



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)
"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΦΑΝΗ ΑΓΓΕΛΗ

Αρχιτέκτων Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων: Α. Καραντώνης
Επίκουρος Καθηγητής
Συνεπιβλέπων: Γ. Μπατής
Ομότιμος Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)
"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΦΑΝΗ ΑΓΓΕΛΗ

Αρχιτέκτων Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Α. ΚΑΡΑΝΤΩΝΗΣ, Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γ. ΜΠΑΤΗΣ, Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ε. ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι παγκοσμίως, το κατασκευαστικό υλικό που χρησιμοποιείται κατά κόρον και οι κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, λόγω των ιδιοτήτων και του κόστους του συγκεκριμένου υλικού, έχουν βρει ευρεία εφαρμογή, κυρίως κατά τον τελευταίο αιώνα.

Το σκυρόδεμα, αρχικά, παρέχει ένα προστατευτικό αλκαλικό περιβάλλον για τον οπλισμό. Ωστόσο, παρά την ανθεκτικότητά του υλικού, η έκθεση των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος σε διάφορων ειδών διαβρωτικά περιβάλλοντα προκαλεί φθορές και βλάβες στις κατασκευές. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού έχουν αναπτυχθεί ποικίλες μέθοδοι, όπως η χρήση πρόσθετων ή/ και αναστολέων διάβρωσης, ανοξειδωτων σιδηροπλισμών, επιφανειακών επικαλύψεων και καθοδικής προστασίας.

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακή εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της προσθήκης των χημικά τροποποιημένων νανοσωλήνων άνθρακα στη διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού σε δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.

Στο θεωρητικό μέρος της εργασίας περιγράφεται το φαινόμενο της διάβρωσης στα μέταλλα και ειδικότερα στο χαλύβδινο οπλισμό του σκυροδέματος και αναφέρονται οι διάφορες μέθοδοι αντιμετώπισης του φαινομένου που έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί μέχρι σήμερα.

Το πειραματικό μέρος της εργασίας περιλαμβάνει την περιγραφή της διαδικασίας κατασκευής των δοκιμίων που μελετήθηκαν, τις μεθόδους εκτίμησης της διάβρωσης του οπλισμού που χρησιμοποιήθηκαν και τα πειραματικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, η διάβρωση των δοκιμίων στα οποία είχε γίνει η προσθήκη νανοσωλήνων στο τσιμεντοκονίαμα τους μελετήθηκε μέσω της μέτρησης απώλειας μάζας των χαλύβδινων οπλισμών, μέσω μετρήσεων δυναμικού διάβρωσης και μετρήσεων αντίστασης πόλωσης με τη μέθοδο της γραμμικής πόλωσης.

Οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας τους, κατέδειξαν ότι η προσθήκη νανοσωλήνων άνθρακα, αλλά και χημικά τροποποιημένων νανοσωλήνων άνθρακα βελτίωσε την ανθεκτικότητα των δοκιμίων στη διάβρωση στον ίδιο βαθμό.

ABSTRACT

Reinforced concrete is worldwide the most widely used constructional material and the reinforced concrete constructions have seen a broad application worldwide, particularly during the last century, due to the properties and the relatively low cost of this material.

Concrete initially provides a protective alkaline environment around the steel rebars.

However, notwithstanding the durability this material exhibits, the exposure of reinforced concrete constructions to various corrosive environments leads to damage to and deterioration of the constructions. A variety of methods have been developed in order to overcome this problem, such as the use of mineral additions and/or corrosion inhibitors, stainless steels, coatings and cathodic protection.

Aim of this thesis is the study of the effect the addition of Multi-Walled Carbon Nanotubes has on the corrosion process of the steel rebar embedded in cement mortar specimens.

The theoretical part comprises a description of the corrosion in metals and, in particular, the steel rebar embedded in concrete. Furthermore, a number of anticorrosion methods that has been developed and implemented so far are described.

The experimental part of this study involves the construction process of the specimens which were studied, the methods applied for assessing the rebar corrosion and the experimental results. Specifically, the corrosion of the steel rebar within the specimens in which the MWCNTs were added, was examined by measuring the mass loss of the steel rebar, by measuring the corrosion potential and the corrosion current density (by the use of linear polarization technique).

The results exported of this work revealed that the MWCNTs' addition, and also, the acid washed MWCNTs' addition improved the durability of the specimens, in a similar way.

Πίνακας Περιεχομένων

1. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	1
1.1. Σύσταση και βασικά χαρακτηριστικά σκυροδέματος.....	1
1.2. Οπλισμένο Σκυρόδεμα.....	3
1.3 Χάλυβες οπλισμένου σκυροδέματος.....	4
1.3.1. Τεχνικά Χαρακτηριστικά και Λειτουργικές Ιδιότητες.....	5
1.3.2. Σύνοψη βασικών χαρακτηριστικών οπλισμένου σκυροδέματος.....	6
1.3.3. Μηχανική αστοχία οπλισμένου σκυροδέματος.....	6
2. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥ	7
2.1. Ορισμός Διάβρωσης	7
2.2. Συμπεριφορά ενός μετάλλου σε διαβρωτικό περιβάλλον.....	8
2.3. Θερμοδυναμική της διάβρωσης.....	8
2.4. Ταχύτητα διάβρωσης.....	10
2.5 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση.....	10
2.6 Βασικές μορφές διάβρωσης [23,24,25,26,27,28,29]	11
2.6.1. Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση (Uniform or General Corrosion)	11
2.6.2. Διάβρωση με βελονισμούς (Pitting Corrosion)	12
2.6.3. Διάβρωση με σχισμές (Crevice Corrosion).....	13
2.6.4. Γαλβανική ή διμεταλλική διάβρωση (Galvanic or two metal corrosion).....	13
2.6.5. Περικρυσταλλική διάβρωση (Intergranular corrosion)	14
2.6.6. Εκλεκτική προσβολή (Selective Attack).....	14
2.6.7. Διάβρωση εκ τριβής (Erosion Corrosion).....	15
2.6.8. Σπηλαιώδης διάβρωση (Cavitation Corrosion)	15
2.6.9. Διάβρωση από τριβή (Fetting Corrosion)	16
2.6.10. Διάβρωση με μηχανική καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking).....	17
2.6.11. Βλάβη από υδρογόνο	17
2.6.12. Θερμογαλβανική διάβρωση (Thermogalvanic Corrosion).....	18
2.6.13. Διάβρωση κόπωσης (Corrosion fatigue).....	18
2.6.14. Βιολογική διάβρωση (Biological Corrosion).....	18
2.6.15. Διάβρωση από ρεύματα διαφυγής (Stray Current Corrosion).....	19
2.6.16. Ατμοσφαιρική Διάβρωση (atmospheric corrosion).....	19
3. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ (αιτίες –	20
μηχανισμοί)	20
3.1. Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση οπλισμού	20
3.1.1 Το είδος και η δομή του σκυροδέματος	20

3.1.2. Το πάχος επικάλυψης του οπλισμού από το σκυρόδεμα	21
3.1.3. Η παρουσία νερού στο σκυρόδεμα	21
3.1.4. Η παρουσία ρωγμών στο σκυρόδεμα	21
3.2. Μηχανισμός της διάβρωσης.....	22
3.3. Μηχανισμός διάβρωσης του χάλυβα	23
3.4 Αιτίες Διάβρωσης	25
3.4.1.Ενανθράκωση σκυροδέματος.....	25
3.4.2. Επίδραση Χλωριόντων	25
3.4.3. Ρωγμές	27
3.5. Αποτελέσματα διάβρωσης οπλισμού	28
3.6. Αποτίμηση του βαθμού διάβρωσης του οπλισμού	28
4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ.....	29
4.1 Τροποποίηση μετάλλου	29
4.2. Επεμβάσεις στο σκυρόδεμα	30
4.2.1. Επανακαλοποίηση	30
4.2.2. Αφαίρεση χλωριόντων (Ηλεκτροχημική εξαγωγή χλωριόντων - ECE).....	30
4.2.3. Αφαίρεση Υγρασίας.....	31
4.2.4. Σφράγισμα ρωγμών με ρητίνες	31
4.2.5.Χρήση αναστολέων διάβρωσης.....	31
4.3 Επεμβάσεις στον οπλισμό	33
4.3.1. Καθοδική προστασία [29]	33
4.3.2. Καθοδική Προστασία με επιβαλλόμενη τάση	33
4.3.3. Θυσιαζόμενες άνοδοι.....	34
4.3.4. Οργανικές Επικαλύψεις	35
5. ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ.....	36
5.1. Ορισμός Νανοσωλήνων Άνθρακα	36
5.2. Δομή-Ταξινόμηση νανοσωλήνων άνθρακα	37
5.3. Ιδιότητες νανοσωλήνων άνθρακα	38
5.3.1. Ηλεκτρικές Ιδιότητες	38
5.3.2. Μηχανικές Ιδιότητες	38
5.3.3. Θερμικές Ιδιότητες.....	38
5.3.4. Οπτικές Ιδιότητες	39
5.3.5. Χημικές ιδιότητες-Αλληλεπιδράσεις	39
5.4. Εφαρμογές νανοσωλήνων άνθρακα.....	39
5.4.1. Σύνθετα Υλικά.....	40
5.4.2. Ηλεκτρονικά κυκλώματα.....	40
5.4.3. Αποθήκευση Ενέργειας	41

5.4.4. Βιολογικές – Ιατρικές εφαρμογές	41
5.4.5. Άλλες Εφαρμογές.....	42
5.4.6. Εφαρμογές στα κατασκευαστικά υλικά του φέροντα οργανισμού	42
6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	43
6.1. Σκοπός.....	43
6.2. Παρασκευή Δοκιμών	44
6.2.1. Υλικά	44
6.2.2. Κατηγορίες Δοκιμών	47
6.2.3. Διαδικασία παρασκευής δοκιμών	47
6.3. Μέθοδοι Εκτίμησης Διάβρωσης Οπλισμού	49
6.3.1. Η μέτρηση του δυναμικού συναρτήσει του χρόνου.....	49
6.3.2. Γραμμική Πόλωση.....	51
6.3.3. Ηλεκτροχημική απώλειας μάζας	53
6.4. Αποτελέσματα Μετρήσεων	54
6.4.1 Μέτρηση δυναμικού διάβρωσης E(mV).....	54
6.4.4. Μέτρηση απώλειας μάζας.....	79
6.5. Συζήτηση Αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα	86
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	89

1. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1.1. Σύσταση και βασικά χαρακτηριστικά σκυροδέματος

Το **σκυρόδεμα** είναι ένα τεχνητό δομικό υλικό. Αποτελεί μείγμα συγκεκριμένης αναλογίας τσιμέντου, νερού και χονδρόκοκκων ή λεπτόκοκκων αδρανών (άμμος, γαρμπίλι, σκύρα), με πρόσθετα και πρόσμικτα που τροποποιούν τις ιδιότητες του. Στερεοποιείται με τη χημική ένωση του νερού με το τσιμέντο (ενυδάτωση), εγκλωβίζοντας στο εσωτερικό της μάζας του τα αδρανή, δημιουργώντας έτσι μια ομογενοποιημένη μάζα. [1] Εκτός από αυτά τα υλικά, το νέο Ευρωπαϊκό πρότυπο (EN 206) προβλέπει την προσθήκη και άλλων συστατικών (βελτιωτικά πρόσθετα – admixtures και πρόσθετα συστατικά - additions), τα οποία τροποποιούν συγκεκριμένες ιδιότητες του σκυροδέματος.

Για την παρασκευή σκυροδέματος καλής ποιότητας απαιτείται η καλή διαλογή και σύνθεση των συστατικών του, καθώς επίσης, και η Παρασκευή, διάστρωση και συντήρηση αυτού σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές.

Αδρανή υλικά ονομάζονται οι φυσικές ή τεχνητές ορυκτές ύλες που δεν επιφέρουν χημικές μεταβολές στις σύνθετες τεχνητές ύλες των οποίων αποτελούν τα συστατικά. [2] Τα αδρανή είναι συστατικά με χαμηλό κόστος, αλλά έχουν ικανοποιητικές ιδιότητες, όπως η μηχανική αντοχή, η ανθεκτικότητα σε διάρκεια και περιβαλλοντικές επιδράσεις (χημικές ουσίες, υγρασία, κύκλους ζέστης και παγωνιάς, υψηλές θερμοκρασίες), σταθερότητα όγκου και υδατοστεγανότητα. Ως αδρανή μπορούν να χρησιμοποιηθούν, θεωρητικά, οποιαδήποτε υλικά συγκεντρώνουν τις τρεις βασικές απαιτήσεις: επαρκή αντοχή, επαρκή πρόσφυση και χημική ανεκτικότητα στην τσιμεντοκονία. Τα καταλληλότερα πετρώματα είναι τα ασβεστολιθικά ή τα πυριτικά.

Το **τσιμέντο** είναι μία υδραυλική συνδετική κονία. Πρόκειται για ένα ανόργανο υλικό με μικρή κοκκομετρία, το οποίο όταν αναμειχθεί με νερό και υποστεί τη διαδικασία ενυδάτωσης, σχηματίζει μια πάστα (πολτό), η οποία σταδιακά πήζει και σκληραίνει, αποκτώντας εν τέλει σταθερότητα και τελικές αντοχές, αρκετά ικανοποιητικές.

Τα βασικά συστατικά για παραγωγή τσιμέντου τύπου Portland (ο πιο συνήθης τύπος) είναι περίπου 75% ασβεστολιθικά και 25% αργιλοπυριτικά πετρώματα, τα οποία αφού αναμειχθούν σε προκαθορισμένες αναλογίες, υποβάλλονται σε όπτηση στους 1450°C περίπου. Από τη διαδικασία αυτή παραλαμβάνεται το κλίνκερ, το οποίο ακολούθως αλέθεται ώστε να αποκτήσει την τελική γνωστή λεπτότητα του τσιμέντου. [3]

Ο τσιμεντοπολτός αποτελείται από τσιμέντο, νερό και (χημικά) πρόσμικτα ή πρόσθετα. Ενώ έχει σημαντικά υψηλότερο κόστος από τα αδρανή, στη σκληρυμένη του μορφή ο τσιμεντοπολτός δεν έχει εξίσου καλές βασικές ιδιότητες. Ο ρόλος του είναι να καλύπτει τα κενά μεταξύ των αδρανών και να συνδέει τα αδρανή, μετατρέποντας τα από σύνολο ισχυρών αλλά ασύνδετων κόκκων σε τεχνητό πέτρωμα. Επιπλέον, λειτουργεί σαν λιπαντικό μεταξύ των κόκκων των αδρανών, έτσι ώστε το νωπό σκυρόδεμα να είναι μια ρευστή αλλά συνεκτική μάζα. [4]

Το **νερό ανάμιξης** αποτελεί 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 μείγματος. Η βασική απαίτηση έναντι του νερού είναι να μην περιέχει συστατικά που μπορούν να βλάψουν ή να επηρεάσουν τις αντιδράσεις ενυδάτωσης.

Για το νερό ανάμιξης υπάρχει μια ανοχή σχετικά με την ποιότητά του, σε αντίθεση με τα νερά που δρουν εξωτερικά και μόνιμα. Αυτό συμβαίνει, γιατί η ποσοστιαία αναλογία του νερού ανάμιξης, και συνεπώς κάθε ξένης ουσίας μέσα σε αυτό, είναι μικρή και εξάλλου, οι ουσίες αυτές δρουν μέχρι να εξαντληθούν.

Στην περίπτωση, όμως, εξωτερικών υδάτων, όπως το θαλασσινό νερό ή τα νερά των αποχετεύσεων, η δράση τους είναι μόνιμη και η ποσότητα των επιβλαβών ουσιών ανεξάντλητη, αφού τα ύδατα αυτά ανανεώνονται συνεχώς.

Το χρησιμοποιούμενο νερό πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγραφή EN1008, ενώ αν γίνεται χρήση νερού από ανακύκλωση, αυτή πρέπει να υπακούει στο παράρτημα Α της ίδιας προδιαγραφής.

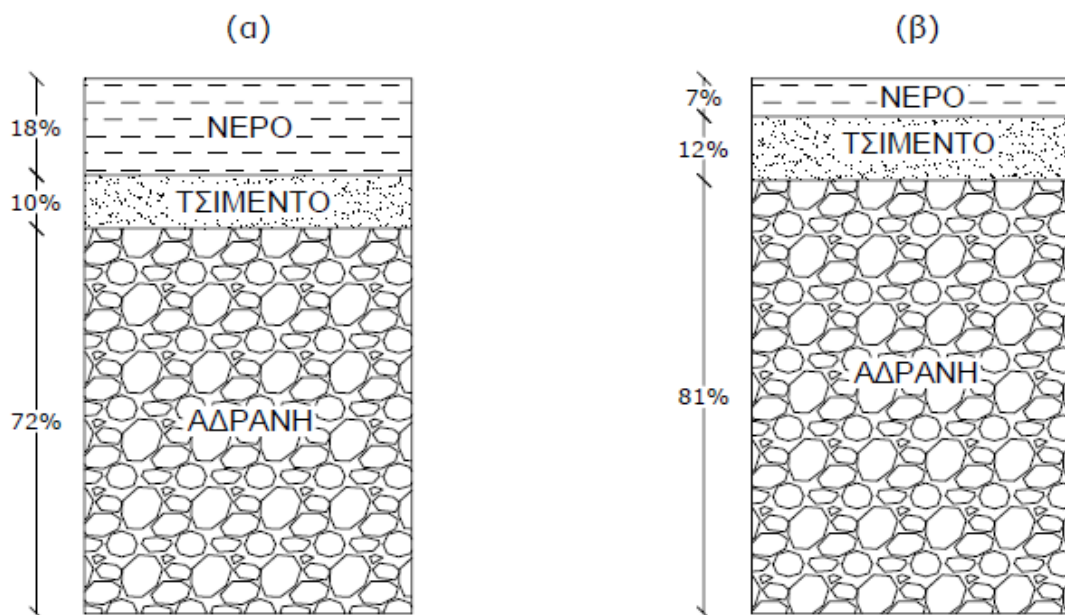
Τα **βελτιωτικά ή χημικά πρόσμικτα** προστίθενται, σε μικρές ποσότητες σε σχέση με τη μάζα του τσιμέντου, κατά τη διάρκεια της ανάμιξης του σκυροδέματος, με σκοπό την τροποποίηση των ιδιοτήτων του, κυρίως του νωπού, αλλά και του σκληρυμένου σκυροδέματος.

