο πίνακα 11 απεικονίζονται οι μετρήσεις του συνολικού δυναμικού (δυναμικό του STOPCOR) μεταξύ ανόδου και οπλισμού σκυροδέματος και το δυναμικό προστασίας στα τρία δοκίμια σκυροδέματος. Επίσης, στο δοκίμιο του αέρα έγινε έλεγχος του δυναμικού προστασίας ενώ προηγήθηκε η διαβροχή με νερό στο σημείο επαφής με τα άλλα δοκίμια. Στην συνέχεια θα αναλυθούν τα συμπεράσματα, αλλά και τα μέτρα για βελτίωση που συνιστούνται.

Στο ακόλουθο πίνακα 11:

- E_{on} = δυναμικό προστασίας ενώ υπάρχει σύνδεση με τον ανορθωτή.
- E_{off} = δυναμικό προστασίας ενώ δεν υπάρχει σύνδεση με τον ανορθωτή.
- E_{tot} = δυναμικό μεταξύ της ανόδου τιτανίου και του οπλισμού.

Πίνακας 11 : Πίνακας μετρήσεων των δυναμικών προστασίας στα δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος με ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl

	Σκυροδέμα								
	Etot	Eon αέρα	Eon δεξ	Eon αρισ	Eon αέρα με νερό	Eoff αέρα	Eoff δεξ	Eoff αρισ	Eoff με νερό
13-Σεπ	-1,497	-0,792	-1,107	-1		-0,717	-1,067	-0,953	
19-Σεπ		-0,035	-1,051	-1,07		0	-1,011	-1	
20-Σεπ									
20-Σεπ		-0,12	-1,294	-1,1		-0,035	-0,344	-0,85	
4-Οκτ	-0,502	-0,298	-0,503	-0,485	-0,494	-0,27	-0,483	-0,472	-0,354
9-Οκτ	-0,5	-0,32	-0,475	-0,478		-0,3	-0,45	-0,455	
11-Οκτ	-0,4945	-0,32	-0,472	-0,481	-0,35	-0,277	-0,465	-0,471	-0,302
16-Οκτ	-0,4818	-0,225	-0,45	-0,469	-0,35	-0,213	-0,436	-0,448	-0,29
25-Οκτ	-0,47	-0,332	-0,444	-0,442		-0,257	-0,34	-0,36	
27-Οκτ	-0,376		-0,4	-0,36			-0,355	-0,26	
6-Νοε	-0,374	-0,18	-0,372	-0,33	-0,28	-0,12	-0,352	-0,26	-0,245
15-Νοε	-0,354	-0,17	-0,35	-0,372	-0,26	-0,105	-0,345	-0,342	-0,23
19-Δεκ	-0,368	-0,158	-0,36	-0,34	-0,234	-0,098	-0,341	-0,31	-0,211
27-Φεβ	-0,359	-0,152	-0,355	-0,36	-0,222	-0,097	-0,335	-0,34	-0,19
20-Μαρ	-0,362	-0,13	-0,354	-0,345	-0,201	-0,085	-0,331	-0,315	-0,182
18-Απρ	-0,354	-0,13	-0,352	-0,37	-0,18	-0,084	-0,325	-0,34	-0,179
19-Μαΐ	-0,351	-0,13	-0,346	-0,342	-0,177	-0,083	-0,321	-0,322	-0,168
19-Ιουν	-0,35	-0,13	-0,346	-0,348	-0,17	-0,082	-0,333	-0,318	-0,166
19-Ιουλ	-0,347	-0,13	-0,341	-0,335	-0,169	-0,081	-0,341	-0,315	-0,163
19-Αυγ	-0,34	-0,125	-0,338	-0,345	-0,167	-0,078	-0,335	-0,33	-0,162
9-Σεπ	-0,31	-0,122	-0,331	-0,32	-0,165	-0,078	-0,301	-0,315	-0,161

Από τα δεδομένα του πίνακα 11 συμπληρώθηκε και ο επόμενος πίνακας 12, όπου παρουσιάζει τις τιμές $E_{on}-E_{off}$ σε χρονική διάρκεια ενός έτους στα δοκίμια σκυροδέματος που βρίσκονται ημβυθισμένα σε θαλασσινό νερό, και σε αυτά που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα μετά και πριν την τοποθέτηση νερού.

Πίνακας 12 : Πίνακας μετρήσεων των δυναμικών Eon-Eoff στα δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος

	Σκυρόδεμα			
	Eon-Eoff αέρα	Eon-Eoff δεξ	Eon-Eoff αρισ	Eon-Eoff αέρα με νερό
13-Σεπ	0,075	0,04	0,047	
19-Σεπ	0,035	0,04	0,07	
20-Σεπ				
20-Σεπ	0,085	0,95	0,25	
4-Οκτ	0,028	0,02	0,013	0,14
9-Οκτ	0,02	0,025	0,023	
11-Οκτ	0,043	0,007	0,01	0,048
16-Οκτ	0,012	0,014	0,021	0,06
25-Οκτ	0,075	0,104	0,082	
27-Οκτ		0,045		
6-Νοε	0,06	0,02	0,07	0,035
15-Νοε	0,065	0,005	0,03	0,03
19-Δεκ	0,06	0,019	0,03	0,023
27-Φεβ	0,055	0,02	0,02	0,032
20-Μαρ	0,045	0,023	0,03	0,019
18-Απρ	0,046	0,027	0,03	0,001
19-Μαΐ	0,047	0,025	0,02	0,009
19-Ιουν	0,048	0,013	0,03	0,004
19-Ιουλ	0,049	0	0,02	0,006
19-Αυγ	0,047	0,003	0,015	0,005
9-Σεπ	0,044	0,03	0,005	0,004

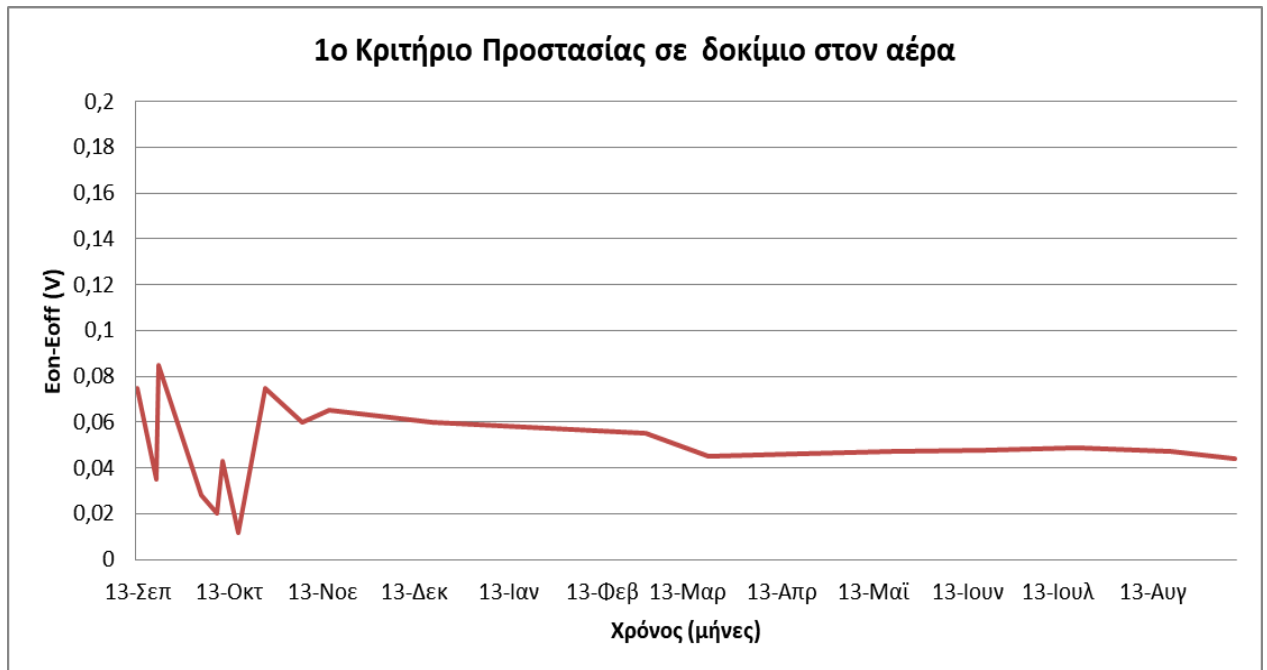
Σύμφωνα με τον πίνακα 11 η ένδειξη του δυναμικού Eon=0,502V στις 4 Οκτώβρη με ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl, για παράδειγμα, δείχνει ότι το δυναμικό της επιφάνειας είναι 0,502V πιο αρνητικό από το συγκεκριμένο ηλεκτρόδιο αναφοράς, το οποίο αντιστοιχεί σε +0,3V με το πρότυπο ηλεκτρόδιο υδρογόνου. Ένας επιπλέον υπολογισμός είναι το E συνολικό, όπου παρουσιάζει το δυναμικό μεταξύ καθόδου (οπλισμός σκυροδέματος) και ανόδου.

Για την εύκολη κατανόηση της εξέλιξης του πειράματος παρουσιάζεται ο επόμενος πίνακας 13, όπου φαίνονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την αποτελεσματική επίτευξη του πειράματος. Η κατασκευή των διακοπών βοηθούν στον έλεγχο της καθοδικής προστασίας σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο σε χρώμα και σκυρόδεμα.

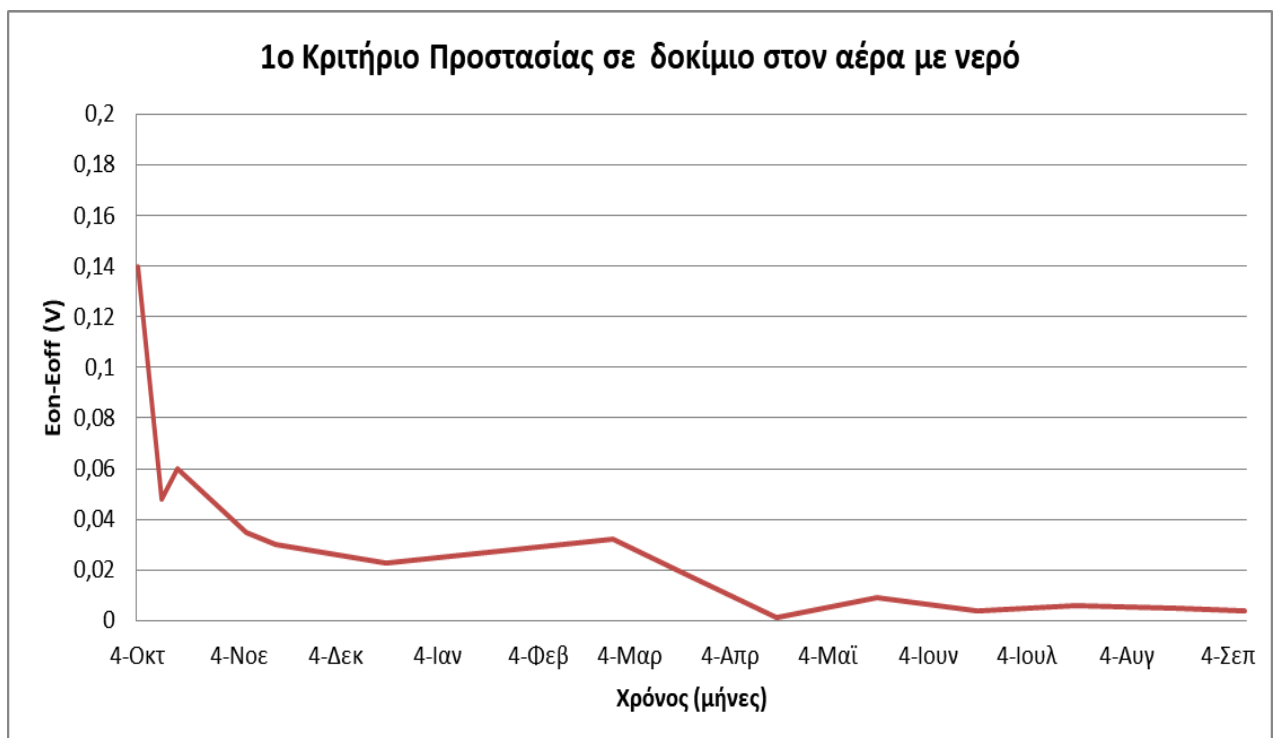
Πίνακας 13 : Ιστορικό πειραματικού μέρους

	Ιστορικό
13-Σεπ	Μετρήσεις αφου σκούριασε η άνοδος που δόθηκε
13-Σεπ	Τοποθέτηση ανοξ. Χάλυβα ως άνοδος
19-Σεπ	Μετρήσεις αφου σκούριασε ο ανοξ. Χάλυβας
20-Σεπ	Χωρίς σύνδεση για 1 μέρα
20-Σεπ	Τοποθέτηση τιτανίου ως άνοδος- Μετρήσεις
4-Οκτ	Μετρήσεις
9-Οκτ	Μετρήσεις
11-Οκτ	Μετρήσεις
16-Οκτ	Μετρήσεις
25-Οκτ	Μετρήσεις
27-Οκτ	Κατασκευή διακοπών
6-Νοε	Μετρήσεις
15-Νοε	Μετρήσεις
19-Δεκ	Μετρήσεις
27-Φεβ	Μετρήσεις
20-Μαρ	Μετρήσεις
18-Απρ	Μετρήσεις
19-Μαϊ	Μετρήσεις
19-Ιουν	Μετρήσεις
19-Ιουλ	Μετρήσεις
19-Αυγ	Μετρήσεις
9-Σεπ	Μετρήσεις

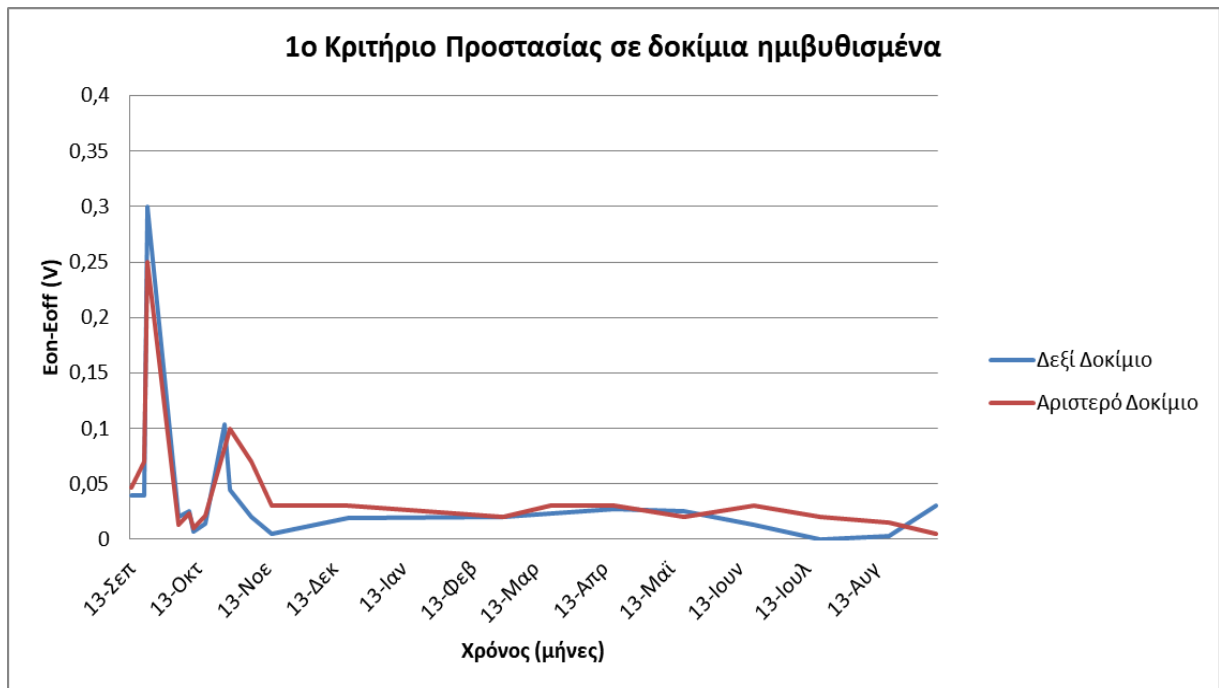
Για την διεξαγωγή συμπερασμάτων με στόχο τον έλεγχο της αποδοτικότητας της καθοδικής προστασίας παρουσιάζονται τα παρακάτω γραφήματα. Τα γραφήματα σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τα κριτήρια προστασίας και παρουσιάζουν τις μεταβολές του δυναμικού $E_{on}-E_{off}$ και του δυναμικού E_{on} σε χρονική διάρκεια ενός χρόνου. Στα πρώτα σχήματα απεικονίζονται οι μεταβολές του δυναμικού $E_{on}-E_{off}$ για τα δοκίμια που βρίσκονται ημί-βυθισμένα στο θαλασσινό νερό, στην ατμόσφαιρα πριν και μετά τη διαβροχή με νερό σε διάρκεια ενός χρόνου. Στην συνέχεια, απεικονίζονται οι μεταβολές του E_{on} για τα δοκίμια στα διαφορετικά διαβρωτικά περιβάλλοντα σε διάρκεια ενός χρόνου.