Βάσει της κύριας δράσης τους, τα πρόσμικτα κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

- Ρευστοποιητικά: αυξάνουν τη ρευστότητα του σκυροδέματος, μειώνοντας την επιφανειακή τάση του νερού και τις δυνάμεις συνοχής μεταξύ των κόκκων του τσιμέντου.
- Αερακτικά: Αυξάνουν τον περιεχόμενο αέρα του σκυροδέματος και τη ρευστότητά του.
- Επιβραδυντικά: Απομονώνουν τις ταχύπηκτες αργλικές ενώσεις.
- Επιταχυντικά: Διευκολύνουν την ενυδάτωση των πυριτικών ενώσεων.
- Στεγανωτικά.

Εκτός από τα παραπάνω, υπάρχουν και άλλα πρόσμικτα, όπως αντιπαγετικά, διογκωτικά και αντιδιαβρωτικά. [5], [6]

Οι αναλογίες ανάμιξης των συστατικών του σκυροδέματος, του προσδίδουν πολλά από τα χαρακτηριστικά του. Προφανώς, το ποσοστό των αδρανών και του τσιμέντου είναι μεγαλύτερο όταν οι αναλογίες παρουσιάζονται κατά βάρος σε σχέση με τις αναλογίες κατ' όγκο, λόγω του μεγαλύτερου ειδικού βάρους του τσιμέντου και των αδρανών σε σχέση με το νερό. Οι ενδεικτικές αναλογίες φαίνονται στο ακόλουθο τμήμα:



Εικόνα 1: Αναλογίες υλικών σε νωπό σκυρόδεμα: (α) κατ' όγκο (β) κατά βάρος

Η αντοχή του σκυροδέματος σε μηχανική καταπόνηση θεωρείται ως η πιο σημαντική ιδιότητα του και εκφράζει την ικανότητά του υλικού να ανταπεξέλθει στη μηχανική καταπόνηση που υπόκειται. Η ποσοτική της εκτίμηση δίνεται σε μονάδες φορτίου ανά επιφάνεια (N/mm^2 ή Mpa). Η αντοχή συνδέεται άμεσα με τη δομή της τσιμεντόπαστας και είναι μια αναντικατάστατη μεταβλητή στο σχεδιασμό των κατασκευών. Η αντοχή του σκυροδέματος, σε συγκεκριμένη ηλικία, συντήρηση και θερμοκρασία θεωρείται ότι εξαρτάται κυρίως από δύο παράγοντες: το λόγο νερού/ τσιμέντου (W/C) και το βαθμό συμπύκνωσης. [7]

1.2. Οπλισμένο Σκυρόδεμα

Η μονοαξονική θλιπτική περιοχή του σκυροδέματος, f_c , αποτελεί το πιο χαρακτηριστικό μέγεθος του υλικού. Το άοπλο σκυρόδεμα παρουσιάζει αυξημένες αντοχές σε θλιπτικές τάσεις. Ωστόσο, δεν είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό σε εφελκυσμό και διατμητικές καταπονήσεις (που προκαλούνται ενδεχομένως από άνεμο, τις σεισμικές δονήσεις, κ.λ.π.), που το καθιστούν συνεπώς ακατάλληλο στις περισσότερες δομικές εφαρμογές. Για το λόγο αυτό, ενισχυτικά στοιχεία (οπλισμός) σε μορφή ράβδων ή πλέγματος ενσωματώνονται στο σκυρόδεμα, ώστε τα δύο υλικά λειτουργούν από κοινού έναντι των τάσεων.

Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι συνεπώς ένα σύνθετο υλικό στο οποίο η σχετικά χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό και η χαμηλή ολκιμότητα του σκυροδέματος αντισταθμίζονται από τα ενισχυτικά στοιχεία του οπλισμού που διαθέτουν μεγαλύτερη ολκιμότητα και υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό. Ο οπλισμός συνήθως, αν και όχι απαραίτητα, αποτελείται από χαλύβδινα στοιχεία (ράβδους ή πλέγμα), τα οποία ενσωματώνονται στο σκυρόδεμα πριν την στερεοποίησή του. Τα ενισχυτικά στοιχεία σχεδιάζονται ώστε να αντιστέκονται στις εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται σε συγκεκριμένες περιοχές του σκυροδέματος και οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν ρωγμές ή/και δομική αστοχία. Ο οπλισμός αντιμετωπίζει, έτσι, τις εφελκυστικές ή διατμητικές τάσεις, όπως και μέρος της θλιπτικής καταπόνησης, ενώ το σκυρόδεμα απορροφά το μεγαλύτερο μέρος των θλιπτικών τάσεων.

1.3 Χάλυβες οπλισμένου σκυροδέματος

Ο χάλυβας αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα κατασκευαστικά υλικά και αποτελείται από κράμα σιδήρου – άνθρακα, που περιέχει άνθρακα (C) σε ποσοστό έως 2% w/w, μαγγάνιο (Mn) έως 1% w/w και σε πολύ μικρότερες συγκεντρώσεις προσμίξεις πυριτίου (Si), φωσφόρου (P), θείου (S) και οξυγόνου (O). Ο χάλυβας δεν αποτελεί μοναδικό στη σύσταση προϊόν. Η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη και έρευνα για το υλικό αυτό μας επέτρεψε, τόσο με διαφοροποιήσεις στις διεργασίες παραγωγής του, όσο και με διάφορες προσμίξεις στο βασικό κράμα, να δημιουργήσουμε περισσότερα από 3.500 διαφορετικά είδη χαλύβων, με διαφορετικές ιδιότητες. Η ταξινόμηση του χάλυβα μπορεί να γίνει ανάλογα με τη χημική του σύσταση ή με την κατεργασία που υφίσταται για την παραγωγή του. Ως προς τη χημική τους σύσταση, οι χάλυβες ταξινομούνται ως εξής:

A) Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες (carbon steels).

Περιέχουν άνθρακα (έως 2,06%) και μικρό ποσοστό μαγγανίου (έως 1,65%), πυριτίου (έως 0,6%) και χαλκού (έως 0,6%). Χρησιμοποιούνται ευρέως και παρουσιάζουν ευκολία συγκολλήσεως. Με βάση τον περιεχόμενο άνθρακα, οι κοινοί χάλυβες διακρίνονται στις εξής υποκατηγορίες:

- Χάλυβες χαμηλού άνθρακα ή μαλακοί χάλυβες (mild steel) $C < 0,3\%$
- Χάλυβες μέτριου άνθρακα (medium carbon steels) $0,3\% < C < 0,6\%$
- Χάλυβες υψηλού άνθρακα (high carbon steels) $0,6\% < C < 1\%$
- Χάλυβες πολύ υψηλού άνθρακα (ultra-high carbon steels) $1\% < C < 2\%$

B) Κραματωμένοι χάλυβες (alloy steels)

Είναι κράματα σιδήρου με άλλα μέταλλα σε σημαντική περιεκτικότητα. Τετοιοι είναι οι:

- Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες, που περιέχουν συνήθως χρώμιο, μολυβδαίνιο, βανάδιο, νικέλιο, κ.λ.π. σε συνολικό ποσοστό που δεν ξεπερνά το 10% κ.β.
- Ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες, όπως οι ανοξειδωτοι ($Cr > 10,5\%$), οι ταχυχάλυβες ($C=0.7\%$, $Cr=4.0\%$, $5.0\% < Mo < 10\%$, $Co < 8.0\%$).

Ακόμη, ανάλογα με την κύρια κρυσταλλική φάση τους διακρίνονται σε : ωστενιτικούς, μαρτενσινιτικούς, μπαινιτικούς και άλλου είδους χάλυβες.

Η αντοχή του χάλυβα σε εφελκυσμό είναι σημαντικά μεγαλύτερη, σε αντίθεση με το σκυρόδεμα και μάλιστα παραπλήσια της αντοχής του σε θλίψη, γεγονός που, όπως προαναφέρθηκε, καθιστά το υλικό αυτό κατάλληλο για κατασκευή δομικών στοιχείων.

Οι κατηγορίες χάλυβα που χρησιμοποιούνται συνήθως ως ράβδοι οπλισμού είναι S220, S400, S500, S400s, S500s, όπου οι αριθμοί αντιστοιχούν στη χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής μετρούμενη σε MPa. Οι τρεις πρώτες κατηγορίες αναφέρονται σε χάλυβες συγκολλησίμους υπό προϋποθέσεις (ΕΛΟΤ 959) ενώ οι υπόλοιπες δύο σε συγκολλησίμους χάλυβες. Η κατηγορία S220 αντιστοιχεί σε λείες ράβδους θερμής ελάσεως, ενώ οι υπόλοιπες σε ράβδους υψηλής συνάφειας.[8] Τα νέα πρότυπα ΕΛΟΤ προβλέπουν δύο επιπλέον κατηγορίες χαλύβων, ήτοι B500A και B500C.

Τα μηχανικά και τεχνολογικά χαρακτηριστικά του χάλυβα για οπλισμένο σκυρόδεμα καθορίζονται από συγκεκριμένα πρότυπα (π.χ. στην Ελλάδα τα νέα Πρότυπα ΕΛΟΤ EN10080, ΕΛΟΤ 1421-1, ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ1421-3 για συγκολλησίμους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος που αντικατέστησαν τα προηγούμενα πρότυπα ΕΛΟΤ 959 και 971)[9] και οφείλουν να διαθέτουν πιστοποιητικά συμμόρφωσης).

Πίνακας 1: Ιδιότητες σε εφελκυσμό για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος κατά ΕΛΟΤ 959,971 και κατά ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ 1421-3

Χαρακτηριστικό	ΕΛΟΤ959, ΕΛΟΤ971					ΕΛΟΤΕΝ10080, ΕΛΟΤ1421-2, ΕΛΟΤ1421- 3	
	Τεχνική κατηγορία					Τεχνική κατηγορία	
	S220	S400	S500	S400s	S500s	B500A	B500C
Όριοδιαρροής f_y (MPa)	220	400	500	400	500	≥ 500	≥ 500
Εφελκυστική αντοχή f_t (MPa)	340	500	550	440	550		
Λόγος πραγματικής τιμής ορίου διαρροής προς ονομαστική τιμή ορίου διαρροής $f_{y,act}/f_{y,nom}$							≤ 1.25
Λόγος εφελκυστικής αντοχής προς όριο διαρροής f_t/ f_y		≥ 1.05	≥ 1.05	≥ 1.05	≥ 1.05	≥ 1.05 (≥ 1.03 για $d < 6\text{mm}$)	$\geq 1,15$ $\leq 1,35$
Επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο $\epsilon_{u,k}$ (%)						$\geq 2,5$ (≥ 2 για $d < 6\text{mm}$)	$\geq 7,5$
Επιμήκυνση μετά τη θραύση ϵ_5 (%)	24	14	12	14	12		

1.3.1. Τεχνικά Χαρακτηριστικά και Λειτουργικές Ιδιότητες

Η μηχανική αντοχή των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος είναι το σημαντικότερο τεχνικό χαρακτηριστικό τους, που επιπλέον συμβάλλει και σε αντίστοιχη ταξινόμησή τους. Η ποιότητα τους, όμως, είναι συνδυασμός πολλών παραγόντων και οι παράμετροι που πρέπει να ικανοποιούνται ή τουλάχιστον να απαιτούνται είναι:

- Ικανοποίηση των απαιτήσεων των εκάστοτε ισχυόντων Προτύπων σε σχέση με τις μηχανικές αντοχές (όριο διαρροής και εφελκυστική αντοχή).
- Δυνατότητα ανάληψης σημαντικών πλαστικών παραμορφώσεων, που εκφράζεται μέσω συγκεκριμένων απαιτήσεων για την ολκιμότητα και τη δυσθραυστότητα.
- Ικανότητα του συστήματος σκυρόδεμα/ οπλισμός μεταφοράς εφελκυστικών δυνάμεων από τον οπλισμό στο σκυρόδεμα. Η αντοχή συνάφειας είναι συνάρτηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος και είναι σημαντικός παράγοντας επηρεασμού της ικανότητας ανάληψης παραμορφώσεων από τα δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος. Σημαντική προϋπόθεση γι' αυτό είναι η ύπαρξη

κατάλληλης τραχύτητας του οπλισμού, που εξασφαλίζεται με την τήρηση ειδικών απαιτήσεων για τη γεωμετρία της επιφάνειας.

- Δυνατότητα διατήρησης των βασικών προδιαγραφόμενων ιδιοτήτων, εντός των απαιτήσεων των Προτύπων και των κατασκευαστικών κανονισμών, σε τυπικές συνθήκες διαμόρφωσης των χαλύβων οπλισμού πριν την ενσωμάτωσή τους στο έργο.
- Διατήρηση των βασικών ιδιοτήτων των χαλύβων οπλισμού, σε περιπτώσεις ιδιαίτερα επιβλαβούς περιβάλλοντος. Εδώ υπάγονται θέματα και απαιτήσεις προστασίας από τη διάβρωση.
- Συμπεριφορά των χαλύβων οπλισμού σε ειδικές συνθήκες, όπως σε πολύ υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες ή περιπτώσεις στις οποίες μπορούν να εμφανιστούν προβλήματα κόπωσης.

1.3.2. Σύνοψη βασικών χαρακτηριστικών οπλισμένου σκυροδέματος

Κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά του οπλισμένου σκυροδέματος, που αφορούν κυρίως την αλληλεπίδραση μεταξύ σκυροδέματος και οπλισμού, του προσδίδουν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του και είναι συνοπτικά τα ακόλουθα:

1. ο συντελεστής θερμικής διαστολής του σκυροδέματος είναι παρόμοιος με αυτόν του χάλυβα, αποτρέποντας έτσι τη δημιουργία σημαντικών εσωτερικών τάσεων λόγω διαφορών στις θερμικές συστολοδιαστολές.

2. Η συνοχή του ρευστού μίγματος τσιμέντου/ αδρανών/ νερού στις ιδιαιτερότητες της επιφάνειας του οπλισμού, πριν τη σκλήρυνση του σκυροδέματος, μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η εξάλειψη ενδεχόμενων τάσεων μεταξύ των δύο υλικών. Προκειμένου να βελτιωθεί περαιτέρω η συνοχή μεταξύ των δύο υλικών, η επιφάνεια των χαλύβδινων ράβδων τραχύνεται ή μορφοποιείται με αυλακώσεις.

3. Το υδατικό διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος είναι έντονα αλκαλικό εξαιτίας της υδρασβέστου $[Ca(OH)_2]$, προϊόν της αντίδρασης της ενυδάτωσης (σκλήρυνσης) του τσιμέντου, με pH μεταξύ 12,5 και 13,9. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, ο χάλυβας καλύπτεται επιφανειακά από ένα παθητικό στρώμα οξειδίων σιδήρου που παρεμποδίζει τη διάβρωσή του. Η διάβρωση του χάλυβα περιορίζεται στην συντήρηση του παθητικού αυτού στρώματος, δράση εξαιρετικά αργή, που πρακτικά μπορεί να αγνοηθεί.

4. Το σκυρόδεμα αποτελεί ένα φυσικό εμπόδιο στην επαφή του οπλισμού με τα διάφορα διαβρωτικά συστατικά του περιβάλλοντος (όπως οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα CO_2 , διοξείδιο του θείου SO_2 , κ.λ.π.) και άλλες ουσίες που βοηθούν τη διάβρωση (όπως χλωριόντα Cl^-). [10]

1.3.3. Μηχανική αστοχία οπλισμένου σκυροδέματος

Το οπλισμένο σκυρόδεμα, λόγω μείωσης των αντοχών του, μπορεί να οδηγηθεί σε μηχανική αστοχία. Πλήρης αστοχία που οδηγεί σε κατάρρευση στοιχείων οπλισμένου

σκυροδέματος μπορεί να προκληθεί σε περίπτωση επιβολής θλιπτικών τάσεων που υπερβαίνουν τις αντοχές του, από υποχώρηση ή αστοχία του οπλισμού, από επιβολή καμπτικών ή διατμητικών τάσεων που υπερβαίνουν τις αντοχές του οπλισμού ή απώλεια συνοχής μεταξύ του οπλισμού και σκυροδέματος.

Η διάβρωση, αλλά και οι έντονες αυξομειώσεις της θερμοκρασίας μπορούν να βλάψουν το οπλισμένο σκυρόδεμα. Όταν ο οπλισμός υποστεί διάβρωση, τα προϊόντα της οξειδωσης (σκουριά), έχοντας χαμηλότερη πυκνότητα από το μέταλλο, διαστέλλονται και διογκώνονται. Δημιουργούν, έτσι, εσωτερικές τάσεις στο σκυρόδεμα, οι οποίες με τη σειρά τους δημιουργούν ρωγμές στη μάζα του σκυροδέματος. Όταν το φαινόμενο των τάσεων, λόγω οξειδωσης του οπλισμού συμβαίνει κοντά στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος, μπορεί να προκληθεί το φαινόμενο της αποφλοίωσης/ θρυμματισμού (spalling).

Η παρουσία ρωγμών που δημιουργούνται με αυτό τον τρόπο αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για την ανθεκτικότητα του οπλισμένου σκυροδέματος και διότι μέσω αυτών η υγρασία μπορεί να εισχωρήσει και να διαβρώσει περαιτέρω τον οπλισμό.