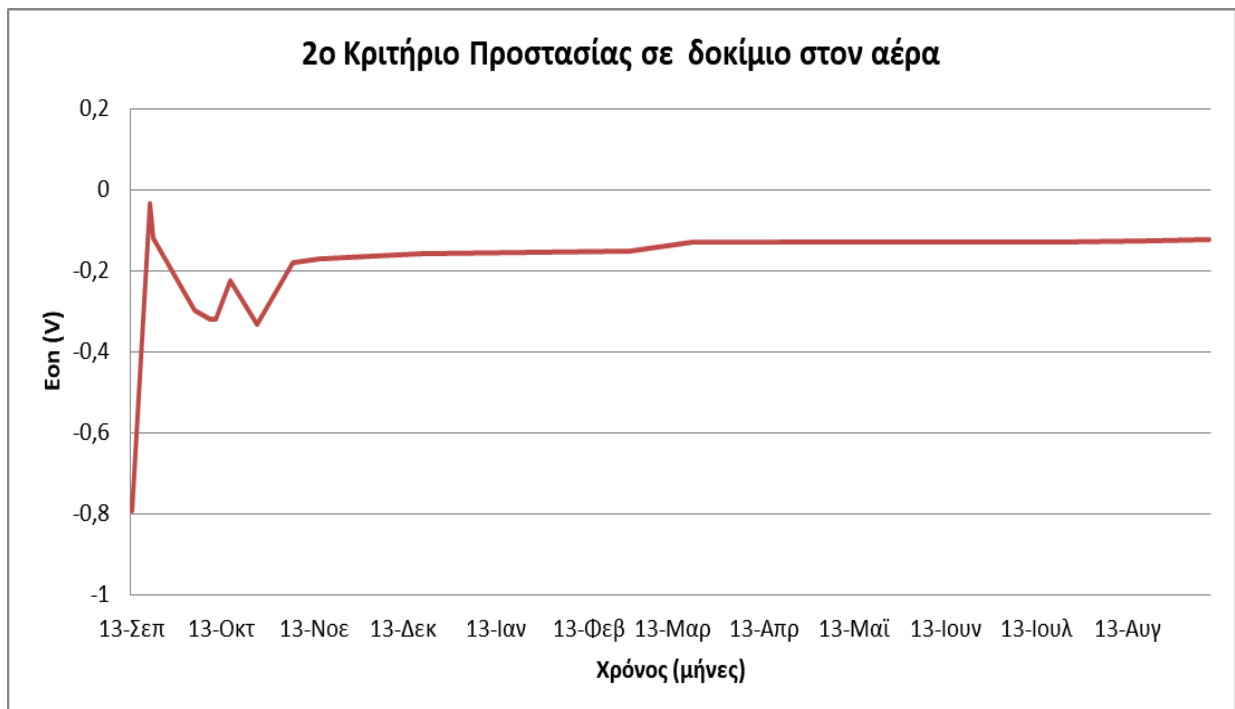
Εικόνα 56 : Μεταβολή του δυναμικού Eon- Eoff σε διάρκεια ενός χρόνου στο σπλισμένο σκυρόδεμα στην ατμόσφαιρα πριν την διαβροχή με νερό.



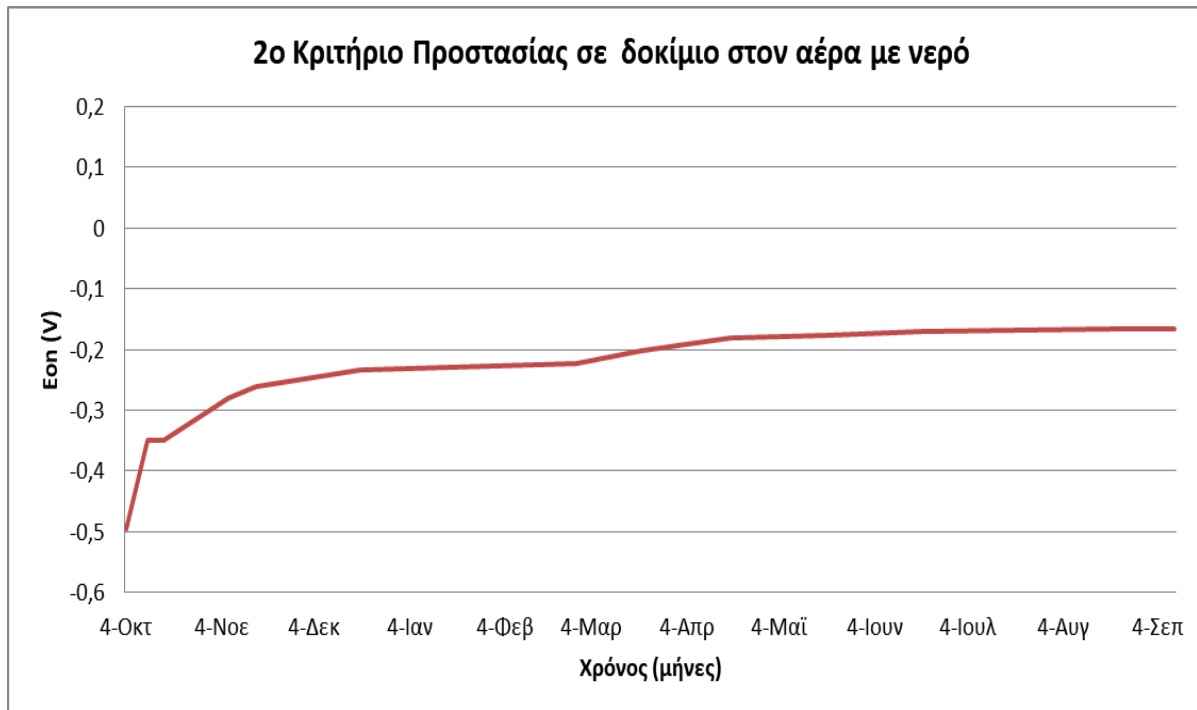
Εικόνα 57 : Μεταβολή του δυναμικού Eon- Eoff σε διάρκεια ενός χρόνου στο σπλισμένο σκυρόδεμα στην ατμόσφαιρα μετά την διαβροχή με νερό.



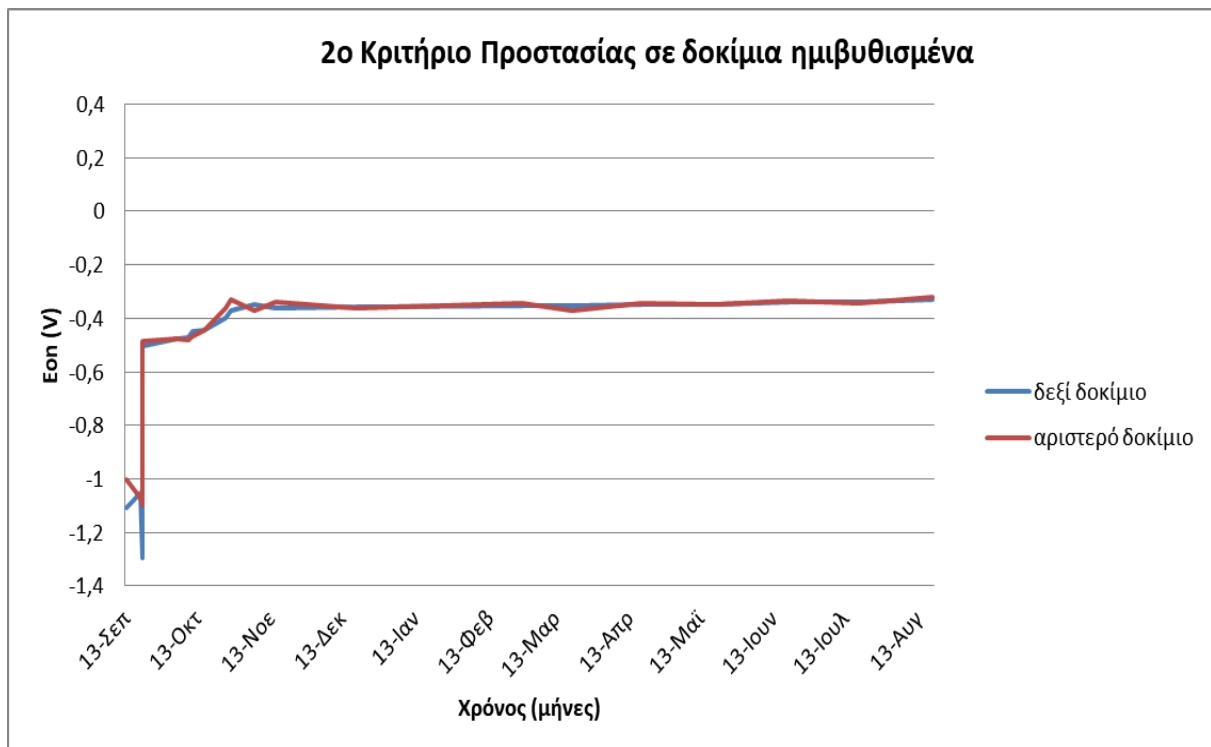
Εικόνα 58 : Μεταβολή του δυναμικού Eon- Eoff σε διάρκεια ενός χρόνου στα ημι- βυθισμένα οπλισμένα σκυρόδεμα σε θαλασινό νερό.



Εικόνα 59 : Μεταβολή του δυναμικού Eon σε διάρκεια ενός χρόνου στο οπλισμένο σκυρόδεμα στην ατμόσφαιρα πριν την διαβροχή με νερό.



Εικόνα 60 : Μεταβολή του δυναμικού Ecp σε διάρκεια ενός χρόνου στο οπλισμένο σκυρόδεμα στην ατμόσφαιρα μετά την διαβροχή με νερό.



Εικόνα 61 : Μεταβολή του δυναμικού Ecp σε διάρκεια ενός χρόνου στα ημι-βυθισμένα οπλισμένα σκυρόδεμα σε θαλασινό νερό.

Παρατηρώντας τις γραφικές παραστάσεις συμπεραίνεται ότι το πρώτο κριτήριο καθοδικής προστασίας ($E_{on} - E_{off} \leq 100\text{mV}$) φαίνεται να ικανοποιείται για όλες τις περιπτώσεις των διαβρωτικών περιβαλλόντων του οπλισμένου σκυροδέματος. Αντίθετα, το δεύτερο κριτήριο ($E_{on} \geq -0.75$) φαίνεται να μην ικανοποιείται σε κανένα από τα δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος σε διαφορετικά διαβρωτικά περιβάλλοντα. Παρατηρώντας την γραφική απεικόνιση των τιμών του δυναμικού προστασίας E_{on} για τα δοκίμια του σκυροδέματος που βρίσκονται ημιβυθισμένα σε θαλασσινό νερό, γίνεται αντιληπτό ότι δεν λειτουργεί αποτελεσματικά το STOPCOR καθώς οι τιμές κυμαίνονται από $-0,3\text{ V}$ μέχρι $-0,5\text{ V}$. Στα δοκίμια του σκυροδέματος που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα μετά το νερό φαίνεται να υπήρχε βελτίωση, αλλά όχι επαρκής για να υπάρχει προστασία στον οπλισμό.

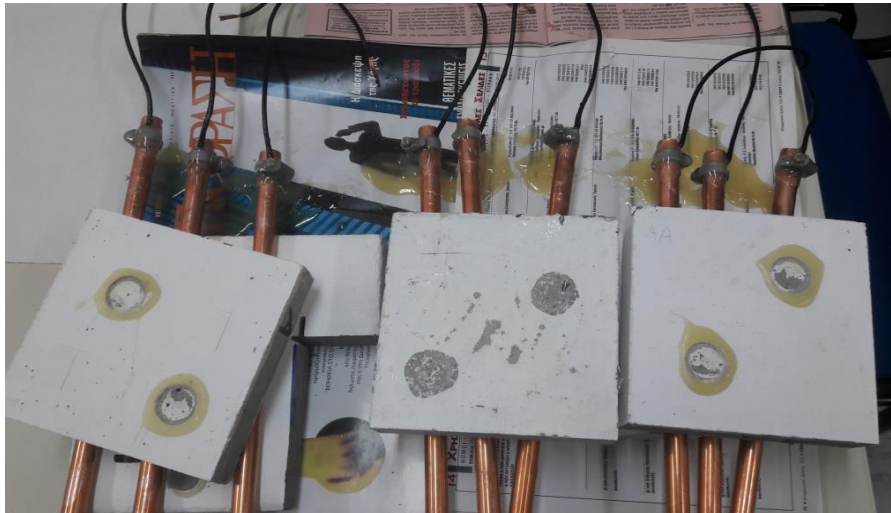
Συνεπώς, για το λόγο του ότι το σκυρόδεμα ως ηλεκτρολύτης στο χαλύβδινο οπλισμό έχει μεγάλη αντίσταση, συνιστάται μεγαλύτερη μάζα Mg για την προστασία του οπλισμού.

Το πείραμα αυτό της αποτελεσματικότητας της καθοδικής προστασίας έρχεται σε απόλυτη αντιστοιχία με την πραγματικότητα σε οπλισμένα σκυροδέματα κτηρίων τα οποία βρέχονται από την θάλασσα, αλλά και σε αυτά τα οποία βρίσκονται σε υψηλότερο επίπεδο από την θάλασσα (στην ατμόσφαιρα). Η ατμόσφαιρα παρουσιάζει υγρασία και ειδικότερα κοντά στην θάλασσα.

6.5 Καθοδική προστασία σε χάλκινους σωλήνες σε θαλασσινό νερό και στο έδαφος

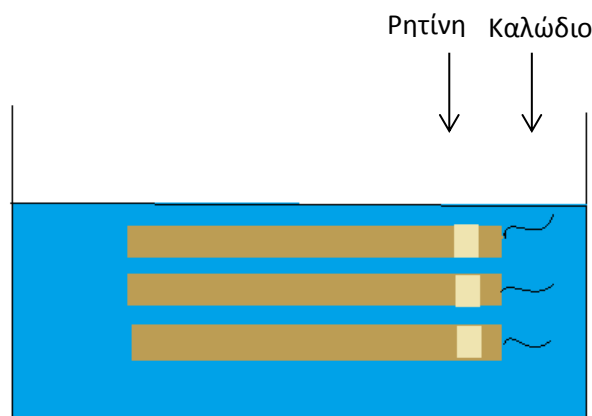
6.5.1 Κατασκευή δοκιμών

Για την δημιουργία κατάλληλων δοκιμών χαλκού έτσι ώστε να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα της καθοδικής προστασίας έναντι της διάβρωσης, τοποθετήθηκαν καλώδια που βοηθάνε το ρεύμα να περνάει και επίσης βοηθούν στη μέτρηση του δυναμικού. Η ρητίνη και στην περίπτωση αυτή βοηθάει στην απομόνωση του σημείου ένωσης του δοκιμίου με το καλώδιο από το ηλεκτρολυτικό περιβάλλον (NACE 1983).



Εικόνα 62 : Κατασκευή χάλκινων δοκιμών (τοποθέτηση καλωδίων, ρητίνης).

Τα δοκίμια στην συνέχεια τοποθετήθηκαν σε γλυκό νερό και σε έδαφος όπως παρουσιάζεται στην εικόνα στην συνέχεια.



Εικόνα 63 : Δοκίμια χάλκινων σωλήνων σε γλυκό νερό.

6.5.2 Εφαρμογή Καθοδικής Προστασίας

Το σύστημα καθοδικής προστασίας ελέγχθηκε στην περίπτωση χάλκινων σωλήνων μέσα σε θαλασσινό περιβάλλον (περιεκτικότητας 3,5% NaCl) και στο έδαφος. Το ανόδιο μαγνησίου λειτουργεί ως εξωτερική πηγή το οποίο εφαρμόζεται μεταξύ της καθόδου (προστατευμένη δομή/χάλκινοι σωλήνες) και της ανόδου (τιτάνιο). Η διάβρωση γίνεται αντιληπτή στην περιοχή της ανόδου όπου ρεύμα περνάει από την μεταλλική δομή προς τον ηλεκτρολύτη (χώμα ή νερό). Το τιτάνιο λειτουργεί ως άνοδος για το σύστημα. Στην περίπτωση του εδάφους, η διάβρωση γίνεται αντιληπτή μετά από έντονη υγρασία στην

περιοχή που είναι θαμμένοι οι μεταλλικοί σωλήνες. Για αυτό το λόγο, συχνή θα πρέπει να είναι η ενυδάτωση του εδάφους σε τακτά χρονικά διαστήματα.



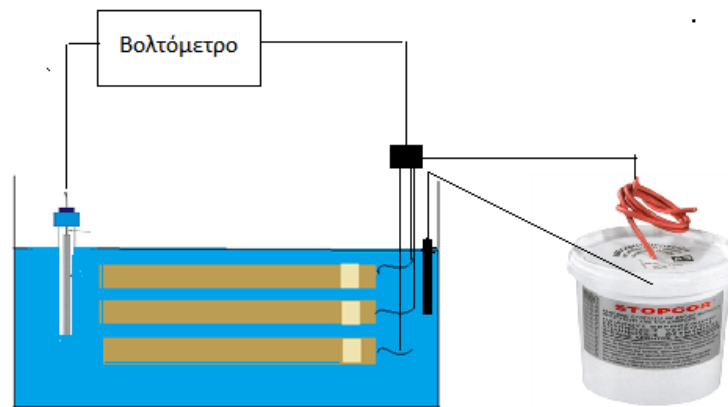
Εικόνα 64 : Εφαρμογή καθοδικής προστασίας στο έδαφος και νερό.

6.5.3 Μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης

Η μέτρηση του δυναμικού των χάλκινων σωλήνων ως προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς παρέχει πληροφορίες για την πιθανότητα διάβρωσής τους. Ως ηλεκτρόδια αναφοράς χρησιμοποιούνται το ηλεκτρόδιο καλομέλανος $Ag / AgCl / KCl$. Απαραίτητη επίσης η χρήση ενός βολτομέτρου.

Αναφορικά με το BS EN 12954:2001 (British Standards, 2001) - πίνακας 5, οι τιμές του μετρούμενου δυναμικού διάβρωσης πριν την επιβολή καθοδικής προστασίας, έτσι ώστε να αποφευχθεί η αρχή διάβρωσης στο έδαφος θα πρέπει κυμαίνονται μεταξύ $-0,2\text{ V}$ και 0 V .

Για την μέτρηση του δυναμικού προστασίας, το ηλεκτρόδιο αναφοράς τοποθετήθηκε στον ηλεκτρολύτη όπου είναι εμβαπτισμένα τα χάλκινα δοκίμια και ταυτόχρονα συνδέθηκε με το βολτόμετρο. Στο βολτόμετρο επίσης συνδέθηκε το καλώδιο που έφερε το θυσιαζόμενο ανόδιο μαγνησίου (STOPCOR), όπου αυτό με την σειρά του είχε συνδεθεί με το χάλκινους σωλήνες. Ο μετρήσεις του δυναμικού που ελήφθησαν για κάθε δοκίμιο κατεγράφησαν σε πίνακα 14. Για την ευκολότερη κατανόηση του συστήματος σε σπλισμένο σκυρόδεμα σχεδιάστηκε το παρακάτω σχέδιο.



Εικόνα 65 : Εφαρμογή καθοδικής προστασίας.