Οι ρωγμές είναι κάποιες φορές αποτέλεσμα ανεπαρκούς ποσότητας οπλισμού ή τοποθέτησης των ράβδων σε πολύ μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι ρωγμές δημιουργούνται είτε λόγω υπερβολικού φορτίου, είτε λόγω εσωτερικών επιδράσεων, όπως η πρόωρη θερμική συρρίκνωση κατά τη σκλήρυνση.

Οι ρωγμές στα δομικά στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι σχεδόν αδύνατο να αποφευχθούν πλήρως. Ωστόσο, το μέγεθος και η θέση των ρωγμών αυτών μπορούν να ελεγχθούν και να περιοριστούν μέσω κατάλληλης ενίσχυσης, αρμών, βελτίωσης της διαδικασίας σκλήρυνσης και κατάλληλης σύνθεσης μίγματος.

2. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥ

2.1. Ορισμός Διάβρωσης

Ως διάβρωση, ορίζεται κάθε αυθόρμητη ή εκβιασμένη χημική - ηλεκτροχημική - μηχανική - βιολογική αλλοίωση της ύλης, που έχει ως συνέπεια την απώλεια (χρήσιμου) υλικού. Ο όρος αναφέρεται τόσο στο φαινόμενο της δράσης, όσο και στο αποτέλεσμά της.

Ως έκφραση της Επιστήμης της Διάβρωσης (Corrosion Science), ορίζεται η αντίδραση ενός στερεού με το περιβάλλον του, ενώ ως έκφραση της Μηχανικής της Διάβρωσης (Corrosion Engineering), ορίζεται «...η αλληλεπίδραση ενός μετάλλου με το περιβάλλον του, που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων του μετάλλου και που συχνά μπορεί να καταλήξει στην υποβάθμιση της λειτουργίας του μετάλλου, του περιβάλλοντος ή του τεχνικού συστήματος, που αυτά αποτελούν τμήμα του». (ISO 8044-99)

Με την έννοια της διάβρωσης, ως διεργασία είναι συνυφασμένη η ταχύτητα της διαβρωτικής δράσης, της προκαλούμενης φθοράς και η έκταση και η φύση της φθοράς σε σχέση με τη λειτουργία του σχετικού συστήματος.

Ως επιφάνεια που διαβρώνεται δε νοείται μόνο η γεωμετρική επιφάνεια, αλλά η πραγματική επιφάνεια, δηλαδή η γεωμετρική, 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.

Θα πρέπει, επίσης, να διευκρινιστεί ότι η απώλεια υλικού ως συνέπεια της διάβρωσης δε σημαίνει πάντα ότι το βάρος του σώματος ελαττώνεται. 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.

Η διάβρωση εκφράζεται ως απώλεια μάζας ανά μονάδα επιφάνειας.

2.2. Συμπεριφορά ενός μετάλλου σε διαβρωτικό περιβάλλον

Όταν ένα μέταλλο βρεθεί σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον μπορεί να συμπεριφερθεί με ένα από τους παρακάτω τρόπους:

1. Αδρανής συμπεριφορά: Τη συναντάμε σε ευγενή μέταλλα (π.χ. χρυσός, ασήμι, πλατίνα). Η συμπεριφορά είναι αποτέλεσμα της θερμοδυναμικής σταθερότητας των μετάλλων σε αυτό το περιβάλλον, δηλαδή η αντίδραση της διάβρωσης δεν πραγματοποιείται αυθόρμητα.

2. Ενεργή Συμπεριφορά: Το μέταλλο διαβρώνεται. Η συμπεριφορά ενός μετάλλου σε ένα διάλυμα χαρακτηρίζεται ως ενεργή όταν το μέταλλο διαβρώνεται εντός του διαλύματος αυτού, δηλαδή διαλύεται μέσα στο διάλυμα και σχηματίζει διαλυτά μη προστατευτικά προϊόντα διάβρωσης. Τα προϊόντα αυτά δεν εμποδίζουν τη συνέχιση της διάβρωσης και παρατηρείται μεγάλη απώλεια μάζας του υλικού.

3. Παθητική Συμπεριφορά: Το μέταλλο διαβρώνεται με τη βύθιση του στο διάλυμα, αλλά παράλληλα σχηματίζεται ένα αδιάλυτο προϊόν (ένα λεπτό προστατευτικό φιλμ) που επιβραδύνει την αντίδραση της διάβρωσης, οδηγώντας την σε χαμηλά επίπεδα. Η αντίσταση στη διάβρωση εξαρτάται από τη σταθερότητα του προστατευτικού στρώματος. Αν το στρώμα διαλυθεί στο διάλυμα ή παρουσιάσει ρωγμές σε κάποια σημεία, τότε το μέταλλο μπορεί να αποκτήσει ενεργή συμπεριφορά. Μερικά μέταλλα που εμφανίζουν αυτή τη συμπεριφορά είναι ο σίδηρος, το χρώμιο, το τιτάνιο, το νικέλιο και κράματά τους. [11]

2.3. Θερμοδυναμική της διάβρωσης

Η μετατροπή των μετάλλων από την μορφή του ορυκτού και οξειδίου (στην οποία κατ'εξοχήν απαντώνται στη φύση) στη μορφή του στοιχειώδους μετάλλου, απαιτεί ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας και δεν είναι μια αυθόρμητη διαδικασία. Έτσι, το μέταλλο στη στοιχειώδη του μορφή έχει μεγαλύτερη εσωτερική ενέργεια ΔU σε σχέση με το αρχικό ορυκτό, καθώς ένα μέρος της ενέργειας που λαμβάνει για τη μετατροπή του παραμένει σε αυτό με τη μορφή εντροπίας (ΔS) και ελεύθερης ενέργειας (ΔF). Η αύξηση της εσωτερικής του ενέργειας ισούται με $\Delta U = \Delta F + T\Delta S$.

Σύμφωνα με το 2ο νόμο της θερμοδυναμικής, τα μέταλλα τείνουν αυθόρμητα να μετατρέπονται σε μορφές με χαμηλότερη εσωτερική ενέργεια σχηματίζοντας ξανά τις αρχικές μορφές ενεργειακά χαμηλής στάθμης (οξειδία). Θερμοδυναμικά, η αυθόρμητη μετατροπή από μια μορφή σε μια άλλη προαπαιτεί την απελευθέρωση ενέργειας κατά την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης δράσης ή αυτόσημα όσον αφορά στη μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας κατά Gibbs ΔG , (ή ελεύθερης ενθαλπίας) την ισχύ της σχέσης :

$$\Delta G_{ολ} < 0 \quad [40]$$

Στις ηλεκτρικές και ηλεκτροχημικές διεργασίες το έργο ορίζεται ως το γινόμενο των μετακινούμενων φορτίων (Q) επί το δυναμικό (E) που προκαλεί τη μετακίνηση αυτή. Εάν αυτή η εργασία γίνεται σε ένα ηλεκτροχημικό κελί στο οποίο η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ημι-κελιών είναι E , και κατά την αντίδραση μεταφέρονται n γραμμομόρια ηλεκτρόνια, τότε το ηλεκτρικό έργο ($-W$) που παράγεται από το κελί είναι nE . Σε ένα ηλεκτροχημικό κελί σε ισορροπία δεν ρέει ρεύμα και η μεταβολή της ενέργειας που συμβαίνει κατά την αντίδραση εκφράζεται στην εξίσωση:

$$W = \Delta G = -nFE \quad [41]$$

Υπό κανονικές συνθήκες, η τυπική ελεύθερη ενέργεια της αντίδρασης του κελιού (ΔG^0) συνδέεται άμεσα με την τυπική διαφορά δυναμικού του κελιού (E^0Q) ως εξής:

$$\Delta G^0 = -nFE^0$$

Τα δυναμικά των ηλεκτροδίων συνδυάζονται αλγεβρικά για να δώσουν το δυναμικό του κελιού.

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}}$$

Η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας σε ένα γαλβανικό στοιχείο ή σε μία αυθόρμητη αντίδραση θα είναι αρνητική και η τάση θετική. Το αντίθετο ισχύει σε ένα ηλεκτρολυτικό κελί που απαιτεί εφαρμογή εξωτερικού δυναμικού να κατευθύνει την αντίδραση ηλεκτρόλυσης, στην οποία περίπτωση το E_{cell} θα είναι αρνητικό.

Άλλες θερμοδυναμικές τιμές μπορούν να εκληφθούν από ηλεκτροχημικές μετρήσεις. Για παράδειγμα η μεταβολή της εντροπίας (ΔS) δίνεται ως εξής: [12]

$$\begin{aligned} \Delta S &= -\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial T}\right)_p \\ \Delta S &= nF \left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_p \\ \Delta H &= \Delta G + T\Delta S = nF[T(\partial E / \partial T)_p - E] \end{aligned}$$

Όπου ΔH είναι η μεταβολή της ενθαλπίας και T η απόλυτη θερμοκρασία. Η σταθερά ισορροπίας (K_{eq}) για την ίδια αντίδραση λαμβάνεται από την εξίσωση:

$$RT \ln K_{\text{eq}} = -\Delta G^0 = nFE^0$$

2.4. Ταχύτητα διάβρωσης

Η ταχύτητα διάβρωσης εκφράζεται συνήθως ως το μέσο βάθος διείσδυσης της διάβρωσης, σε συγκεκριμένη επιφάνεια, ανά μονάδα χρόνου και ως μονάδες έχουν καθιερωθεί τα mils/year (mpy), όπου, 1 mpy ισούται με 0.254 mm/year.

$$\text{mpy} = 534 W / dAt$$

όπου W η απώλεια μάζας σε g, d η πυκνότητα σε g/cm^3 , A η επιφάνεια διάβρωσης σε mm^2 και t ο χρόνος έκθεσης σε ώρες.

Με τη χρήση ηλεκτροχημικών τεχνικών όπως η γραμμική πόλωση η ταχύτητα διάβρωσης εκφράζεται ως συνάρτηση της πυκνότητας ρεύματος. Από το νόμο του Faraday, είναι συνεπώς δυνατός ο υπολογισμός της ταχύτητας διείσδυσης λόγω διάβρωσης που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{Ταχύτητα διείσδυσης} = K \frac{AB i}{n d}$$

Όπου AB το ατομικό βάρος του μετάλλου, i η πυκνότητα ρεύματος, n ο αριθμός των ανταλλασσόμενων ηλεκτρονίων, d η πυκνότητα και K σταθερά με τιμή 0,129 για mpy ή 0,00327 για mmpy.

2.5 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση

Στην εξέταση του μηχανισμού μιας χημικής αντίδρασης συνίσταται ο διαχωρισμός των παραγόντων που καθορίζουν την τάση ή την κινητήρια δύναμη προόδου της αντίδρασης από τους παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό της αντίδρασης που καθίσταται εφικτή από την ύπαρξη αυτής της τάσης. Αυτή η τάση εκφράζει το γεγονός ότι το σύστημα δεν βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας (ή δεν έχει εγγενή σταθερότητα) και μετράται από τη διαφορά ενέργειας μεταξύ της αρχικής και της τελικής κατάστασης του συστήματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο παρατηρηθείς ρυθμός καθορίζεται όχι μόνο από την τάση αυτή (σε απόλυτο μέγεθος), αλλά και από άλλους παράγοντες που εξαρτώνται κυρίως από το περιβάλλον.

Κατά την εξέταση της ομάδας των τριών τυπικών αντιδράσεων που εμπλέκονται στην διάβρωση, θα πρέπει να αναφέρονται ως πρωταρχικοί παράγοντες εκείνοι που καθορίζουν την τάση του μετάλλου να διαβρώνεται (και επηρεάζουν έτσι τον αρχικό ρυθμό του διαλύματος) και ως δευτερεύοντες παράγοντες εκείνους που επηρεάζουν το ρυθμό των μεταγενέστερων αντιδράσεων. Αυτό επ' ουδενί δεν σημαίνει ότι οι δευτερεύοντες παράγοντες έχουν μικρότερη σημασία. Στην πραγματικότητα, επηρεάζοντας τη φύση και την κατανομή των προϊόντων διάβρωσης, συνήθως καθορίζουν τον τελικό ρυθμό διάβρωσης, και κατά συνέπεια την ωφέλιμη ζωή του μετάλλου, σε κάθε περιβάλλον.

Γενικά, ελάχιστοι από τους παράγοντες που εμπλέκονται, ασκούν εξαιρετικά σημαντική επίδραση στην τελική ταχύτητα διάβρωσης και ορίζονται ως παράγοντες ελέγχου ή κυρίαρχοι παράγοντες (controlling or dominant factors). Σε γενικές γραμμές, οι πρωτογενείς

παράγοντες έχουν να κάνουν με το μέταλλο (ή το κράμα) και οι δευτερεύοντες παράγοντες μάλλον με το ιδιαίτερο περιβάλλον, αν και δεν μπορεί να γίνει αυστηρή διάκριση.

Σε αυτό το πλαίσιο παρατίθενται κάποιοι από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο της διάβρωσης.

Παράγοντες που σχετίζονται κυρίως με το μέταλλο:

- Δυναμικό ηλεκτροδίου του μετάλλου σε διάλυμα
- Υπέρταση υδρογόνου στο μέταλλο
- Χημική και φυσική ομοιογένεια της μεταλλικής επιφάνειας
- Εγγενής ικανότητα σχηματισμού αδιάλυτου προστατευτικού φιλμ στη μεταλλική επιφάνεια

Παράγοντες που σχετίζονται κυρίως με το περιβάλλον:

- Συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου στο διάλυμα(pH)
- Επίδραση του οξυγόνου στο διάλυμα σε επαφή με το μέταλλο
- Συγκέντρωση και είδος άλλων ιόντων στο διάλυμα
- Ρυθμός ροής διαλύματος σε επαφή με το μέταλλο
- Ικανότητα του περιβάλλοντος για σχηματισμό προστατευτικών εναποθέσεων στην μεταλλική επιφάνεια
- Θερμοκρασία
- Κύκλοι φόρτισης (διάβρωση κόπωσης)
- Επαφή μεταξύ διαφορετικών μετάλλων ή άλλων υλικών (τοπική διάβρωση) [43]

2.6 Βασικές μορφές διάβρωσης [23,24,25,26,27,28,29]

Η διάβρωση εμφανίζεται σε πολλές μορφές και τύπους. Η διαδικασία για καθέναν από αυτούς επηρεάζεται από μια σειρά παραγόντων των μετάλλων που υπόκεινται σε διάβρωση, του διαβρωτικού συστήματος, κ.λ.π. Οι πιο κοινοί και διακριτοί τύποι διάβρωσης που εντοπίζονται ωστόσο, και αφορούν το σύνολο των μετάλλων περιγράφονται στη συνέχεια. Η διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού του σκυροδέματος αναλύεται σε επόμενη ενότητα.

2.6.1. Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση (Uniform or General Corrosion)

Είναι το πιο κοινό είδος διάβρωσης. Χαρακτηρίζεται από μια χημική ή ηλεκτροχημική δράση, που προχωράει ομοιόμορφα στο σύνολο ή στο μεγαλύτερο μέρος της εκτεθειμένης επιφάνειας με αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός ομοιόμορφου και περίπου ισοπαχούς στρώματος προϊόντος διάβρωσης ή μιας περίπου ομοιόμορφης διάλυσης της επιφάνειας του υλικού.

Το φαινόμενο της διάβρωσης εμφανίζεται συνήθως όταν το μέταλλο είναι σε επαφή με οξύ διάλυμα, αλλά και με ξηρή ατμόσφαιρα (οξειδωση σε υψηλές θερμοκρασίες). Το είδος αυτό της διάβρωσης είναι από τα απλούστερα, γιατί ο χρόνος ζωής των εγκαταστάσεων μπορεί να εκτιμηθεί με ακρίβεια με σχετικά απλές δοκιμές.

Thickness is reduced uniformly



Uniform Corrosion



Εικόνα 2: Ομοιόμορφη Διάβρωση

2.6.2. Διάβρωση με βελονισμούς (Pitting Corrosion)

Σε αυτό το είδος της διάβρωσης εμφανίζεται εκλεκτικός τοπικός σχηματισμός προϊόντος διάβρωσης, ακόμα και όταν το μέταλλο ή κράμα έχει καλυφθεί με προστατευτικό επίστρωμα, ή εκλεκτική διάλυση της επιφάνειας. Έστω και αν η διάβρωση έχει σαν αρχικό στάδιο τον εκλεκτικό τοπικό σχηματισμό προϊόντος διάβρωσης, εξελίσσεται σε τοπική εκλεκτική διάλυση, δηλαδή σχηματίζονται εσοχές και κρατήρες.

Το είδος αυτό της διάβρωσης είναι ένα από τα πιο καταστρεπτικά γιατί προκαλεί καταστροφή των υλικών λόγω διάρτησης, ακόμα και για πολύ μικρό εκατοστιαίο ποσοστό απώλειας βάρους της κατασκευής. Είναι συχνά δύσκολο να διακρίνουμε τους βελονισμούς είτε λόγω του μικρούς τους μεγέθους, είτε γιατί συχνά καλύπτονται από προϊόντα διάβρωσης.

Συνήθως, οι βελονισμοί εμφανίζονται πρώτα στις οριζόντιες επιφάνειες και πολύ λιγότερο στις κάθετες. Το είδος της διάβρωσης αυτό εμφανίζεται επίσης, σε περιβάλλον χλωριόντων κάτω από σταγόνες νερού, κάτω από ακαθαρσίες και μπάζα, ιζήματα, θαλάσσιες αναπτύξεις, σκωρίες και ετερογένειες του μετάλλου, σε νεκρούς χώρους, όπως κακοσχεδιασμένες φλάντζες που επιτρέπουν συγκέντρωση ξένων σωμάτων, κ.λπ.

Ευπαθή μέταλλα στο είδος αυτό της διάβρωσης είναι τα προστατευόμενα με λεπτά στρώματα οξειδίων μέταλλα όπως χαλκός, ανοξείδωτος χάλυβας, αλουμίνιο, τιτάνιο, μαγνήσιο.

Thickness is reduced locally,
majority of surface remains
unattacked



Pitting Corrosion



Εικόνα 3: Διάβρωση με βελονισμούς

2.6.3. Διάβρωση με σχισμές (Crevice Corrosion)

Αυτό το είδος της διάβρωσης είναι άμεσα συνδεδεμένο με την ύπαρξη σχισμών ή προφυλαγμένων περιοχών μεταλλικής επιφάνειας, που μπορούν να προκαλέσουν συχνά έντονη εντοπισμένη διάβρωση εξαιτίας εμφάνισης διαφορετικής συγκέντρωσης μέσα και έξω από αυτή. Συνδυάζεται, επίσης, με την παρουσία μικρών όγκων στάσιμων διαλυμάτων ή στερεών σε οπές, φλάντζες ή παρεμβύσματα, σε σχισμές κάτω από μπουλόνια και πριτσίνια, καθώς και κάτω από επιφανειακές αποθέσεις και χρώματα που έχουν υποστεί μερική αποκόλληση. Ευπαθή μέταλλα σε αυτό το είδος της διάβρωσης είναι αυτά που προστατεύονται από τα οξειδιά τους, π.χ. ανοξείδωτος χάλυβας, αλουμίνιο, τιτάνιο, κ.λ.π.

Thickness is reduced locally, under influence of crevice geometry



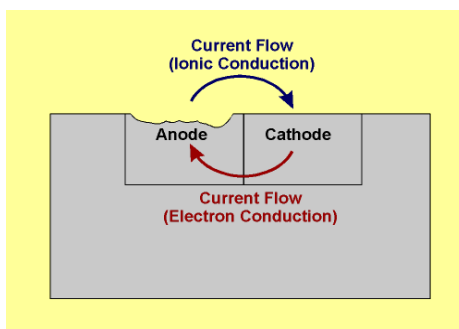
Crevice Corrosion



Εικόνα 4: Διάβρωση με σχισμές

2.6.4. Γαλβανική ή διμεταλλική διάβρωση (Galvanic or two metal corrosion)

Όταν δύο ανόμοια μέταλλα έρθουν σε επαφή μέσα σε διαβρωτικό περιβάλλον ή γενικά αγώγιμο περιβάλλον, τότε αναπτύσσεται μεταξύ τους μια διαφορά δυναμικού που προκαλεί ροή ηλεκτρονίων στο σύστημά τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας διάβρωσης του λιγότερο ανθεκτικού στη διάβρωση μετάλλου (άνοδος) και την ελάττωση της ταχύτητας διάβρωσης του περισσότερο ανθεκτικού (κάθοδος).

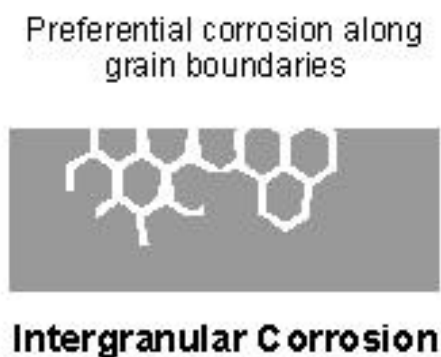




Εικόνα 5: Γαλβανική Διάβρωση

2.6.5. Περικρυσταλλική διάβρωση (Intergranular corrosion)

Η περικρυσταλλική διάβρωση παρουσιάζεται στα περατωτικά όρια των κόκκων, τα οποία είναι ανοδικότερα του κυρίως μετάλλου, λόγω συγκέντρωσης σε αυτά ακαθαρσιών και στοιχείων κραματοποίησης. Η διάβρωση αυτή έχει σαν συνέπεια την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, το οποίο υπό την επίδραση τάσεων, υφίσταται περικρυσταλλικής ρηγματώσεις, ακόμη και αν το επιβαλλόμενο φορτίο είναι αρκετά μικρότερο από εκείνο της αντοχής σε εφελκυσμό. Το πιο σύνηθες παράδειγμα περικρυσταλλικής διάβρωσης παρουσιάζεται στους ωστενιτικούς χάλυβες στην περιοχή των συγκολλήσεων, όπου κατακρημνίζονται καρβίδια λόγω θερμικής κατεργασίας και της χημικής σύστασης των χάλυβων.



Εικόνα 6: Περικρυσταλλική Διάβρωση

2.6.6. Εκλεκτική προσβολή (Selective Attack)

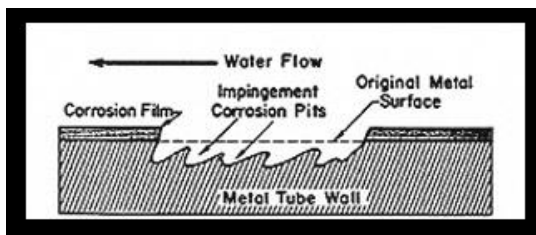
Η εκλεκτική προσβολή εμφανίζεται μόνο σε κράματα, όπου δύο ή περισσότερα μέταλλα συνθέτουν στερεό διάλυμα και αποτελεί το φαινόμενο κατά το οποίο ένα μόνο μέταλλο απομακρύνεται από το διάλυμα αυτό. Το μέταλλο αυτό είναι το λιγότερο ευγενές, ενώ το υπόλοιπο του κράματος διατηρεί τη μεταλλική του μορφή, αλλά με υποβάθμιση της μηχανικής του αντοχής. Συνηθέστερη περίπτωση εκλεκτικής προσβολής είναι η αποψευδαργύρωση του ορείχαλκου. Εμφανίζεται ως ομοιόμορφη(σε στρώσεις) ή ως εντοπισμένη.



Εικόνα 7: Αποψευδραγύρωση Ορείχαλκου

2.6.7. Διάβρωση εκ τριβής (Erosion Corrosion)

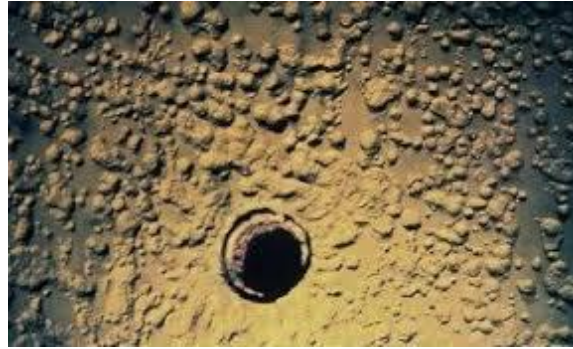
Είναι η επιπλέον διάβρωση που υφίσταται η μεταλλική επιφάνεια λόγω της σχετικής κίνησης του ρευστού με το διαβρωτικό μέσο στο οποίο εκτίθεται, λόγω της μηχανικής δράσης αυτού του ίδιου του ρευστού ή των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων. Συνέπεια είναι η τοπική καταστροφή του προστατευτικού επιφανειακού στρώματος και η αύξηση της ταχύτητας διάβρωσης, λόγω της δημιουργίας τοπικών γαλβανικών στοιχείων μεταξύ των περιοχών που έχουν υποστεί φθορά από εκτριβή και του υπόλοιπου μετάλλου.



Εικόνα 8: Διάβρωση εκ τριβής

2.6.8. Σπηλαιώδης διάβρωση (Cavitation Corrosion)

Αποτελεί ειδική μορφή διάβρωσης εκτριβής. Οφείλεται σε φυσαλίδες ατμού που σπάνε κοντά στη μεταλλική επιφάνεια προκαλώντας κύματα κρούσης και δημιουργώντας τοπικά πιέσεις έως και 4000atm, καταστρέφοντας τη μεταλλική επιφάνεια ή το προστατευτικό της οξείδιο, δημιουργώντας εσοχές, σπηλαιώσεις, κρατήρες και τοπική εξάχνωση του υλικού. . Συνέπεια είναι η επιτάχυνση της διάβρωσης, η οποία συνεχώς αυξάνεται, διότι η ανώμαλη σπογγώδης επιφάνεια που δημιουργείται ευνοεί συνεχώς το σχηματισμό όλο και περισσότερων φυσαλίδων.



Εικόνα 9: Σπηλαιώδης Διάβρωση

Εμφανίζεται κυρίως σε υδραυλικές τουρμπίνες, προπέλες πλοίων, πτερύγια αντλιών, έλικες αεροπλάνων και γενικά σε επιφάνειες που υφίστανται ταχεία ροή υγρών και μεταβολές πίεσης. Είναι πιο έντονο φαινόμενο σε νερό με άλατα απ' ότι σε μαλακό νερό. Δημιουργούνται εσοχές, σπηλαιώσεις, κρατήρες και τοπική εξάχνωση του υλικού, εξαιτίας της δημιουργίας πιέσεων και υποπιέσεων. Τέτοιες συνθήκες δημιουργούνται σε περιστρεφόμενα πτερύγια αντλιών, έλικες πλοίων και αεροπλάνων. Ανάλογη διάβρωση πραγματοποιείται επίσης, και κατά τη ροή ρευστών σε σωλήνες.

2.6.9. Διάβρωση από τριβή (Fetting Corrosion)

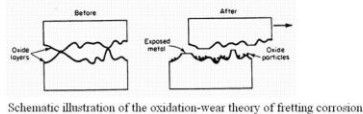
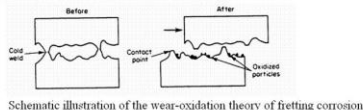
Η διάβρωση από τριβή χαρακτηρίζεται από προσβολή που συμβαίνει στη διεπιφάνεια δύο σε επαφή επιφανειών, μία τουλάχιστον εκ των οποίων είναι μεταλλική, όταν υποφορτίο υφίστανται ελαφρά σχετική ολίσθηση ή μια προς την άλλη. Η ολίσθηση είναι κυρίως παλμική, όπως αυτή που προκαλείται από δόνηση. Εμφανίζεται σε στοιχεία μηχανών, σε πλάκες με μπουλόνια, σε σιδηροτροχιές των σιδηροδρόμων, σε γρανάζια με σφήνα, σε ηλεκτρικές επαφές, κ.λ.π., και έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό σκόνης οξειδίων, που δύσκολα απομακρύνεται, προκαλώντας βελονισμούς ή αυλακώσεις που περιβάλλονται από προϊόντα διάβρωσης.

Η διάβρωση από τριβή εμφανίζεται κυρίως σε έκθεση στην ατμόσφαιρα παρά σε υδατικά διαλύματα. Η μείωση της θερμοκρασίας, η αύξηση του φορτίου ολίσθησης και η μείωση της σκληρότητας του υλικού επιταχύνουν το φαινόμενο.

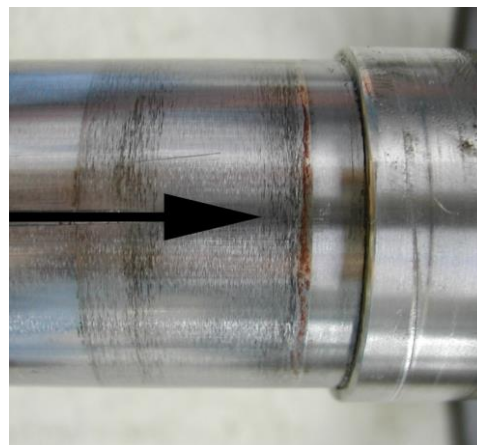
FRETTING CORROSION

Similar to E-C but surface mechanical action provided by wear of another surface . . . generally intermittent, low-amplitude rubbing.

Two theories . . . with same overall result . . .



22

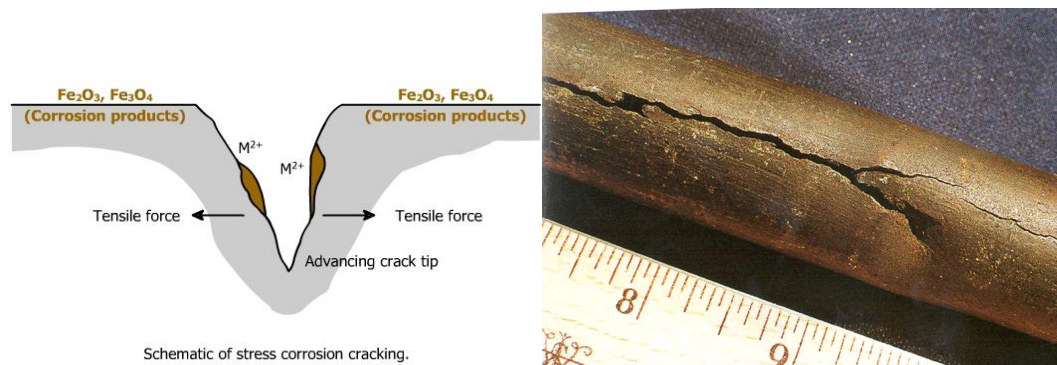


Εικόνα 10: Διάβρωση από τριβή

2.6.10. Διάβρωση με μηχανική καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking)

Είναι η συνδυασμένη δράση μιας τοπικής διαβρωτικής προσβολής και εσωτερικών ή εξωτερικών εφελκυστικών τάσεων. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία λεπτών ρωγμών που προχωρούν στο εσωτερικό του μετάλλου, κάθετα στη διεύθυνση της μηχανικής τάσης, ακολουθώντας περικρυσταλλικό ή ενδοκρυσταλλικό δρόμο. Το φαινόμενο εξελίσσεται σε τρία στάδια: δημιουργία εσοχής, από διάβρωση με βελονισμούς ή μηχανικές κακώσεις, εκκόλαψη και γρήγορη προώθηση της ρωγμής με ταχύτητα που συνήθως είναι ανάλογη του ανοδικού ρεύματος. Στη συνέχεια, μπορεί να συμβεί ψαθυρή θραύση ολόκληρου του τμήματος ακόμη και αν οι εφελκυστικές τάσεις είναι μικρότερες του 10% του φορτίου θραύσης του τμήματος αυτού.

Ο τρόπος αυτός της διάβρωσης οδηγεί σε εξαιρετικά μεγάλες καταστροφές με μεγάλες οικονομικές επιπτώσεις, ενώ συνοδεύεται από μικρή απώλεια υλικού.



Εικόνα 11: Διάβρωση με μηχανική καταπόνηση

2.6.11. Βλάβη από υδρογόνο

Ορίζεται ως η δημιουργία ρωγμών σε ένα υλικό λόγω ρόφησης υδρογόνου, χωρίς να υπάρχει διάβρωση στην επιφάνεια. Ενώ στην κανονική διάβρωση η αποσάθρωση συμβαίνει στην άνοδο, στη βλάβη του υδρογόνου, η αποσάθρωση συμβαίνει στην κάθοδο, όπου εκλύεται υδρογόνο. Απαντάται σε διυλιστήρια πετρελαίου.

Διακρίνεται σε:

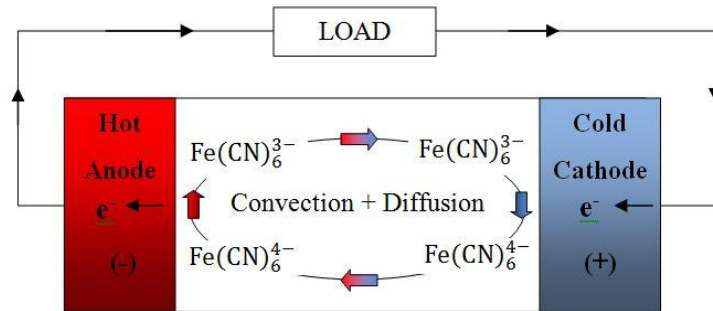
1. Ευθραστοποίηση από υδρογόνο: Προκαλείται από διείσδυση ατομικού υδρογόνου στο μέταλλο, το οποίο είτε ροφάται στις διαταραχές ελαττώνοντας τη δυνατότητα πλαστικής παραμόρφωσης, είτε σχηματίζει εύθραυστα υβρίδια.

2. Δημιουργία φλукταινών από υδρογόνο: Διαχεόμενα άτομα σχηματίζουν μοριακό υδρογόνο σε κοιλότητες ή κενά του μετάλλου ή του κράματος, που λόγω αύξησης της συγκέντρωσης του προκαλεί δημιουργία φλукταινών από υδρογόνο και τελικά θραύση.

Η βλάβη από υδρογόνο επιταχύνεται με την παρουσία κάποιων αερίων, όπως H_2S και την αύξηση της θερμοκρασίας, της μερικής πίεσης του υδρογόνου, της καταπόνησης και του χρόνου έκθεσης.

2.6.12. Θερμογαλβανική διάβρωση (Thermogalvanic Corrosion)

Εμφανίζεται από διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο τμημάτων της ίδιας κατασκευής, η οποία δημιουργεί ανοδικές και καθοδικές περιοχές και προκαλεί τοπική προσβολή του θερμότερου τμήματος.



Εικόνα 12: Θερμογαλβανική Διάβρωση

2.6.13. Διάβρωση κόπωσης (Corrosion fatigue)

Η μορφή της διάβρωσης αυτής προκαλείται από συνδυασμένη δράση διαβρωτικής προσβολής και κυκλικών τάσεων, δηλαδή γρήγορα εναλλασσόμενων εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων. Η φθορά του υλικού είναι σχεδόν πάντοτε μεγαλύτερη από το άθροισμα της φθοράς από διάβρωση και της φθοράς από κόπωση, αν δράσουν χωριστά.