Οι μετρήσεις του δυναμικού προστασίας έγιναν σύμφωνα με το κριτήριο καθοδικής προστασίας για χαλκό θαμμένο σε έδαφος. Το κριτήριο για τον έλεγχο της αποδοτικότητας της καθοδικής προστασίας, σύμφωνα με BS EN 12954:2001 (British Standards, 2001), δηλώνει ότι μετά από 10 δευτερόλεπτα συνεχόμενου ρεύματος στο σύστημα και μετά το πέρας 3 δευτερολέπτων μετά το κλείσιμο του ανορθωτή (EN Standards, 1999), η τιμή του δυναμικού προστασίας E_{off} δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τα $-0,2V$ ($E_{off} \leq -200 \text{ mV}$).

Στην περίπτωση των χάλκινων σωληνώσεων στο νερό σύμφωνα με το EN 12473:2000 (EN Standards, 2000b) το δυναμικό προστασίας $E_{on} = E_{off}$. Η τιμή του δυναμικού προστασίας E_{on} δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τα $-0,2V$ ($E_{off} \leq -200 \text{ mV}$).

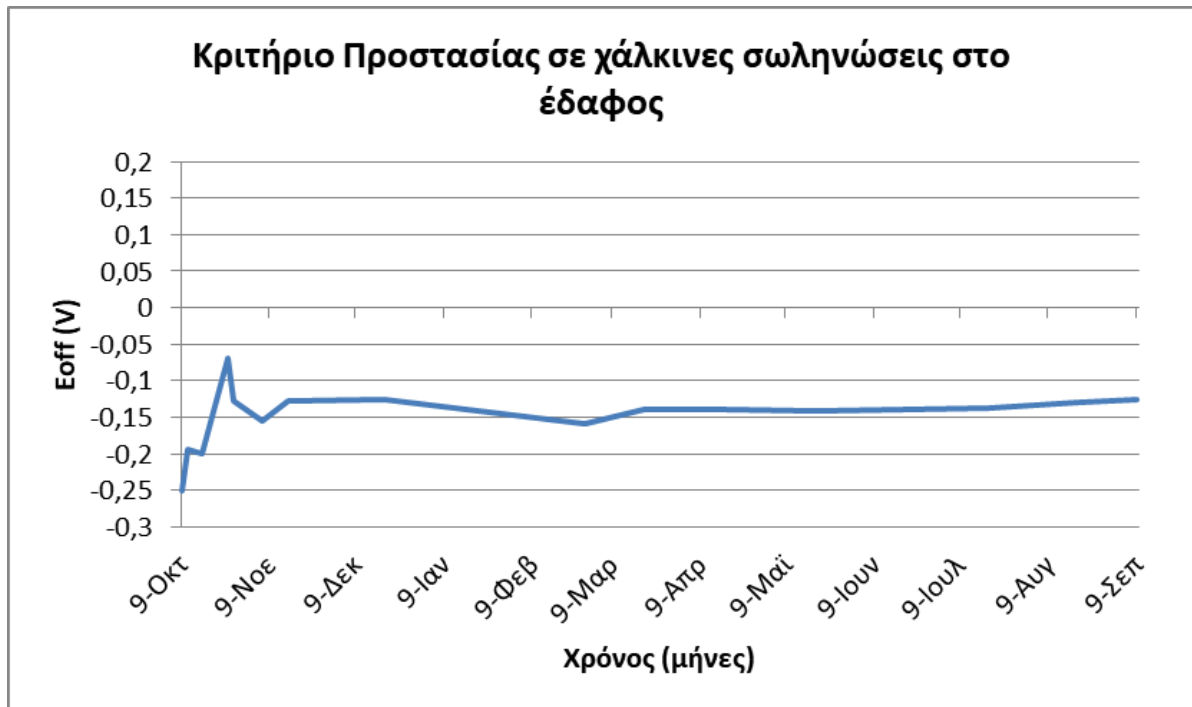
6.5.4 Αποτελέσματα-Συμπεράσματα

Στον επόμενο πίνακα απεικονίζονται οι μετρήσεις του δυναμικού προστασίας στους χάλκινους σωλήνες. Στην περίπτωση του εδάφους, πραγματοποιούσαμε συχνή ενυδάτωση του χώματος καθώς η διαβρωτικότητα του εξαρτάται από την παρουσία υγρασίας, αλάτων και την δυνατότητα διάχυσης του οξυγόνου.

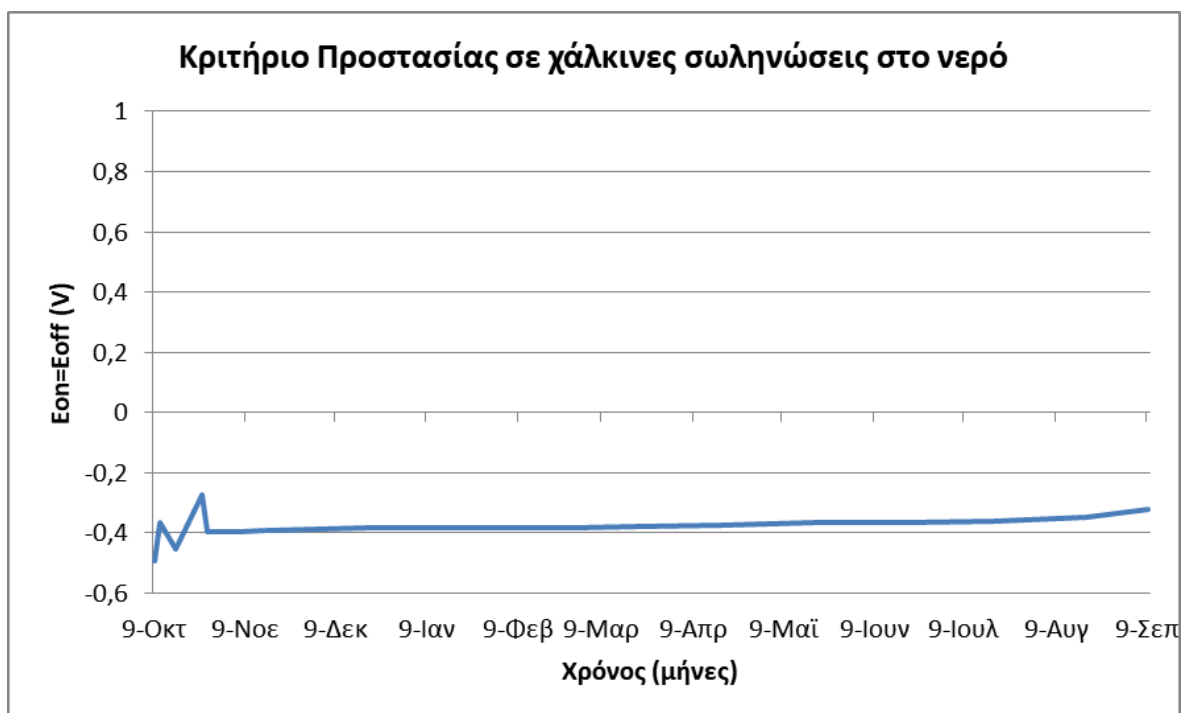
Πίνακας 14 : Πίνακας μετρήσεων των δυναμικών προστασίας σε χάλκινους σωλήνες στο έδαφος και στο νερό με ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl

	Νερό	Χώμα	
	$E_{on}=E_{off}$	E_{on}	E_{off}
13-Σεπ	-	-	-
19-Σεπ	-	-	-
20-Σεπ	-	-	-
20-Σεπ	-	-	-
4-Οκτ	-	-	-
9-Οκτ	-0,494	-0,3	-
11-Οκτ	-0,363	-0,248	-0,194
16-Οκτ	-0,453	-0,255	-0,2
25-Οκτ	-0,273	-0,24	-0,07
27-Οκτ	-0,397	-0,257	-0,128
6-Νοε	-0,395	-0,21	-0,154
15-Νοε	-0,391	-0,241	-0,128
19-Δεκ	-0,384	-0,245	-0,125
27-Φεβ	-0,382	-0,241	-0,158
20-Μαρ	-0,38	-0,23	-0,14
18-Απρ	-0,374	-0,228	-0,14
19-Μαϊ	-0,365	-0,224	-0,141
19-Ιουν	-0,363	-0,223	-0,14
19-Ιουλ	-0,36	-0,219	-0,137
19-Αυγ	-0,349	-0,214	-0,13
9-Σεπ	-0,322	-0,201	-0,125

Οι τιμές E_{off} βοήθησαν στην γραφική απεικόνιση της μεταβολής του δυναμικού προστασίας E_{off} κατά την διάρκεια ενός χρόνου. Στην πρώτη γραφική απεικόνιση, παρουσιάζεται η μεταβολή του δυναμικού προστασίας E_{off} στο έδαφος. Στην δεύτερη γραφική απεικόνιση, παρουσιάζεται η μεταβολή του δυναμικού προστασίας $E_{on}= E_{off}$ στο νερό.



Εικόνα 66 : Μεταβολή του δυναμικού E_{off} σε διάρκεια ενός χρόνου σε χάλκινους σωλήνες θαμμένους στο έδαφος.



Εικόνα 67 : Μεταβολή του δυναμικού E_{off}= E_{on} σε διάρκεια ενός χρόνου σε χάλκινους σωλήνες βυθισμένους σε γλυκό νερό.