2.6.14. Βιολογική διάβρωση (Biological Corrosion)

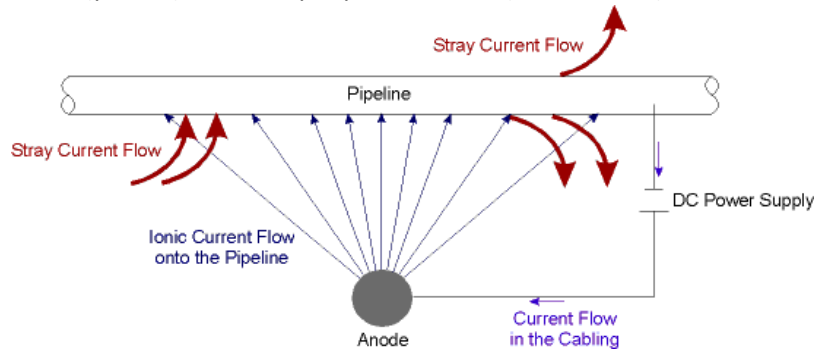
Ορίζεται ως η διάβρωση που ξεκινά ή επιταχύνεται από την παρουσία μικροοργανισμών (βακτηρίδια) ή μικροοργανισμών και λαμβάνει χώρα στο νερό, στο έδαφος, στα φυσικά προϊόντα πετρελαίου και στα διαλύματα πλύσης μεταλλευμάτων. Οι οργανισμοί είτε επιδρούν κατευθείαν στις ανοδικές και καθοδικές δράσεις, είτε προσβάλλουν τα προστατευτικά επιστρώματα ή και τους αναστολείς, είτε παράγουν διαβρωτικές ουσίες και αποθέσεις με τη μορφή σωρών ή εξογκωμάτων.



Εικόνα 13: Βιολογική Διάβρωση

2.6.15. Διάβρωση από ρεύματα διαφυγής (Stray Current Corrosion)

Ρεύματα διαφυγής ονομάζονται τα συνεχή ρεύματα που ακολουθούν δρόμο διαφορετικό από τον προβλεπόμενο. Τα ρεύματα αυτά μπορεί να προέρχονται από σιδηροδρόμους, διατάξεις συγκολλήσεων, συστήματα γείωσης και καθοδικής προστασία, κ.λ.π. Η διάβρωση εμφανίζεται στα σημεία εξόδου των ρευμάτων από τις κατασκευές.



Εικόνα 14: Διάβρωση από ρεύματα διαφυγής

2.6.16. Ατμοσφαιρική Διάβρωση (atmospheric corrosion)

Στην ατμοσφαιρική διάβρωση (atmospheric corrosion) ως ηλεκτρολύτης χρησιμεύει η υγρασία από τις βροχοπτώσεις, την ομίχλη, τα σταγονίδια θαλασσινού νερού ή άλλες πηγές. Τρεις είναι οι βασικοί παράγοντες που έχουν την μεγαλύτερη επιρροή στον διαβρωτική ικανότητα της ατμόσφαιρας σε μια δεδομένη τοποθεσία:

- (1) το ποσό του χρόνου που οι εκτεθειμένες επιφάνειες παραμένουν υγρές στη συγκεκριμένη τοποθεσία.
- (2) η ποσότητα χλωριόντων από τη θάλασσα που φτάνει στις επιφάνειες και
- (3) το ποσό των βιομηχανικών ρύπων (κυρίως οξέων) που φτάνουν στις επιφάνειες.

Σε όλα τα ατμοσφαιρικά περιβάλλοντα υπάρχει περίσσεια οξυγόνου και έτσι η διάβρωση των περισσότερων μετάλλων σε αυτά δεν περιορίζεται από την ποσότητα του διαθέσιμου οξυγόνου και μπορεί να προχωρήσει ταχέως όταν ο ηλεκτρολύτης είναι παρών. Η διαβρωτική ικανότητα της ατμόσφαιρας ποικίλει δραστικά. Η διαφοράς στο ρυθμό διάβρωσης του χάλυβα σε διαφορετικά περιβάλλοντα, για παράδειγμα, είναι της τάξεως του 100. Σε γενικές γραμμές, λιγότερο διαβρωτικές ατμόσφαιρες βρίσκονται σε άνυδρες θέσεις (π.χ. στην έρημο) και οι πιο διαβρωτικές τοποθεσίες είναι οι βιομηχανικές ή βιομηχανικές / παραθαλάσσιες. Επιπλέον, οι υγρές τροπικές περιοχές είναι πολύ διαβρωτικό τόσο λόγω του χρόνου έκθεσης στην υγρασία, όσο και των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν.[21]

3. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ (αιτίες – μηχανισμοί)

3.1. Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση οπλισμού

3.1.1 Το είδος και η δομή του σκυροδέματος

Ο πιο σημαντικός παράγοντας στη διάβρωση του σιδηροπλισμού είναι το είδος του τσιμέντου που χρησιμοποιείται. Το σκυρόδεμα αποτελείται κυρίως από τσιμέντο, αδρανή και νερό και ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται, προστίθενται κάποια βελτιωτικά των ιδιοτήτων του. Η ποιότητα του σκυροδέματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των υλικών από τα οποία αποτελείται, αλλά και από άλλους παράγοντες όπως η αναλογία και ο τρόπος ανάμιξής τους, η συντήρηση, η κατασκευή των καλουπιών και η συμπίκνωση του σκυροδέματος μέσα στα καλούπια.

Η επιλογή των προσμίξεων που περιέχονται στο τσιμέντο επιδρούν στις τελικές ιδιότητες του. Έτσι, για παράδειγμα, το τσιμέντο που είναι ανθεκτικό σε θειικά, σε περιβάλλον που περιέχει χλωριόντα επιταχύνει τη διάβρωση του σιδηροπλισμού. Αντίστοιχα, τσιμέντα που περιέχουν φυσικές ή τεχνητές ποζολάνες, εξαιτίας της ποζολανικής δράσης, μειώνουν το πορώδες του. Το μικρότερο πορώδες έχει ως αποτέλεσμα την παρεμπόδιση της μεταφοράς των διαβρωτικών συστατικών του περιβάλλοντος προς τον οπλισμό. Επιπρόσθετα, πολλές ποζολάνες πέραν από τη μείωση του πορώδους παρεμποδίζουν τη διάβρωση με δέσμευση χλωριόντων εξαιτίας της περιεκτικότητάς τους σε Al_2O_3 . Ακόμα, η χρήση της σκωρίας υψικαμίνων και της ιπτάμενης τέφρας ως πρόσθετα στο τσιμέντο μειώνει τον κίνδυνο πραγματοποίησης αλκαλοπυριτικής δράσης.

Ακόμα, σημαντικό ρόλο παίζει και ο χρόνος συντήρησης του σκυροδέματος. Όσο ο χρόνος συντήρησης γίνεται μεγαλύτερος, τόσο το πορώδες και, συνεπώς, η διάβρωση του σιδηροπλισμού, ελαττώνονται.

Επίσης η ποιότητα του σιδηροπλισμού επηρεάζεται τόσο από την ποσότητα όσο και από την ποιότητα του νερού στο σκυρόδεμα. Επειδή η ποσοστιαία αναλογία του νερού ανάμιξης και επομένως και κάθε ξένης ουσίας μέσα σε αυτό, είναι μικρή, το νερό επηρεάζει σε μικρό βαθμό την ποιότητα του σκυροδέματος. [6] Όταν πρόκειται για πόσιμο νερό δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην ποιότητα του σκυροδέματος. Η σύσταση του νερού επηρεάζει περισσότερο την ποιότητα του σκυροδέματος όταν έχει χρησιμοποιηθεί νερό ποταμών ή θάλασσας, λόγω της περιεκτικότητάς του σε χλωριόντα, γι' αυτό και το νερό που χρησιμοποιείται θα πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγραφή EN 1008.

Τέλος, το είδος και η κοκκομετρία των αδρανών είναι, επίσης, σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του σκυροδέματος. Αν τα αδρανή είναι συμπαγή (χωρίς πόρους), τότε η διέλευση των διαβρωτικών συστατικών γίνεται μόνο μέσα από τους πόρους του τσιμεντοπολτού. Στην περίπτωση όμως κατά την οποία είναι πορώδη, η διέλευση των

διαβρωτικών ουσιών γίνεται και μέσα από τους πόρους τους, με αποτέλεσμα η διάβρωση να είναι μεγαλύτερη. [22]

3.1.2. Το πάχος επικάλυψης του οπλισμού από το σκυρόδεμα

Τα διαβρωτικά συστατικά, από το περιβάλλον, δεν πρέπει να διαπεράσουν την επικάλυψη του σκυροδέματος και να φτάσουν στην επιφάνεια του οπλισμού. Έτσι, όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του σκυροδέματος, τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται (εφόσον τα άλλα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος παραμένουν ίδια), για να φτάσουν τα διαβρωτικά συστατικά στον οπλισμό. Η μετακίνηση των συστατικών είναι γίνεται με διάχυση. Επομένως, όσο μεγαλύτερο είναι το πορώδες του σκυροδέματος, τόσο μεγαλύτερο πρέπει να είναι και το πάχος επικάλυψής του οπλισμού, ώστε να διατηρηθεί ο ίδιος βαθμός προστασίας του. [22]

3.1.3. Η παρουσία νερού στο σκυρόδεμα

Το νερό στους πόρους του σκυροδέματος ρυθμίζει τη μεταφορά των διαφόρων ιόντων ή αερίων στο εσωτερικό του, αλλά και την ηλεκτρική αντίσταση του. Η επίδραση του νερού στην ηλεκτρική αντίσταση και στη μεταφορά του οξυγόνου (και γενικότερα των αερίων) είναι αντίστροφη. Το κορεσμένο με νερό σκυρόδεμα έχει τη μικρότερη ηλεκτρική αντίσταση ή, αλλιώς, τη μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα, ταυτόχρονα, όμως, παρεμποδίζει την απευθείας είσοδο του οξυγόνου. Στο κορεσμένο, με νερό, σκυρόδεμα, μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο διάχυση του διαλυμένου στο νερό οξυγόνου, που είναι μικρή. Αντίθετα, στο ξηρό σκυρόδεμα, η μεταφορά του οξυγόνου μέσα από τους άδειους πόρους είναι σημαντική. Όμως, η ηλεκτρική αντίσταση του ξηρού σκυροδέματος είναι μεγάλη, ώστε το ρεύμα μεταξύ των πόλων του γαλβανικού στοιχείου διάβρωσης είναι πολύ μικρό. Επομένως, ο κίνδυνος διάβρωσης σε ξηρό και κορεσμένο σε νερό σκυρόδεμα είναι μικρός, ενώ στις ενδιάμεσες περιπτώσεις είναι μεγαλύτερος.

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για τη διάβρωση του οπλισμού του σκυροδέματος, αλλά και του ίδιου του σκυροδέματος, είναι το θαλασσινό νερό. Αυτό που συμβαίνει κατά την έκθεση οπλισμένου σκυροδέματος σε θαλασσινό νερό είναι η αποπαθητικοποίηση του οπλισμού και η απομάκρυνση του σιδήρου με τη μορφή σκουριάς $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$.

3.1.4. Η παρουσία ρωγμών στο σκυρόδεμα

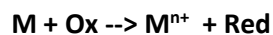
Η παρουσία ρωγμών στο σκυρόδεμα έχει σαν αποτέλεσμα την διευκόλυνση της μεταφοράς του οξυγόνου, του διοξειδίου του άνθρακα και των χλωριόντων στην επιφάνεια του οπλισμού. Γενικά στο σκυρόδεμα υπάρχουν ρωγμές με πλάτος μικρότερο από 2-3 mm. Η ύπαρξη ρωγμών με πλάτος μεγαλύτερο από 0,3 mm οδηγεί σε διάβρωση του οπλισμού, καθώς η μεταφορά οξυγόνου, διοξειδίου του άνθρακα και χλωριόντων από τις ρωγμές αυτές είναι σημαντική.

3.2. Μηχανισμός της διάβρωσης

Κατά τη διάβρωση πραγματοποιούνται ηλεκτροχημικές δράσεις, δράσεις δηλαδή όπου υπάρχει μεταφορά φορτίου στη διεπιφάνεια μεταξύ ηλεκτρονικού αγωγού (μέταλλο) και ιοντικού (στερεός ή υγρός διαλύτης) και έχουν ως αποτέλεσμα την οξείδωση του μετάλλου (M) και την αναγωγή ενός οξειδωτικού O_x, σύμφωνα με παρακάτω:



Συνολικά:



Η προσβολή μιας μεταλλικής επιφάνειας λόγω διάβρωσης διακρίνεται σε ομοιόμορφη και εντοπισμένη, ανάλογα με τη σχετική, μεταξύ τους, θέση των ανοδικών και καθοδικών περιοχών. Αναλυτικότερα:

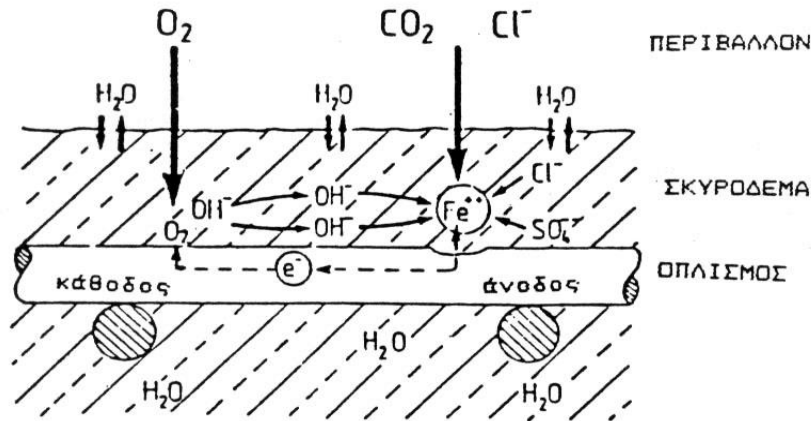
1. Η **ομοιόμορφη διάβρωση** εμφανίζεται σε καθαρά μέταλλα και αμαγάλματα όταν οι ταυτόχρονα εμφανιζόμενες ανοδικές και καθοδικές δράσεις κατανέμονται κατά τυχαίο και όχι μεταξύ τους σαφώς διαφοροποιούμενο τρόπο πάνω στο σύνολο της μεταλλικής επιφάνειας κατά το φαινόμενο της διάβρωσης, οπότε οι ανοδικές και οι καθοδικές επιφάνειες είναι ίσες.
2. Η **εντοπισμένη διάβρωση** εμφανίζεται σε μέταλλα τεχνικής καθαρότητας (άρα και χαμηλότερης σταθερότητας έναντι άλλων μετάλλων που περιέχουν προσμίξεις, ακαθαρσίες, ετερογένειες) όταν οι εμφανιζόμενες ανοδικές και καθοδικές περιοχές είναι διαχωρισμένες τοπικά.

Ο μηχανισμός της διάβρωσης μπορεί να είναι καθαρά χημικός, σε περίπτωση απουσίας υγρασίας, π.χ. χημική οξείδωση του μετάλλου σε ατμόσφαιρα ξηρού οξυγόνου. Αλλά σε περίπτωση παρουσίας υγρασίας, ο μηχανισμός είναι πάντα ηλεκτροχημικός. Όσο μεγαλύτερη αγωγιμότητα έχει το διαβρωτικό περιβάλλον, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαβρωτική του αποτελεσματικότητα.

Ο μηχανισμός της διάβρωσης ενός μετάλλου περιλαμβάνει το σχηματισμό πολλών μικρογαλβανικών στοιχείων, διεσπαρμένων στην επιφάνεια του, όπου αναπτύσσονται ανοδικές περιοχές, δηλαδή περιοχές που ευνοούν περισσότερο την οξείδωση, δηλαδή την αποβολή ιόντων προς το περιβάλλον, και καθοδικές περιοχές, δηλαδή περιοχές με μικρότερη τέτοια τάση. Τότε, η λειτουργία του γαλβανικού στοιχείου αποδίδει ρεύμα, το οποίο λέγεται ρεύμα διάβρωσης. Το μικροκύκλωμα κλείνει από τη μεριά του μετάλλου με τη μεταφορά e^- , από την άνοδο στην κάθοδο και προς την πλευρά του περιβάλλοντος με το αγωγήμο περιβάλλον, μέσα στο οποίο λαμβάνει χώρα μετακίνηση ιόντων, δηλαδή με ιοντικό ρεύμα. Γενικά, το ρεύμα διάβρωσης είναι μικρό μεν, αλλά επαρκές σε σχετικά μεγάλα χρονικά διαστήματα να μετατρέψει τοπικά το υλικό της ανόδου σε προϊόντα διάβρωσης.

3.3. Μηχανισμός διάβρωσης του χάλυβα

Ειδικότερα, σε ότι αφορά τη διάβρωση του σπλισμού του σκυροδέματος, πρόκειται για μία ηλεκτροχημική δράση, που λαμβάνει χώρα κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις. Η ηλεκτροχημική αυτή δράση απαιτεί τη ύπαρξη ανόδου, καθόδου και ηλεκτρολύτου μέσω του οποίου διακινούνται τα ιόντα. Η διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών δράσεων πραγματοποιείται στη διεπιφάνεια μετάλλου - ηλεκτρολύτη και ακολουθεί η μετακίνηση των ιόντων μέσω του ηλεκτρολύτη.



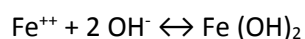
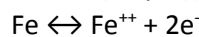
Εικόνα 15: Σχηματισμός γαλβανικού στοιχείου στον σιδηροπλισμό σκυροδέματος, με αποτέλεσμα την διάβρωση του σπλισμού (κατά Evans)

Η ανοδική και η καθοδική ηλεκτροχημική δράση συμβαίνουν ταυτόχρονα σε διαφορετικές περιοχές του χάλυβα, ενώ ένας αριθμός ηλεκτρονίων μετακινείται μέσα στον χάλυβα. Ο λόγος σχηματισμού στην επιφάνεια του χάλυβα ταυτόχρονα ανοδικών και καθοδικών περιοχών οφείλεται στη δημιουργία τοπικών γαλβανικών στοιχείων.

Κατά την παραγωγική διαδικασία του κράματος χάλυβα δημιουργούνται τοπικά γαλβανικά στοιχεία. Ένα κράμα, όπως ο δομικός χάλυβας, από τη μεταλλουργική διαδικασία παραγωγής του, έχει αιτίες σχηματισμού τοπικών γαλβανικών στοιχείων. Ανομοιομορφίες μικρής κλίμακας στη χημική σύσταση κράματος, γεωμετρικές ανωμαλίες στην επιφάνεια, η ύπαρξη οξειδίων στην επιφάνεια, οδηγούν στο σχηματισμό τοπικών γαλβανικών στοιχείων με μία διαφορά δυναμικού της τάξης των μερικών δεκάδων mV. Οι διαφορές αυτές δυναμικού είναι αρκετές για να οδηγήσουν στο σχηματισμό ανοδικών και καθοδικών περιοχών. Εάν υπήρχε μόνο η διαδικασία αυτή διάβρωσης μέσω των τοπικών γαλβανικών στοιχείων, τότε οι αστοχίες από τη διάβρωση θα ήταν σημαντικά μικρότερες από αυτές που έχουν παρατηρηθεί.

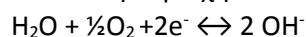
Στην περίπτωση που το διαβρωτικό μέσο του χάλυβα είναι το νερό, η διάβρωσή του περιγράφεται από τις ακόλουθες ηλεκτροχημικές δράσεις:

Ανοδική περιοχή



Ως άνοδος συμπεριφέρεται το τμήμα του χάλυβα όπου έχει καταστραφεί το προστατευτικό στρώμα οξειδίων. Σ' αυτή την περιοχή, τα άτομα σιδήρου μετατρέπονται σε ιόντα, ενώ ελευθερώνονται ηλεκτρόνια. Το σχηματιζόμενο $\text{Fe}(\text{OH})_2$ είναι αδιάλυτο και σχηματίζει ένα μικρής συνάφειας πορώδες και ογκώδες στρώμα (σκουριά) πάνω στην επιφάνεια του χάλυβα.

Καθοδική περιοχή

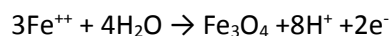
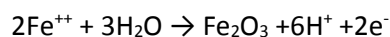


Ως κάθοδος συμπεριφέρεται εκείνη η περιοχή του χάλυβα όπου υπάρχει νερό και οξυγόνο, χωρίς να είναι απαραίτητο να έχει καταστραφεί το λεπτό στρώμα των οξειδίων. Ο ρυθμός της παραπάνω δράσης καθορίζεται από το ρυθμό διάχυσης του οξυγόνου.

Το διαλυμένο στο νερό οξυγόνο φθάνει στην καθοδική περιοχή μέσω των τριχοειδών πόρων και των ρωγμών του σκυροδέματος και οδηγεί στην διάβρωση του σιδηροπλισμού όταν η τιμή του pH βρίσκεται μεταξύ 4 και 10.

Το σχηματιζόμενο στρώμα του $\text{Fe}(\text{OH})_2$ δεν προσφέρει καμία προστασία στον οπλισμό καθώς είναι πορώδες και ελάχιστα συμπαγές, με αποτέλεσμα η διάβρωση να προχωρά μέχρι την ολοσχερή μετατροπή του σιδήρου σε υδροξείδιο. Απαραίτητη προϋπόθεση για την συνέχιση της δράσης αυτής είναι η παρουσία οξυγόνου.

Αντίστοιχα, όταν η τιμή του pH είναι μεγαλύτερη από 10 οι δράσεις που πραγματοποιούνται στην ανοδική περιοχή είναι οι ακόλουθες:



Σύμφωνα με τις παραπάνω αντιδράσεις είναι δυνατόν να συμβεί οξείδωση, δηλαδή διάβρωση ακόμη και όταν η τιμή του pH είναι μεγαλύτερη από 10. Η διαφορά όμως είναι, ότι τα προϊόντα των αντιδράσεων αυτών (Fe_2O_3 , Fe_3O_4) σχηματίζουν ένα συμπαγές και αδιαπέραστο στρώμα που παθητικοποιεί τον οπλισμό και τον απομονώνει από το διαβρωτικό περιβάλλον.

Η τιμή του pH του υγρού των πόρων του σκυροδέματος βρίσκεται συνήθως μεταξύ 12,5 και 13,5 με αποτέλεσμα ο εγκιβωτισμένος οπλισμός να παραμένει σε παθητικοποιημένη κατάσταση. Αν το σκυρόδεμα περιέχει ρωγμές, το νερό μπορεί να εισχωρήσει, να φθάσει στην περιοχή του οπλισμού και να απομακρύνει τα OH^- που συντελούν στην παθητικοποίηση του σιδήρου. Όταν υπάρχει ρωγμή που εκτείνεται μέχρι τον οπλισμό, ο χάλυβας θα συμπεριφερθεί σαν να ήταν άμεσα βυθισμένος στο θαλασσινό νερό, με αποτέλεσμα τη γρήγορη διάβρωσή του.

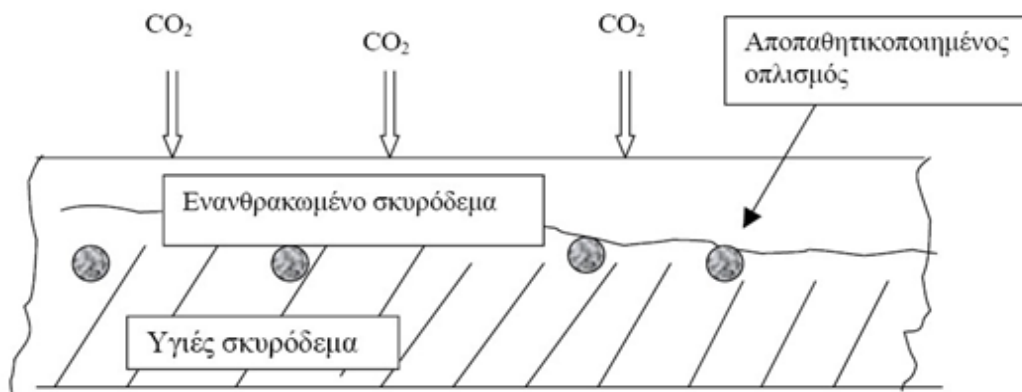
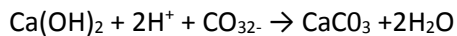
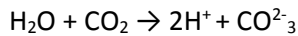
Η απομάκρυνση των OH^- όμως εμποδίζεται από τις αντιδράσεις μεταξύ των ιόντων του θαλασσινού νερού και του ενυδατωμένου τσιμέντου, τα προϊόντα των οποίων φράζουν προοδευτικά τις ρωγμές του σκυροδέματος.

3.4 Αιτίες Διάβρωσης

Οι κυριότερες αιτίες διάβρωσης είναι οι ακόλουθες:

3.4.1. Ενανθράκωση σκυροδέματος

Ενανθράκωση είναι η αντίδραση του διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας με το διοξείδιο του ασβεστίου που εμπεριέχεται στο σκυρόδεμα, προς ανθρακικό ασβέστιο. Αποτέλεσμα της ενανθράκωσης είναι η μεταβολή του pH σε τιμές χαμηλότερες του 9,0 με συνέπεια ο χάλυβας να μεταπηδά από την παθητική στην ενεργή κατάσταση και να ξεκινά η διάβρωση του οπλισμού. Η αντίδραση της ενανθράκωσης ξεκινάει από την εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος και σταδιακά προχωράει προς το εσωτερικό του. Η επιφάνεια που διαχωρίζει το ενανθρακωμένο από το υγιές σκυρόδεμα ονομάζεται μέτωπο της ενανθράκωσης. Η διαδικασία της ενανθράκωσης (Εικ. 16) του σκυροδέματος περιγράφεται από τις ακόλουθες ηλεκτροχημικές δράσεις:



Εικόνα 16: Διάβρωση οπλισμού σε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα

3.4.2. Επίδραση Χλωριόντων

Τα χλωριόντα δεν έχουν αξιόλογη δυνατότητα διάβρωσης του σκυροδέματος, αλλά έχουν μεγάλη διαβρωτική ικανότητα στον οπλισμό. Η διάβρωση του οπλισμού του σκυροδέματος από τα χλωριόντα αποτελεί ένα φαινόμενο, κατά το οποίο η αποπαθητικοποίηση του χάλυβα μπορεί να αρχίσει σε υψηλότερες από τις κανονικές τιμές pH του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος με τη μορφή βελονισμών. Η φθορά στο σκυρόδεμα από τη διάβρωση του σιδηροοπλισμού εκδηλώνεται με τη μορφή διόγκωσης, ρηγμάτωσης και θρυμματισμού της επικάλυψης του οπλισμού.

Τα χλωριόντα, που βρίσκονται στη μάζα του σκυροδέματος, μπορεί να προέρχονται είτε από τα υλικά κατασκευής του (π.χ. ανεπαρκώς κατεργασμένα αδρανή, άμμος θαλάσσης, γλυφό νερό), στα οποία βρίσκονται με τη μορφή αλάτων τους, είτε μπορεί να μεταφέρονται από το περιβάλλον στο εσωτερικό του (διείσδυση θαλασσινού νερού και διαλυμάτων

αλάτων από διάλυση του πάγου). Στην πρώτη περίπτωση, τα χλωριόντα είναι σχεδόν ομοιόμορφα κατανεμημένα στη μάζα του σκυροδέματος, ενώ στη δεύτερη, η συγκέντρωση παρουσιάζει μία μέγιστη τιμή κοντά στην επιφάνεια και ελαττώνεται όσο το βάθος από την επιφάνεια του σκυροδέματος αυξάνει.

Η μεταφορά των χλωριόντων από το περιβάλλον στο εσωτερικό του σκυροδέματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους, είτε με διάχυση είτε με μεταφορά τους μέσω του νερού.

Όταν η μεταφορά τους γίνεται με το δεύτερο τρόπο, τότε τα ποσά των μεταφερόμενων χλωριόντων είναι μεγαλύτερα συγκριτικά με εκείνα του πρώτου τρόπου. Η διείδυση των χλωριόντων στη μάζα του σκυροδέματος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, οι σπουδαιότεροι από τους οποίους είναι:

- Το πορώδες και η κατανομή του μεγέθους των πόρων του σκυροδέματος.
- Το είδος του χρησιμοποιηθέντος τσιμέντου.
- Η ποσότητα του νερού των πόρων του σκυροδέματος
- Οι περιβαλλοντικές συνθήκες

Όταν τα χλωριόντα εισέρχονται στο εσωτερικό του σκυροδέματος, τότε αυτά μπορούν να οδηγήσουν σε δύο περιπτώσεις διάβρωσης:

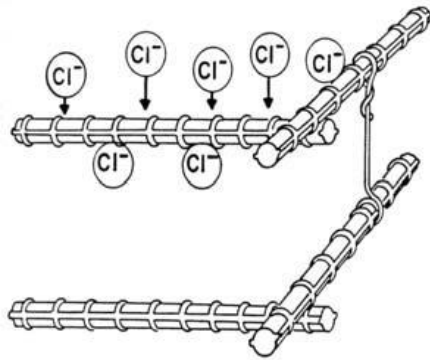
1. Διάβρωση με δημιουργία τοπικού γαλβανικού στοιχείου
2. Διάβρωση με δημιουργία γαλβανικού μακροστοιχείου.

Ο Σχηματισμός Μακροστοιχείων

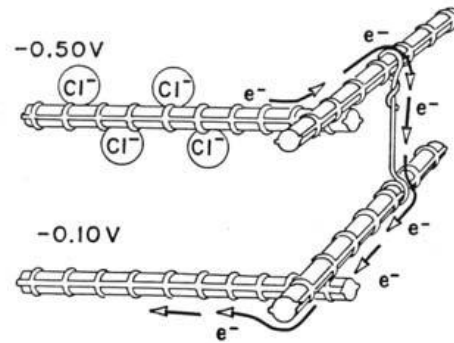
Τα μακροστοιχεία, σε αντίθεση με τα τοπικά γαλβανικά στοιχεία, εμφανίζονται σε μεγάλες περιοχές οπλισμένου σκυροδέματος και όχι μόνο στο χάλυβα.

Ένα μακροστοιχείο δημιουργείται και στην περίπτωση της επαφής δύο διαφορετικών μετάλλων. Εάν ένας επιψευδαργυρωμένος (γαλβανιζέ) χάλυβας έρθει σε επαφή, ηλεκτρικά αγώγιμη, με έναν κοινό χάλυβα μέσα στη μάζα του σκυροδέματος, δημιουργείται γαλβανικό μακροστοιχείο λόγω διαφορετικών μετάλλων. Το ίδιο θα συμβεί και στην επαφή ανοξειδωτού χάλυβα με κοινό χάλυβα.

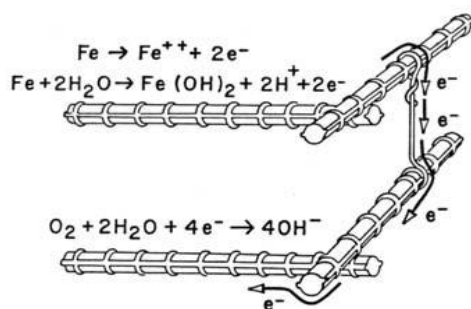
Στην περίπτωση, όμως, του οπλισμένου σκυροδέματος, η δημιουργία μακροστοιχείων οφείλεται σε επιδράσεις του περιβάλλοντος. Η δημιουργία ενός μακροστοιχείου, λόγω χλωριόντων εικονίζεται στο παρακάτω σχήμα. Λόγω του θαλάσσιου περιβάλλοντος, τα χλωριόντα εισέρχονται στο σκυρόδεμα από μία διεύθυνση. Τα χλωριόντα φθάνουν μετά από ένα χρονικό διάστημα στους πρώτους οπλισμούς, ενώ οι ευρισκόμενοι προς το εσωτερικό τμήμα του κτιρίου δεν έχουν γύρω τους χλωριόντα. Μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών χαλύβων, δημιουργείται, μέσω των συνδετήρων, μακροστοιχείο. Οι οπλισμοί, που έχουν ήδη γύρω τους χλωριόντα αποτελούν την άνοδο, ενώ οι οπλισμοί χωρίς χλωριόντα, αποτελούν την κάθοδο του γαλβανικού στοιχείου. Μέσω των πόρων του σκυροδέματος αρχίζει η μεταφορά των ιόντων.



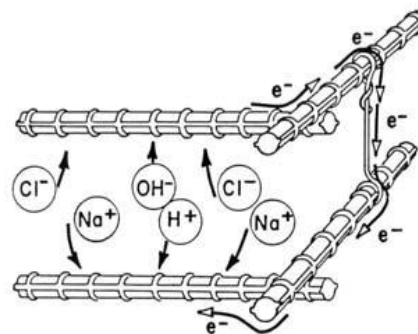
(α) Διείσδυση των χλωριδίων μέχρι τους πρώτους σπλισμούς



(β) Δημιουργία γαλβανικού μακροστοιχείου



(γ) Ηλεκτροχημικές αντιδράσεις του γαλβανικού μακροστοιχείου.



(δ) Μεταφορά ιόντων

Εικόνα 17: Σχηματισμός μακροστοιχείου σε σκυρόδεμα με χλωριόντα

Η ταχύτητα διάβρωσης εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος του γαλβανικού μακροστοιχείου. Η ένταση του ρεύματος εξαρτάται από το δυναμικό του μακροστοιχείου, την ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος και το λόγο μεταξύ της ανοδικής προς την καθοδική επιφάνεια.

3.4.3. Ρωγμές

Η παρουσία των ρωγμών στο σκυρόδεμα επιταχύνει την διάχυση των διαβρωτικών ουσιών του περιβάλλοντος στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος και το βάθος των ρωγμών, τόσο ταχύτερη θα είναι η διάβρωση. Όταν οι ρωγμές φθάσουν στην επιφάνεια του σπλισμού, τότε αρχίζει η διάβρωση του.

Αν το πλάτος της ρωγμής και το πάχος της επικάλυψης είναι μικρά, τότε δημιουργείται ένα γαλβανικό μακροστοιχείο, στο οποίο η άνοδος είναι η περιοχή του σπλισμού που είναι ακάλυπτη προς τη ρωγμή, ενώ η κάθοδος είναι η περιοχή του σπλισμού που είναι καλυμμένη από σκυρόδεμα γύρω από τη ρωγμή.

3.5. Αποτελέσματα διάβρωσης οπλισμού

Ομοιόμορφη διάβρωση: Εμφανίζεται ομοιόμορφα σε όλο το μήκος των ράβδων του σιδηρού οπλισμού, έχει ως συνέπεια αφ' ενός τη μείωση της διατομής του χάλυβα και αφ' ετέρου τη δημιουργία ασυνεχειών στην επιφάνεια του χάλυβα. Το είδος αυτό της διάβρωσης μειώνει την αντοχή σε εφελκυσμό του χάλυβα, ανάλογα με τη μείωση της διατομής και μειώνει επίσης και την αντίσταση του χάλυβα στην κόπωση.

Συμβαίνει στις περιπτώσεις, όπου η ενανθράκωση του τσιμέντου φτάνει στο βάθος εκείνο, στο οποίο βρίσκονται οι χαλύβδινες ράβδοι και μικρές ποσότητες υγρασίας. Η φθορά που ακολουθεί φαίνεται στα δομικά στοιχεία ως μία λεπτή σχισμή, παράλληλη σχισμή παράλληλη προς την τοποθέτηση της ράβδου του χάλυβα. Το είδος αυτό είναι εύκολα ορατό και είναι έτσι δυνατό να λαμβάνονται διορθωτικά μέτρα.