Παρατηρώντας την γραφική απεικόνιση των τιμών του δυναμικού προστασίας για τα δοκίμια σε έδαφος και νερό, συνειδητοποιούμε ότι το STORCOR λειτουργεί αποτελεσματικά στην περίπτωση του νερού, ενώ αντίθετα στο έδαφος υπήρχε μια σχετική βελτίωση μόνο κατά την εβδομαδιαία προσθήκη νερού του χώματος, αυτή όμως δεν ήταν επαρκής για να υπάρχει προστασία στο χάλκινο σωλήνα. Αυτό είναι φανερό από τις τιμές του δυναμικού προστασίας στο νερό που κυμαίνονται για ένα χρόνο από $-0,3V$ μέχρι $-0,4V$. Ενώ, στο χώμα οι τιμές είναι μεγαλύτερες του $-0,2V$.

Συνεπώς, με την παρατήρηση αυτή, για το λόγο ότι το έδαφος έχει μεγαλύτερη ηλεκτρική αντίσταση σε σχέση με το νερό, συνιστάται μεγαλύτερο εξάρτημα για την προστασία του οπλισμού, δηλαδή μεγαλύτερη ποσότητα μαγνησίου.

Το πείραμα αυτό της αποτελεσματικότητας της καθοδικής προστασίας έρχεται σε απόλυτη αντιστοιχία με την πραγματικότητα για σωληνώσεις σε οικίες που έχουν συνήθως παρόμοιες διατομές σωληνώσεων, που είναι θαμμένες στο έδαφος ή βρίσκονται σε γλυκά νερά ή υφίστανται την επίδραση του θαλασσινού νερού όταν ο υδάτινος ορίζοντας έχει μολυνθεί από την θάλασσα.

7. Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Η καθοδική προστασία είναι η μόνη διαδικασία, η οποία μπορεί να αναστείλει και να αντιστρέψει το δυναμικό διάβρωσης, μηδενίζοντας (θεωρητικά) την ταχύτητα διάβρωσης. Η μέθοδος της καθοδικής προστασίας εφαρμόστηκε στην δεκαετία του 1900-1910 για την προστασία των αγωγών στο έδαφος και στην συνέχεια επεκτάθηκε στην προστασία πλοίων, μεταλλικών δεξαμενών και άλλων μεταλλικών κατασκευών. Η καθοδική προστασία συνίσταται στην εφαρμογή αντιθέτου δυναμικού από το δυναμικό διάβρωσης, έτσι ώστε η προς προστασία μεταλλική επιφάνεια να λάβει τον ρόλο της καθόδου. Στην περίπτωση αυτή παύει να ισχύει η αντίδραση οξείδωσης του μετάλλου και στη θέση της πραγματοποιείται η αντίδραση αναγωγής.

Για να μπορεί να διεξαχθεί η καθοδική προστασία απαραίτητο είναι το δυναμικό συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο μπορεί να παρέχεται από πηγή συνεχούς ρεύματος ή από την χρήση θυσιαζόμενης ανόδου (ενός μετάλλου ή κράματος υψηλότερου δυναμικού από το προς προστασία μέταλλο). Επίσης, απαραίτητη για την διεξαγωγή της καθοδικής προστασίας με επιβολή εξωτερικού συνεχούς ρεύματος είναι η ύπαρξη βοηθητικής ανόδου, όπου πραγματοποιούνται οι οξειδωτικές δράσεις και από αυτήν εξαρτάται η διάρκεια ζωής της καθοδικής προστασίας.

Πολλά είναι τα είδη διαβρωτικού περιβάλλοντος που συντελούν στην έναρξη της διάβρωσης των μεταλλικών εξοπλισμών. Ορισμένα από αυτά, όπως αναλύθηκαν περαιτέρω στην παρούσα εργασία είναι, το σκυρόδεμα και το έδαφος ή το νερό. Στην περίπτωση του οπλισμένου σκυροδέματος ο οπλισμός είναι χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος (black steel). Στην περίπτωση του νερού ή του εδάφους οι σωλήνες ήταν κατασκευασμένοι από χαλκό. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την διαβρωτικότητα του σκυροδέματος είναι η ενανθράκωσή του, η επίδραση χλωριόντων και τυχόν ρωγμές στο σκυρόδεμα. Το έδαφος και το νερό σε συνδυασμό με την υγρασία, την έντονη αλκαλικότητα και την ύπαρξη χλωριόντων ή θεικών ιόντων συντελούν και αυτά με την σειρά τους στην έναρξη της διάβρωσης. Ένας από τους βασικούς παράγοντες για τον έλεγχο της καθοδικής προστασίας είναι η ειδική αντίσταση του ηλεκτρολύτη. Η ειδική αντίσταση είναι το αντίστροφο της αγωγιμότητας και χαρακτηρίζει την ικανότητα του ηλεκτρολύτη να μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια. Το πορώδες του σκυροδέματος, η περιεκτικότητα σε άλατα έχουν μεγάλη επίδραση στην αντίσταση του ηλεκτρολύτη. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι το σκυρόδεμα και το χώμα σε αντίθεση με το νερό παρουσιάζουν μεγάλη ειδική αντίσταση.

Σκοπός της εργασίας αυτή είναι να εξετασθεί η δυνατότητα καθοδικής προστασίας σε οπλισμένα δοκίμια σκυροδέματος και σε χάλκινους σωλήνες θαμμένους στο έδαφος και σε γλυκό νερό. Ως πηγή ρεύματος χρησιμοποιήθηκε θυσιαζόμενο ανόδιο μαγνησίου

(βλέπε παράγραφο. 5). Από τους πίνακες 1 και 2 παρατηρούνται τα συμπεράσματα από τις μετρήσεις ενός χρόνου για τον δυναμικό προστασίας και για το συνολικό δυναμικό του εξοπλισμού (STOPCOR). Η μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια βολτομέτρου και ηλεκτροδίου αναφοράς Ag/AgCl. Το ηλεκτρόδιο Ag/AgCl συνηθίζεται σε κατασκευές από σκυρόδεμα, αλλά και σε χώρους εργαστηρίου και σε θαλασσινό νερό. Τέλος, η ολοκλήρωση των μετρήσεων και η αξιολόγηση αυτών έγιναν σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα EN 12473:2000 για νερό, EN 12954:2001 για χώμα, EN 12696:2000 για σκυρόδεμα και δεδομένα από τον πίνακα 5 του EN 12954: 2001.

Τέλος, αναλύοντας τα γραφήματα από το δυναμικό προστασίας του οπλισμού, του χαλκού σε νερό και χώμα και του δυναμικού του εξοπλισμού STOPCOR σε οπλισμένο σκυρόδεμα, παρατηρήθηκε ότι το σύστημα λειτουργεί αποτελεσματικά στους χάλκινους σωλήνες στο νερό. Αντίθετα, λόγω της αυξημένης ειδικής αντίστασης σε σκυρόδεμα και χώμα το σύστημα χρειάζεται μεγαλύτερη ποσότητα μαγνησίου, άλλωστε σύμφωνα με τα βιβλιογραφικά δεδομένα και τον κατασκευαστή το μαγνήσιο έχει δυνατότητα να παρέχει 1230 Ah/kg.

Ακόμη, κατά την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος η άνοδος που δόθηκε από το κατασκευαστή σε σύντομο χρονικό διάστημα (τριών ημερών) διαβρώθηκε. Για αυτόν τον λόγο συνιστάται αλλαγή της προτεινόμενης ανόδου με υλικό το οποίο να συνδυάζει αυξημένη ηλεκτρική αγωγιμότητα, χαμηλό ρυθμό διάβρωσης, καλές μηχανικές ιδιότητες έτσι ώστε να μπορεί να παραλάβει τις φορτίσεις που ενδέχεται να παρουσιαστούν κατά την τοποθέτηση και λειτουργία της, να μπορεί εύκολα να κατασκευαστεί σε διάφορα σχήματα, να έχει χαμηλό κόστος και να μπορεί να αντέξει σε υψηλές εντάσεις ρεύματος χωρίς να σχηματιστεί ανθεκτικό στρώμα οξειδίου. Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε καταρχήν ανοξειδωτος χάλυβας όπου όμως διαβρώθηκε σε σύντομο χρονικό διάστημα παρόλο που εμφανίζει αυξημένη ηλεκτρική αντοχή σε διάβρωση σε σύγκριση με άλλα υλικά. Συμπερασματικά, παρά του αυξημένου σχετικά κόστους, το τιτάνιο ως άνοδος προτείνεται για την αποτελεσματικότητά του σε συστήματα καθοδικής προστασίας σε έντονα διαβρωτικά περιβάλλοντα. Ιδιαίτερα όταν απαιτείται μεγάλη διάρκεια ζωής της ανόδου.

8. Γενικά Συμπεράσματα

- Η χρήση της προτεινόμενης ανόδου είναι επιτυχής σε περίπτωση νερού ή εδάφους χαμηλής ειδικής αντίστασης.
- Αντίθετα σε έδαφος υψηλής ειδικής αντίστασης ή σε σκυρόδεμα δεν είναι επιτυχής και χρειάζεται αύξηση της μάζας του μαγνησίου.

9. Προτάσεις για την συνέχιση της έρευνας.

Ο κατασκευαστής της θυσιαζόμενης ανόδου προτείνει την αλλαγή της κάθε τρία χρόνια. Επομένως το πείραμα για το γλυκό νερό θα πρέπει να συνεχισθεί άλλα δύο χρόνια.