Τοπική διάβρωση: Αυτή συμβαίνει σε ορισμένες θέσεις και έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διατομής, ενώ η υπόλοιπη ράβδος μπορεί να μείνει ανέπαφη. Η περίπτωση αυτή είναι συνήθης σε περιπτώσεις τοπικά αυξημένης συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου. Επίσης, σε περιπτώσεις προεκτάσεων ή συγκολλήσεων των ράβδων του σιδήρου, εμφανίζεται το είδος αυτό της διάβρωσης. Οι συνέπειες είναι η τοπική μείωση της διατομής των ράβδων και η μείωση της ικανότητας τους να φέρουν φορτίο. Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η μείωση της διατομής οφείλεται στην τοπική διάβρωση, η ράβδος του σιδήρου γίνεται πλέον εύθραυστη και είναι δυνατόν, με τον τρόπο αυτό, να μην υπάρχουν ορατές προειδοποιήσεις για τη μείωση της αντοχής της κατασκευής. Σε άλλες περιπτώσεις, πάλι, τοπικής διάβρωσης, είναι δυνατόν να προκληθούν ρηγματώσεις στο σκυρόδεμα.

3.6. Αποτίμηση του βαθμού διάβρωσης του οπλισμού

Η ύπαρξη και λειτουργία γαλβανικών μακροστοιχείων οδηγεί σε διάβρωση μεγάλης έκτασης και ταχύτητας που οδηγεί σε:

- Μείωση της διατομής του οπλισμού, με συνέπειες τη μείωση της συνάφειας οπλισμού και σκυροδέματος και τέλος στη μείωση της στατικής ικανότητας της κατασκευής.
- Δημιουργία ρωγμών λόγω του σχηματισμού οξειδίων στην επιφάνεια του οπλισμού, τα οποία με το μεγαλύτερο του χάλυβα όγκο τους ασκούν εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα.
- Όταν τα γαλβανικά μακροστοιχεία έχουν σχηματιστεί θα πρέπει να ληφθούν μέτρα για την εξαφάνισή τους.

4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες υπάρχει υποψία διάβρωσης κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα, υπάρχει ανάγκη άμεσης διεξαγωγής ελέγχων προκειμένου να αποτραπούν υψηλά κόστη επισκευών ή και απρόβλεπτες καταστροφές. Ο έλεγχος είναι δυνατός λόγω της ηλεκτροχημικής φύσεως της διάβρωσης. Συγκεκριμένα, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις δυναμικών ημιστοιχείου, μετρήσεις αντιστάσεως και μετρήσεις ρυθμού διάβρωσης.

Επομένως, προκειμένου να αποφευχθούν τα αρνητικά αποτελέσματα της διάβρωσης, είναι απαραίτητα να γίνουν επεμβατικές ενέργειες στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, οι οποίες έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές, τόσο σε υπάρχουσες κατασκευές, όσο και κατά τη φάση του σχεδιασμού, στον οπλισμό ή συνδυαστικά.

Η εφαρμογή κατάλληλης ή συνδυασμού κατάλληλων μεθόδων προστασίας, ανάλογα με την κατασκευή, αποβλέπει στην ελάττωση της ταχύτητας διάβρωσης, μέσω της μεταβολής των θερμοδυναμικών ή των κινητών στοιχείων της διαβρωτικής δράσης. [23]

Οι κυριότερες μέθοδοι προστασίας αφορούν σε:

4.1 Τροποποίηση μετάλλου

Η αντίσταση σε διάβρωση σε συγκεκριμένο περιβάλλον που προβάλλει ένα μέταλλο, μπορεί να βελτιωθεί με συγκεκριμένες διεργασίες, που έχουν ως αποτέλεσμα την αλλαγή της σύστασής του, της δομής ή των εσωτερικών τάσεων του υλικού, κ.λ.π.

Η επέμβαση στη σύσταση του υλικού (κραματοποίηση) αυξάνει την αντίσταση σε διάβρωση. Επιπλέον, στα μέταλλα εφαρμόζονται και διεργασίες καθαρισμού, θερμικές κατεργασίες, ανόπτηση για εξάλειψη των εφελκυστικών τάσεων ή εισαγωγή θλιπτικών τάσεων, κ.λπ.

Στην περίπτωση του οπλισμένου σκυροδέματος, είναι συχνή η χρήση ειδικών χαλύβων (επιψευδαργύρωση του χάλυβα, ανοξειδωτοι χάλυβες ή επικαλύψεις).

Η επιψευδαργύρωση προστατεύει το χάλυβα από την ατμοσφαιρική διάβρωση και τη διάβρωση από ορισμένα είδη νερού. Στο αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος, ο ψευδάργυρος αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου, σχηματίζοντας ένα προστατευτικό επικαλυπτικό στρώμα. Το απαιτούμενο πάχος επιψευδαργύρωσης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του χάλυβα και τη διαδικασία επιψευδαργύρωσης, κατά την οποία ο χάλυβας αρχικά, καλύπτεται από ένα κράμα Fe-Zn και στη συνέχεια επικάθεται το επίστρωμα ψευδαργύρου. Με την ενανθράκωση, ωστόσο, ο Zn λειτουργεί προστατευτικά προς το χάλυβα διαβρωνόμενος ο ίδιος. Επιπλέον, σε περιβάλλον χλωριόντων ο ψευδάργυρος προστατεύει το χάλυβα μέχρι η συγκέντρωση των Cl⁻ να υπερβεί τα 1,5g/100g τοιμέντου, ενώ το αντίστοιχο όριο για το χάλυβα είναι 0,4g/100g τοιμέντου. Το κόστος του επιψευδαργυρωμένου είναι 1,5-2 φορές υψηλότερο του κοινού δομικού χάλυβα.

Οι ανοξειδωτοί χάλυβες, επίσης, εφαρμόζονται αντί των κοινών χαλύβων, γιατί καλύπτουν ταυτόχρονα τις απαραίτητες μηχανικές ιδιότητες. Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες ανοξειδωτων χαλύβων - ωστενιτικοί, φερριτικοί και μαρτεσινιτικοί - από τους οποίους οι ωστενιτικοί χάλυβες είναι οι πιο κατάλληλοι για χρήση οπλισμού στο σκυρόδεμα. Η επιλογή συγκεκριμένου τύπου ανοξειδωτου χάλυβα για τον οπλισμό εξαρτάται από παραμέτρους, όπως η διαβρωτικότητα του περιβάλλοντος, αν απαιτούνται συγκολλήσεις, οι παραλαμβανόμενες τάσεις, θερμοκρασία, κ.λ.π.

4.2. Επεμβάσεις στο σκυρόδεμα

4.2.1. Επανακαλοποίηση

Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι η αύξηση του pH του σκυροδέματος, όταν αυτό έχει μειωθεί, λόγω ενανθράκωσης ή άλλων αιτιών.

Η επιφάνεια του σκυροδέματος επαλείφεται με διάλυμα υδροξειδίου του ασβεστίου. Η διαδικασία της επανακαλοποίησης στηρίζεται στην ανοδική και καθοδική δράση, όπου ως άνοδος λειτουργεί ένα ηλεκτρόδιο μολύβδου ή ανοξειδωτου χάλυβα και ως κάθοδος, ο χάλυβας του οπλισμένου σκυροδέματος. Η εφαρμογή ενός εξωτερικού ηλεκτρικού δυναμικού, οδηγεί στη διάχυση του αλκαλικού υγρού στους πόρους του σκυροδέματος, με αποτέλεσμα την αύξηση του pH του.

Θα πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι η εφαρμογή των τεχνικών αυτών προϋποθέτει την καταλληλότητα της κατασκευής και τη διασφάλιση της συνέχειας μεταξύ του χάλυβα και της ανόδου, καθώς και την κατάλληλη ποιότητα του σκυροδέματος.

4.2.2. Αφαίρεση χλωριόντων (Ηλεκτροχημική εξαγωγή χλωριόντων - ECE)

Η ηλεκτροχημική εξαγωγή χλωριόντων (Electrochemical Chloride Extraction - ECE) είναι μία μέθοδος περιορισμού των βλαβών που δημιουργούνται λόγω διάβρωσης, μέσω της μείωσης της συγκέντρωσης χλωριόντων σε επίπεδα που επιτρέπουν την επαναπαθητικοποίηση του χαλύβδινου οπλισμού στο ισχυρά αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος. Η μέθοδος περιλαμβάνει την εφαρμογή μια βοηθητικής ανόδου στην επιφάνεια της κατασκευής και επιβολή συνεχούς ρεύματος μεταξύ αυτής της ανόδου και του χαλύβδινου οπλισμού που λειτουργεί ως κάθοδος. Το θετικό φορτίο απωθεί τα αρνητικά φορτισμένα ανιόντα χλωρίου και με αυτόν τον τρόπο, τα χλωριόντα μετακινούνται από τον οπλισμό και το εσωτερικό του σκυροδέματος προς την επιφάνειά του. Η ταχύτητα της μετακίνησης εξαρτάται από το επιβαλλόμενο ρεύμα. Επιπλέον, η ηλεκτροχημική αντίδραση που συμβαίνει στην επιφάνεια του χάλυβα αυξάνει την αλκαλικότητα του περιβάλλοντος σκυροδέματος μέσω της παραγωγής ιόντων υδροξυλίου. Αυτά βοηθούν την επαναπαθητικοποίηση του χάλυβα σε χρονικό διάστημα μεταξύ 4-6 εβδομάδων, μειώνοντας την αναλογία χλωριόντων/ υδροξυλίων κάτω από το όριο έναρξης της διάβρωσης.

Η μέθοδος ωστόσο, μπορεί να επιφέρει και επιζήμιες επιπτώσεις στην κατασκευή. Αυτό διότι το υδρογόνο που παράγεται στην κάθοδο μπορεί να μεταναστεύσει μέσω του χαλύβδινου πλέγματος, μειώνοντας την αντοχή του και οδηγώντας σε αστοχία. Αυτό το φαινόμενο αναφέρθηκε ανωτέρω ως ευθραυστότητα, λόγω υδρογόνου (hydrogen embrittlement) και δεν επηρεάζει τόσο τους συμβατικούς χάλυβες που χρησιμοποιούνται ως σπλισμοί, όσο τους χάλυβες υψηλών αντοχών.

Η ηλεκτροχημική εξαγωγή χλωριόντων μοιάζει με την καθοδική προστασία όσον αφορά στο ότι μεταξύ του χάλυβα του σπλισμού και της ανόδου στην επιφάνεια διέρχεται συνεχές ρεύμα, αλλά μεταξύ των δύο μεθόδων υπάρχουν σημαντικές διαφορές. Αφ' ενός η πυκνότητα του εφαρμοζόμενου ρεύματος στην ECE είναι πολύ υψηλότερη απ' ότι στην καθοδική και αφ' εταίρου στην ECE παραμένει στην επιφάνεια της κατασκευής μόνο προσωρινά, όσο διαρκεί η διαδικασία εξαγωγής των χλωριόντων (συνήθως μερικές εβδομάδες) [24]

4.2.3. Αφαίρεση Υγρασίας

Η μέθοδος αυτή, η οποία αναφέρεται και ως "ηλεκτρική", χρησιμοποιείται για την αφαίρεση υγρασίας από κονιάματα. Απαιτεί η περιεκτικότητα των αλάτων στο κονίαμα να είναι 2% - 5% και το pH του υλικού υψηλότερο του 8. Η διαδικασία προσομοιάζει με αυτήν της αφαίρεσης χλωριόντων. Με την εφαρμογή του δυναμικού, τα ιόντα των αλάτων κινούνται προς τα ηλεκτρόνια, μεταφέροντας μαζί τους και νερό. Η μεταφορά των μορίων νερού από τα ιόντα ερμηνεύεται με διάφορες δράσεις, όπως ο διαφορετικός βαθμός ενυδάτωσης των ανιόντων και κατιόντων των αλάτων, η ανάπτυξη δράσεων απώθησης, οι οποίες τρέπουν το νερό προς τους λεπτούς πόρους, κ.λ.π. Η συγκεκριμένη διαδικασία, ωστόσο, αν και απλή και με χαμηλό κόστος, είναι πολύ βραδεία. [25]

4.2.4. Σφράγισμα ρωγμών με ρητίνες

Αν και το σφράγισμα των ρωγμών στο σκυρόδεμα μπορεί να επιτευχθεί και με άλλα υλικά (π.χ. τσιμέντο), οι ρητίνες αποτελούν ένα υλικό που γεμίζει τα κενά των ρωγμών και επιτυγχάνει πλήρη συνέχεια του υλικού. Επιπλέον, εμποδίζουν την οξειδωτική διαδικασία, καθώς, λόγω της σύστασής τους, δεν επιτρέπεται η διείσδυση του οξυγόνου και της υγρασίας, ενώ λόγω της αντοχής σε εφελκυσμό και της μεγάλης συνάφειας, αποτρέπει σε σημαντικό βαθμό ή διεύρυνση των ρωγμών. [26]

4.2.5.Χρήση αναστολέων διάβρωσης

Οι αναστολείς διάβρωσης είναι χημικές ενώσεις, οι οποίες προστίθενται στο σκυρόδεμα σε μικρές συγκεντρώσεις, και έχουν την ικανότητα να επιβραδύνουν το ρυθμό διάβρωσης των σπλισμών. Γενικά, είναι ενεργοί σε μικρές συγκεντρώσεις και ο μηχανισμός της δράσης τους έχει διευκρινιστεί σε λίγες μόνο περιπτώσεις.

Ένας αναστολέας διάβρωσης παρατείνει τη διάρκεια ζωής της κατασκευής, μέσω της χημικής/ ηλεκτροχημικής αλληλεπίδρασης με τον οπλισμό, καθώς μπορεί να επηρεάσει είτε τις καθοδικές είτε τις ανοδικές δράσεις, είτε και τις δύο. Δε σταματούν εντελώς τη διάβρωση, αλλά αυξάνουν το χρόνο που απαιτείται για την έναρξη της διαδικασίας και μειώνουν το ρυθμό διάβρωσης.

Ωστόσο, υπάρχουν ουσίες, οι οποίες εμποδίζουν την έναρξη της διάβρωσης ή μειώνουν το ρυθμό της εν εξελίξει διάβρωσης, μέσω επιφανειακής δράσης (π.χ. υδροφοβίωσης) ή προσμίξεις που μειώνουν το πορώδες του σκυροδέματος (π.χ. υπτάμενη τέφρα, πυριτική παιπάλη, πρόσμικτα στεγανοποίησης, κ.λ.π.). Οι ουσίες αυτές, όμως, δε θεωρούνται αναστολείς διάβρωσης.

Οι αναστολείς διάβρωσης παρουσιάζουν δύο βασικά μειονεκτήματα. Πρώτον, σε υπάρχουσες κατασκευές, μη ήδη διαβρωμένο οπλισμό, ο αναστολέας μπορεί να μην παραμείνει στην περιοχή που απαιτείται επιπλέον προστασία, με ενδεχόμενο αποτέλεσμα τη μείωση συγκέντρωσης του σε τιμή χαμηλότερη από την απαιτούμενη. Δεύτερον, όταν χρησιμοποιείται σε περιορισμένη περιοχή, κατά μήκος π.χ. μιας συνεχόμενης ράβδου, υπάρχει πιθανότητα ανάπτυξης μικρογαλβανικού στοιχείου. [27]

Μια ταξινόμηση των αναστολέων που στηρίζεται στο είδος της πόλωσης που επηρεάζουν είναι ως εξής:

- Ανοδικοί αναστολείς: επιβραδύνουν την ανοδική δράση, αυξάνοντας την ανοδική πόλωση.
- Καθοδικοί αναστολείς: επιβραδύνουν τη δράση της αναγωγής των οξειδωτικών.
- Μικτοί αναστολείς: επιβραδύνουν και την ανοδική και την καθοδική δράση, προκαλώντας μικρή μόνο μεταβολή του δυναμικού.

Μια επιπλέον ταξινόμηση, η οποία συνδυάζει την επηρεαζόμενη (ανοδική ή καθοδική) δράση και το μηχανισμό των αναστολέων διάβρωσης είναι στις εξής κατηγορίες:

- Ανοδικοί αναστολείς: Τα υλικά αυτά αναστέλλουν τη διάβρωση, σταθεροποιώντας το προστατευτικό φιλμ του οπλισμού, το οποίο έχει την τάση να διασπάται όταν ανεβαίνει η περιεκτικότητα των χλωριόντων.
- Καθοδικοί αναστολείς: Αυτοί προσροφώνται από τον οπλισμό και σχηματίζουν στην επιφάνειά του ένα φράγμα στη διάχυση του οξυγόνου, που είναι η κύρια αιτία καθοδικής αντίδρασης. Σημαντικό, όμως, είναι το μειονέκτημα που παρουσιάζουν οι περισσότεροι καθοδικοί αναστολείς, που είναι η μεγάλη επιβράδυνση της πήξης του σκυροδέματος.
- Οργανικοί αναστολείς: Ονομάζονται επίσης και προσροφητικοί αναστολείς και η δράση τους συνδυάζει ανοδική και καθοδική προστασία. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν και οι πτητικοί αναστολείς, οι οποίοι έχουν παρόμοια δράση με τους προσροφητικούς, αλλά έχουν υψηλή πίεση ατμών, η οποία επιτρέπει τη σχετικά εύκολα μεταφορά τους στον οπλισμό, όπου απορροφώνται, προστατεύοντάς τον.