Για έδαφος και σκυρόδεμα θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί θυσιαζόμενη άνοδος μεγαλύτερης μάζας ώστε να επιτευχθεί χρόνος ζωής 3 χρόνια.

10. Βιβλιογραφικές Αναφορές

- American Gas Association (1986) *Technical Services Corrosion Control/System Protection, Gas Engineering and Operating Practices Series*, American Gas Association, σελ 6, 19, 46, 47.
- Ashworth, V., Booker C. J. L. (1986) *Cathodic Protection: Theory and Practice*, Birmingham : Institution of Corrosion Science and Technology, σελ 17, 18, 28.
- ASTM Standards (1999) *C876-91 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete USA* :ASTM
- ASTM Standards (2013) *G97 97 Standard Test Method for Laboratory Evaluation of Magnesium Sacrificial Anode Test Specimens for Underground Applications USA* : ASTM
- Baecmann, von W., Schwenk W. and Prinz W. (1997), *Cathodic Corrosion Protection, Theory and Practice of Electrochemical Protection Processes Third Edition*, Houston Texas : Gulf Professional Publishing, σελ 79, 140, 191.
- British Standards, (2000) *EN 12473:2000 General principles of cathodic protection in sea water UK* : British Standards
- British Standards, (2001) *EN 12954:2001 Cathodic protection of buried or immersed metallic structures- General principles and application for pipelines. UK* : British Standards
- Chang J.J. (2002) *A study of the bond degradation of rebar due to cathodic protection current*, Article in *Cement and Concrete Composites*: Elsevier, σελ 662.
- Chess, P. Gronvold and Karvon (1998) *Cathodic Protection Steel in Concrete*. Copenhagen : Denmark, σελ 42.
- Daily, S. (2002) *Using Cathodic Protection to Control Corrosion of Reinforced Concrete Structures in Marine Environment*. Ohio USA : Corpro Companies, Inc, σελ 1, 2, 6.
- Daily, S. and Somerville S. (2002) *Using Cathodic Protection to Control Corrosion of Masonry Steel Framed Buildings*. Ohio USA : Corpro Companies, Inc, σελ 2, 3.
- DIN standards, (1985) *50929 Probability of corrosion of metallic materials when subject to corrosion from the outside*. Germany : DIN institute
- EN Standards (1999) *prEN 13509 Cathodic Protection Measurement Techniques*. EN Standards.
- EN Standards, (1996) *prEN 12696-1 Cathodic protection of steel in concrete – Part 1 : Atmospherically exposed concrete*. EN Standards

- Francis, P.E. (1981) *Cathodic Protection in Practice*, σελ 9.
- Hassanein, A. M., Glass G. K., Buenfeld N. R. (2002) *Protection current distribution in reinforced concrete cathodic protection system*. Article in *Cement and Concrete Composites*: Elsevier, σελ 164.
- ISO Standards (2006) 12473 *General principles of cathodic protection in sea water*. ISO Standards
- ISO Standards, (2003) 15589-1 *Petroleum and natural gas industries - Cathodic protection of pipeline transportation systems Part 1: On-land pipelines*. ISO Standards.
- NACE, (1983) *Standard RP-01-76 Corrosion Control of Steel, Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production*. USA : NACE
- NACE, (1986) *Standard RP-01-69 Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems*. USA : NACE
- Parker, M. (1999) *Pipe Line Corrosion and Cathodic Protection*. Houston Texas : Gulf Publishing Company, σελ 45.
- Pritula, V.A. (1953) *Cathodic Protection of Pipelines and Storage Tanks*, Great Britain : Department of Scientific and Industrial Research, σελ 5.
- Sheppard, W. (1986) *Corrosion and Chemical Resistant Masonry Materials Handbook*, New Jersey : Noyes Publications, σελ 60.
- US Navy, (1974) *Design Manual Electrical Engineering*. USA : Department of Navy, σελ 4, 5, 17.
- www.Stopcor.gr . τελευταία επίσκεψη : 17/9/2018
- Αργυροπούλου. Β. (2018) *Συντήρηση Μεταλλικών Αντικειμένων, Ενότητα 1* Αθήνα : Ανώτατο Τεχνολογικό Ίδρυμα Αθήνας, σελ 25, 27, 30.
- Δημάδη, Κ. Κατσενίου, Γ. (2012) *Διάβρωση Χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος & τρόποι αποκατάστασης*. Αθήνα : Τμήμα Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, σελ 1, 2, 3.
- Ζαχαροπούλου, Α. (2014). *Επίδραση Πρόσθετων-Προσμικτών στην διάβρωση του χάλυβα οπλισμού του σκυροδέματος*. Αθήνα : Τμήμα Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, σελ 8, 10, 11, 41, 42.
- Ζέρης, Χ. (2013) *Βασικές Αρχές Σχεδιασμού Υλικά*, Αθήνα : Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ.
- Ιωαννίδης, Μ. (2018), *Αξιολόγηση της αντοχής σε νηματοειδή διάβρωση επικαλυμμένου κράματος αλουμινίου*. Θεσσαλονίκη : Τμήμα Μηχανολόγων Α.Π.Θ., σελ 12, 18.

- Ιωσηφίδου, Α. (2009) *Προστασία Χαλύθων σε Θαλάσσιο Περιβάλλον με Αντιδιαβρωτικό Επικαλυπτικό που περιέχει πιγμέντο από ανοξείδωτο χάλυβα*. Αθήνα : Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, σελ 10, 12, 15, 22.
- Καραντώνης, Α. (2018) *Φθορά και Προστασία των Υλικών*. Αθήνα : Σημειώσεις Μαθήματος Μεταπτυχιακού «Επιστήμης και Τεχνολογίας των Υλικών», σελ 47.
- Κορτίνας, Κ. και Κασβίκης Α. (2015) *Καθοδική προστασία μεταλλικών κατασκευών*. Κωνσταντίνος Κοζάνη : Ανώτατο Τεχνολογικό Ίδρυμα Δυτικής Μακεδονίας, σελ 10, 16, 17, 22, 26, 30.
- Μιχάλης, Π. Δημητρίου Σ., (2007) *Μελέτη Σύνθεσης Σκυροδέματος*. Θεσσαλονίκη : Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, σελ 16 .
- Μπατής, Γ. (2007) *Χρήση Νέων Υλικών για την Αύξηση της Ανθεκτικότητας των Κατασκευών*. Αθήνα : ημερίδα του ΤΕΕ, σελ 3, 4.
- Μπατής, Γ., (1999) *Φθορά και Προστασία των Υλικών*. Αθήνα : Εκδόσεις ΕΜΠ, σελ 1, 4, 18, 24, 26.
- Μπράβου, Σ., Στασινοπούλου, Ε. (2006), *Διάβρωση των Μετάλλων στο Έδαφος*. Αθήνα : Τμήμα Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, σελ 3, 4, 5, 6, 7, 10.
- Σπυρέλλης, Ν. (1997) *Τεχνολογία Επιμεταλλώσεων*. Αθήνα : Τμήμα Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ.
- Υφαντής, Δ. (2000) *Υλικά – Διάβρωση και Προστασία*. Αθήνα : Εκδόσεις ΕΜΠ, σελ 25, 15.
- Χαλατσόπουλος, Μ. (2009) *Αίτια και είδη διάβρωσης των μεταλλικών επιφανειών*. Νέα Μηχανιώνα : Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού Μακεδονίας, Σχολή Μηχανικών, σελ 10, 13, 14, 16, 25.

11. Αναφορά Εικόνων

Εικόνα 1 : Φαινόμενο διάβρωσης σε μέταλλο (αλυσίδα άγκυρας)	10
Εικόνα 2 : Διάβρωση σωλήνα .(American Gas Association, 1986, σελ 6).....	12
Εικόνα 3 : Ομοιόμορφη διάβρωση	14
Εικόνα 4 : Αμαύρωμα ασημικών.....	14
Εικόνα 5 : Γαλβανική διάβρωση	15
Εικόνα 6 : Διαδικασία της γαλβανικής διάβρωσης (Αργυροπούλου, 2018, σελ 25).....	16
Εικόνα 7 : Διάβρωση εσοχής.....	17
Εικόνα 8 : Γραφική αναπαράσταση των περιοχών που δημιουργήθηκαν από την διάβρωση εσοχής.	18
Εικόνα 9 : Διάβρωση με βελονισμούς	19
Εικόνα 10 : Περικρυσταλλική διάβρωση	20
Εικόνα 11 : Περικρυσταλλική διάβρωση μετά από θερμική διεργασία στους 500-800 °C.....	21
Εικόνα 12 : Πιθανοί μηχανισμοί κατά την φθορά λόγω μηχανικής διάβρωσης.	21
Εικόνα 13 : Διάβρωση υπό μηχανική τάση.....	23
Εικόνα 14 : Η μεταβολή της σχετικής υγρασίας (42%, 78%, 100%) για την περίπτωση των 10 γραμμαρίων νερού σε ένα κυβικό μέτρο αέρα σε θερμοκρασία 25°C, 15°C και 5°C, αντίστοιχα.	24
Εικόνα 15 : Η εξάρτηση της ταχύτητας διάβρωσης με την σχετική υγρασία	25
Εικόνα 16 : Η διάβρωση του χάλυβα στον αέρα σε διάφορες θερμοκρασίες.	25
Εικόνα 17 : Η διάβρωση του χάλυβα σε αεριζόμενο νερό σε διάφορα pH σε συνήθη θερμοκρασία	26
Εικόνα 18 : Οι μηχανικές ανωμαλίες στην επιφάνεια της μεταλλικής κατασκευής.	27
Εικόνα 19 : Παραδείγματα διάβρωσης του χαλκού.	30
Εικόνα 20 : Ανάπτυξη τυρβώδους ροής λόγω της μορφής του εξαρτήματος.....	31
Εικόνα 21 : Γαλβανικό κελί με δυο διαφορετικά μέταλλα.	32
Εικόνα 22 : Κελί εμπλουτισμού από διαφορετικά είδη εδάφους.	33
Εικόνα 23 : Κελί εμπλουτισμού με οξυγόνο.	34
Εικόνα 24 : Κελί θερμοκρασίας.....	34
Εικόνα 25 : Κελί από μηχανική τάση.....	35
Εικόνα 26 : Κόκκος αδρανούς στις πρώτες ώρες της ενυδάτωσης (Ζαχαροπούλου, 2014, σελ 11).....	47
Εικόνα 27 : Κοκκομετρική σύνθεση	49
Εικόνα 28 : Οπλισμός σκυροδέματος μετά την ύπαρξη χλωρίων και διοξειδίου του άνθρακα.	52
Εικόνα 29 : Σχηματισμός μακροστοιχείου σε σκυρόδεμα με χλωριόντα. (Μπατής, 1999, σελ 24)	54
Εικόνα 30 : Σχηματική παράσταση δημιουργίας ρωγμών στο σκυρόδεμα λόγω σχηματισμού προϊόντων διάβρωσης. (Μπατής, 2007, σελ 3)	55
Εικόνα 31 : Η κινητική της καθοδικής και της ανοδικής αντίδρασης συναρτήσει του ηλεκτρικού δυναμικού.(Ashworth and Booker, 1986, σελ 17)	58
Εικόνα 32 : Η άνοδος και η κάθοδος σε ηλεκτρικά αγωγίμο ηλεκτρολύτη. (Αργυροπούλου, 2018, σελ 27).....	60
Εικόνα 33 : Καμπύλη απόδοσης για ανόδους μαγνησίου	62
Εικόνα 34 : Εκτίμηση χρόνου ζωής ανοδίων μαγνησίου σε σχέση με το απαιτούμενο ρεύμα προστασίας. (US Navy, 1974, σελ 4-5-18).....	63
Εικόνα 35 : Το σύστημα της καθοδικής προστασίας με επιβολή ρεύματος.	64

Εικόνα 36 : Η εφαρμογή της καθοδικής προστασίας στο έδαφος.....	65
Εικόνα 37 : Καθοδική προστασία ενός μετάλλου με εφαρμογή ρεύματος i_{app} -(Καραντώνης, 2018)	66
Εικόνα 38 : Η πτώση της τάσης σε σχέση με την ειδική αντίσταση, την απόσταση των ράβδων και το βάθος της επικάλυψης του σκυροδέματος.....	70
Εικόνα 39 : Διαμόρφωση γαλβανικού στοιχείου με ηλεκτρόδιο αναφοράς το Π.Η.Υ. και Fe/Fe^{2+} .	73
Εικόνα 40 : Η σχέση μεταξύ E και της πιθανότητας διάβρωσης και καθοδικής προστασίας του χάλυβα.(Ashworth and Booker, 1986, σελ28)	76
Εικόνα 41 : Σύγκριση των δυναμικών χρησιμοποιώντας $Cu/CuSO_4$, $Ag/AgCl$ και Zn .(British Standards, 2000)	76
Εικόνα 42 : Ηλεκτρόδιο στην ηλεκτροχημεία (απλουστευμένο).....	82
Εικόνα 43 : Δυναμικό ως προς S.H.E (V)	83
Εικόνα 44 : Ηλεκτρόδιο αναφοράς $Ag/AgCl/Cl^-$	84
Εικόνα 45 : Έλεγχος μέσω του βολτομέτρου της αποτελεσματικότητας της καθοδικής προστασίας.	85
Εικόνα 46 : Ανάπτυξη της αντοχής του τσιμεντοπολιτού νε το χρόνο.	90
Εικόνα 47 : Δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος σε θαλασσινό νερό (3,5% NaCl)	90
Εικόνα 48 : Δημιουργία του οπλισμένου σκυροδέματος.	91
Εικόνα 49 : Εφαρμογή καλωδίων και ρητίνης για την ολοκλήρωση της καθοδικής προστασίας. .	91
Εικόνα 50 : Διάταξη των δοκιμών σε νερό (3,5% NaCl) και αέρα.....	92
Εικόνα 51 : Εφαρμογή της καθοδικής προστασίας και χρήση ποτενσιόμετρου.....	93
Εικόνα 52 : Αστοχία προτεινόμενης ανόδου μετά το πέρας 2 ημερών.....	93
Εικόνα 53 : Αστοχία ανόδου από ανοξειδωτο χάλυβα μετά το πέρας μιας βδομάδας.	94
Εικόνα 54 : Εφαρμογή καθοδικής προστασίας με άνοδο το τιτάνιο.....	94
Εικόνα 55 : Εφαρμογή καθοδικής προστασίας.....	95
Εικόνα 56 : Μεταβολή του δυναμικού E_{on} - E_{off} σε διάρκεια ενός χρόνου στο οπλισμένο σκυρόδεμα στην ατμόσφαιρα πριν την διαβροχή με νερό.	100
Εικόνα 57 : Μεταβολή του δυναμικού E_{on} - E_{off} σε διάρκεια ενός χρόνου στο οπλισμένο σκυρόδεμα στην ατμόσφαιρα μετά την διαβροχή με νερό.	100
Εικόνα 58 : Μεταβολή του δυναμικού E_{on} - E_{off} σε διάρκεια ενός χρόνου στα ημι- βυθισμένα οπλισμένα σκυρόδεμα σε θαλασσινό νερό.	101
Εικόνα 59 : Μεταβολή του δυναμικού E_{on} σε διάρκεια ενός χρόνου στο οπλισμένο σκυρόδεμα στην ατμόσφαιρα πριν την διαβροχή με νερό.	101
Εικόνα 60 : Μεταβολή του δυναμικού E_{on} σε διάρκεια ενός χρόνου στο οπλισμένο σκυρόδεμα στην ατμόσφαιρα μετά την διαβροχή με νερό.....	102
Εικόνα 61 : Μεταβολή του δυναμικού E_{on} σε διάρκεια ενός χρόνου στα ημι- βυθισμένα οπλισμένα σκυρόδεμα σε θαλασσινό νερό.	102
Εικόνα 62 : Κατασκευή χάλκινων δοκιμών (τοποθέτηση καλωδίων, ρητίνης).	104
Εικόνα 63 : Δοκίμια χάλκινων σωλήνων σε γλυκό νερό.	104
Εικόνα 64 : Εφαρμογή καθοδικής προστασίας στο έδαφος και νερό.....	105
Εικόνα 65 : Εφαρμογή καθοδικής προστασίας.....	106
Εικόνα 66 : Μεταβολή του δυναμικού E_{off} σε διάρκεια ενός χρόνου σε χάλκινους σωλήνες θαμμένους στο έδαφος.	108
Εικόνα 67 : Μεταβολή του δυναμικού $E_{off}= E_{on}$ σε διάρκεια ενός χρόνου σε χάλκινους σωλήνες βυθισμένους σε γλυκό νερό.	108

12. Αναφορά Πινάκων

Πίνακας 1 : Σύγκριση θαλάσσιου – γλυκού νερού	39
Πίνακας 2 : Διάκριση των νερών ανάλογα την περιεκτικότητα σε αλάτι.....	40
Πίνακας 3 : Η σύσταση του τεχνητού θαλασσινού νερού.....	41
Πίνακας 4 : Συχνότητα των λειτουργικών ελέγχων	70
Πίνακας 5 : Free corrosion potentials, protection potentials and limiting critical potential of some common metals in soil and in fresh and salt water.....	71
Πίνακας 6 : Κανονικά δυναμικά ηλεκτροδίων.....	74
Πίνακας 7 : Διαφορές μεταξύ θυσιαζόμενης ανόδου και επιβαλλόμενης τάσης από εξωτερική πηγή.(Francis, 1981, σελ 9).....	79
Πίνακας 8 : Απόδοση τάσεως κραμάτων μαγνησίου	79
Πίνακας 9 : Γαλβανική σειρά διαφόρων μετάλλων και κραμάτων(Αργυροπούλου, 2018, σελ 30)	80
Πίνακας 10 : Τυπική χημική σύνθεση του τυποποιημένου κράματος που χρησιμοποιείται στις ανόδους μαγνησίου.....	81
Πίνακας 11 : Πίνακας μετρήσεων των δυναμικών προστασίας στα δοκίμια σπλισμένου σκυροδέματος με ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl	97
Πίνακας 12 : Πίνακας μετρήσεων των δυναμικών E _{οη} -E _{οff} στα δοκίμια σπλισμένου σκυροδέματος	98
Πίνακας 13 : Ιστορικό πειραματικού μέρους	99
Πίνακας 14 : Πίνακας μετρήσεων των δυναμικών προστασίας σε χάλκινους σωλήνες στο έδαφος και στο νερό με ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl.....	107