Από τα παραπάνω είδη, αυτό που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις επισκευές οπλισμένου σκυροδέματος, είναι οι αναστολές διάβρωσης, που μπορούν να διεισδύουν στο σκληρυμένο σκυρόδεμα μέσω διάχυσης. Όταν ο αναστολέας έρθει σε επαφή με το χάλυβα οπλισμού, σχηματίζει ένα μονομοριακό προστατευτικό φιλμ, το οποίο μειώνει δραματικά τη διάβρωση, παρουσιάζοντας διπλή δράση, τόσο ανοδική όσο και καθοδική. [28]

Υπάρχουν, γενικά, δύο είδη προϊόντων που βασίζονται στους αναστολές διάβρωσης:

- Τα προϊόντα που χρησιμοποιούνται σε νωπό σκυρόδεμα, ως πρόσθετα και χρησιμοποιούνται σε καινούργιες κατασκευές.
- Τα προϊόντα που ψεκάζονται στην επιφάνεια του σκυροδέματος και προορίζονται για υπάρχουσες κατασκευές.

4.3 Επεμβάσεις στον οπλισμό

4.3.1. Καθοδική προστασία [29]

Η βασική αρχή όλων τεχνικών καθοδικής προστασίας (Cathodic Protection - CP) έγκειται στο ότι οι ανεπιθύμητες ανοδικές αντιδράσεις διάβρωσης καταστέλλονται από την εφαρμογή ενός αντίθετου ρεύματος, αναγκάζοντας τις τοπικές ανόδους να πολωθούν στο δυναμικό των τοπικών καθόδων. Από θερμοδυναμικής άποψης, η εφαρμογή ενός ρεύματος καθοδικής προστασίας μειώνει το ρυθμό διάβρωσης μια μεταλλικής δομής, μειώνοντας το δυναμικό διάβρωσης του προς μια μη δραστική κατάσταση. Η καθοδική προστασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προστασία οπλισμένου σκυροδέματος είτε μέσω της επιβολής ρεύματος καθοδικής προστασίας (ICCP-Impressed Current Cathodic Protection) είτε με θυσιαζόμενες ανόδους.

4.3.2. Καθοδική Προστασία με επιβαλλόμενη τάση

Η εφαρμογή της καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενη τάση βασίζεται στην ύπαρξη πηγής συνεχούς ρεύματος κοντά στην επιφάνεια του σκυροδέματος με την οποία συνδέεται ο οπλισμός των φερόντων στοιχείων της κατασκευής. Με την παροχή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος αναστέλλεται και αντιστρέφεται το δυναμικό διάβρωσης και έτσι ελαχιστοποιείται ο ρυθμός διάβρωσης. Τρεις είναι οι βασικές μέθοδοι ελέγχου του ρεύματος της πηγής:

- Λειτουργία σταθερού ρεύματος: Η πηγή παράγει ένα σταθερό ρεύμα εξόδου. Το δυναμικό του οπλισμού μπορεί να μετρηθεί μέσω ενός στοιχείου αναφοράς ως συνάρτηση του εφαρμοζόμενου ρεύματος.

- **Λειτουργία σταθερής τάσης:** Σε αυτήν την περίπτωση, η πηγή διατηρεί σταθερή την τάση εξόδου. Το εφαρμοζόμενο ρεύμα αλλάζει σύμφωνα με τις διακυμάνσεις στην αντίσταση του κυκλώματος. Η χαμηλή αντίσταση του σκυροδέματος, που συχνά συνδέεται με αυξημένο κίνδυνο διάβρωσης, μπορεί να οδηγήσει σε υψηλό ρεύμα εξόδου. Σε αυτή τη λειτουργία το δυναμικό των ράβδων δεν είναι απαραίτητα σταθερό και μπορεί να μετράται και μέσω ενός στοιχείου αναφοράς.

- **Λειτουργία σταθερού δυναμικού του οπλισμού:** Σε αυτή τη λειτουργία, το ρεύμα εξόδου ρυθμίζεται συνεχώς για να παρέχει ένα σταθερό (προεπιλεγμένο) δυναμικό οπλισμού. Μία μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για βυθισμένο σκυρόδεμα, όπου το δυναμικό είναι σχετικά ομοιόμορφο και σταθερό, το δυναμικό οπλισμού, μετράται συνεχώς με ηλεκτρόδια αναφοράς και βάσει αυτού αναπροσαρμόζεται συνεχώς η πηγή ρεύματος.

4.3.3. Θυσιαζόμενες άνοδοι

Οι θυσιαζόμενες άνοδοι έχουν δυναμικό διάβρωσης μικρότερο από το μέταλλο που χρειάζεται προστασία. Είναι σχετικά φθηνές, εύκολες στην εγκατάσταση και σε αντίθεση με τα συστήματα επιβαλλόμενης τάσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς παροχή ρεύματος. Οι θυσιαζόμενες άνοδοι που χρησιμοποιούνται συνήθως για την προστασία του χαλύβδινου οπλισμού του σκυροδέματος κατασκευάζονται από ψευδάργυρο ή κράμα ψευδαργύρου. Οι εφαρμογές ποικίλουν ως εξής:

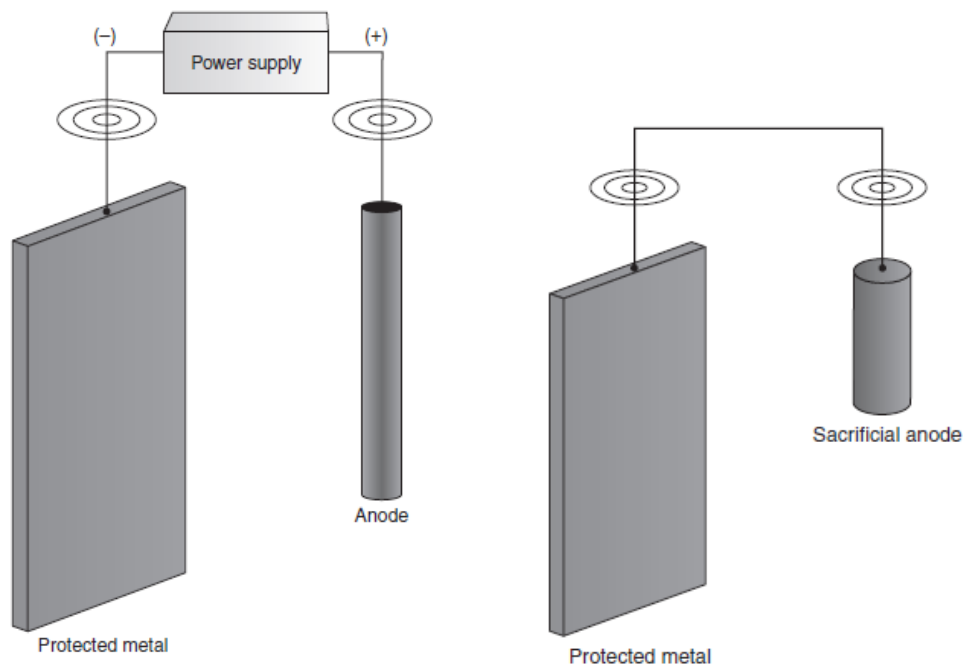
- Εφαρμογή θερμικά ψεκαζόμενου ψευδαργύρου, πάχους μερικών εκατοντάδων μη απευθείας στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Συνήθως, χρησιμοποιείται και κάποια υγροσκοπική ουσία για την αύξηση της υγρασίας και μείωση της αντίστασης του σκυροδέματος.

- Εφαρμογή λεπτών φύλλων ψευδαργύρου με αγώγιμο συγκολλητικό υπόστρωμα στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

- Διογκωμένο πλέγμα ψευδαργύρου σε πλαστικά δοχεία ενισχυμένα με υδρύαλο, τα οποία περιέχουν τσιμεντένεμα (ρευστοκονίαμα). Η μέθοδος εφαρμόζεται, συνήθως, σε πασσάλους εκτεθειμένους σε θαλάσσιο περιβάλλον, κυρίως στην ίσαλο γραμμή.

- Δίσκοι ψευδαργύρου σε κυλίνδρους κονιάματος υψηλής αλκαλικότητας για εγκατάσταση σε οπές στο σκυρόδεμα.

Το βασικό κριτήριο για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της καθοδικής προστασίας των περισσότερων μετάλλων βασίζεται σε μέτρηση του δυναμικού του μετάλλου σε σχέση με ένα ημι-στοιχείο ή ηλεκτρόδιο αναφοράς. Υλικά κατάλληλα για χρήση ως γαλβανικές άνοδοι είναι το αλουμίνιο, το μαγνήσιο, ο ψευδάργυρος, κ.λ.π. [30]



Εικόνα 18: Σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενη τάση (αριστερά) και με θυσιαζόμενες ανόδους (δεξιά)

4.3.4. Οργανικές Επικαλύψεις

Μεταξύ των διαφόρων συστημάτων προστασίας του χαλύβδινου οπλισμού, η πιο δημοφιλής και οικονομική μέθοδος είναι η χρήση οργανικών επικαλύψεων. Η προστατευτική δράση τους οφείλεται στον προκαλούμενο διαχωρισμό του υλικού από το διαβρωτικό περιβάλλον και την αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης. Η προστατευτική τους επίδραση εξαρτάται από το πάχος τους και τις ιδιότητές τους, όπως η πρόσφυση, η αντοχή και η διαπερατότητα. [31],[32]

Η εφαρμογή οργανικών επικαλύψεων στην επιφάνεια των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος έχει βρει ευρεία εφαρμογή για τον περιορισμό της διάβρωσης του οπλισμού, τόσο σε συμβατικές κατασκευές, όσο και σε περιπτώσεις υψηλών απαιτήσεων.

Τα οργανικά επιστρώματα μπορεί να είναι χρώματα, βερνίκια ή λάκες, που προκύπτουν ως μίγμα συνδετικού μέσου (ρητίνη), διαλύτη, πιγμέντου, πληρωτικών ουσιών και πρόσθετων. Ανάλογα με το συνδετικό μέσο, οι οργανικές επικαλύψεις διακρίνονται σε:

- Αλκυδικά χρώματα (π.χ. ριπολίνες, αλκυδικές ρητίνες, αντισκωριακά αστάρια, κ.λ.π.)
 - Βινυλικά χρώματα (και βινυλικοί εστέρες)
 - Χρώματα χλωριωμένου καουτσούκ
 - Ακρυλικά χρώματα (ακρυλικές ρητίνες)
 - Εποξειδικά χρώματα (και εποξυ-φαινολικά, λιθανθρακόπισσας, μαστίχες, χωρίς διαλύτες, υδατικά)
 - Πολυουρεθάνης
 - Πολυεστερικά

Επίσης, διακρίνονται, ανάλογα με το μέσο διασποράς σε:

- Συμβατικές, όταν έχουν ενεργούς διαλύτες
- Υδατικές, όταν έχουν ως μέσο διασποράς το νερό.

Οι οργανικές επικαλύψεις υψηλής απόδοσης εφαρμόζονται, προκειμένου να παρέχουν προστασία από εξαιρετικά διαβρωτικά περιβάλλοντα. Ανάλογα με την εφαρμογή μπορούν να διαχωριστούν σε:

- Προστατευτικά επιστρώματα που εφαρμόζονται σε κτίρια βαριάς βιομηχανίας (πετρελαίου, φυσικού αερίου, παραγωγής ενέργειας), γέφυρες, μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων, κ.λ.π.
- Προστατευτικά επιστρώματα με ναυτικές/ θαλάσσιες εφαρμογές σε εμπορικά πλοία, κ.λ.π.

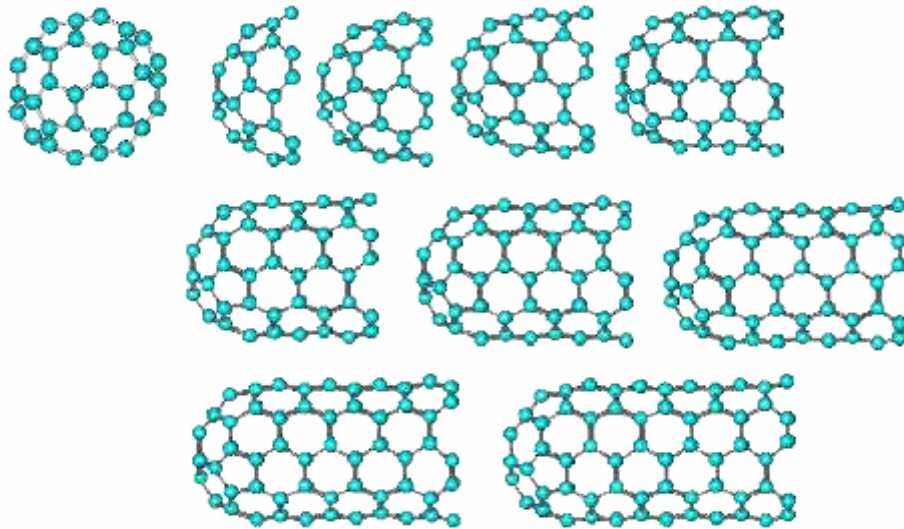
Ωστόσο, βασικό μειονέκτημα των οργανικών επικαλύψεων είναι η χαμηλή διαπερατότητά τους στο διοξείδιο του άνθρακα, στο διοξείδιο του θείου και το νερό. [32]

5. ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

5.1. Ορισμός Νανოსωλήνων Άνθρακα

Οι νανოსωλήνες άνθρακα είναι ομόκεντροι κύλινδροι γραφίτη, με διάμετρο μερικά νανόμετρα και μήκος μέχρι και πάνω από 100μm. Ανακαλύφθηκαν τη δεκαετία του 1950, ωστόσο η μεγάλη έκρηξη που οδήγησε στην περαιτέρω μελέτη τους, πραγματοποιήθηκε από τον Ιάπωνα Φυσικό Sumio Iijima το 1991.

Όσον αφορά στη δομή τους, συγγενεύουν με τη γραφιτική μορφή περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη κρυσταλλική μορφή του άνθρακα. Αποτελούνται ουσιαστικά από αναδιπλωμένα γραφιτικά φύλλα, τα οποία σχηματίζουν κυλίνδρους με διαμέτρους στη νανοκλίμακα. Τα άκρα των κυλίνδρων εμφανίζονται κάποιες φορές να έχουν ημισφαιρικό σχήμα, δηλαδή δομή μισού μορίου φουλερενίου, εντούτοις, ως επί το πλείστον, έχουν επίπεδη μορφή με ένα δακτύλιο από πεντάγωνα στο όριο μετάβασης προς το κυλινδρικό τους τμήμα. Οι νανοςωλήνες μπορούν να εμφανίσουν ανοιχτά ή κλειστά άκρα. Επίσης, τα άκρα τους μπορούν να τερματίζονται με ημισφαίρια διαφόρων φουλερενίων. Από το συνδυασμό εξαγώνων και τουλάχιστον 6 πενταγώνων, απορρέουν κλειστά άκρα νανοςωλήνων. Ο τερματισμός είναι δυνατόν να γίνει με κλειστά άκρα κωνικής ή και ημιδακτυλιοειδούς μορφής.



Εικόνα 19: Νανოსωλήνες άνθρακα και φουλλερένια

5.2. Δομή-Ταξινόμηση νανοςωλήνων άνθρακα

Οι νανοςωλήνες άνθρακα διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, σύμφωνα με το πλήθος των τοιχωμάτων από τα οποία συνίσταται.

- **Νανοςωλήνες άνθρακα μονού τοιχώματος/ Μονοτοιχωματικοί/ Μονοφλοιικοί (Single Walled Carbon Nanotubes-SWCNT's).** Αποτελούνται από ένα μόνο πλέγμα γραφίτη, αναδιπλωμένο σε σχήμα κυλίνδρου, με διάμετρο 1-3nm και μήκος 3-50μm.

- **Νανοςωλήνες άνθρακα πολλαπλού τοιχώματος/ Πολυτοιχωματικοί/ Πολυφλοιικοί (Multi Walled Carbon Nanotubes – MWCNT's).** Αποτελούνται από πολλά πλέγματα γραφίτη, με ένα κεντρικό σωλήνα να περιβάλλεται από αναδιπλωμένα στρώματα γραφίτη. Η διάμετρός τους είναι 3-250nm. Η απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων προσεγγίζει την απόσταση μεταξύ δύο γραφιτικών φύλλων και είναι 0,34nm. Οι δυνάμεις που καθορίζουν την απόσταση αυτή, είναι οι ελκτικές δυνάμεις van der Waals, στις οποίες οφείλεται και η μεταξύ τους συγκράτηση.



Εικόνα 20: Μονοφλοιϊκοί και Πολυφλοιϊκοί νανοςωλήνες άνθρακα

5.3. Ιδιότητες νανοσωλήνων άνθρακα

Οι νανοσωλήνες άνθρακα εμφανίζουν εξαιρετικές ιδιότητες που τους επιτρέπουν να χρησιμοποιούνται σε πάρα πολλές εφαρμογές. Εκτός των μηχανικών, δομικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων, παρουσιάζουν αξιοσημείωτες θερμικές και οπτικές ιδιότητες. Αναλυτικότερα:

5.3.1. Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Η εμφάνιση μεταλλικής και ημιαγώγιμης συμπεριφοράς στους νανοσωλήνες άνθρακα, επιβεβαιώθηκε με μετρήσεις αγωγιμότητας σε υλικό νανοσωλήνων, με μεμονωμένους νανοσωλήνες μονού τοιχώματος, με νανοσωλήνες πολλαπλών τοιχωμάτων αλλά και με συστοιχίες νανοσωλήνων μονού τοιχώματος. Οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την ηλεκτρονική απόκριση είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (ατέλειες, διάμετρος, κ.α.)

5.3.2. Μηχανικές Ιδιότητες

Οι νανοσωλήνες άνθρακα εμφανίζουν εκπληκτικές μηχανικές ιδιότητες, το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο από την πρώτη στιγμή που ανακαλύφθηκαν, κατ' αναλογία με το γραφίτη. Οι προσδοκίες για τους νανοσωλήνες άνθρακα ήταν να επιδείξουν ανάλογα υψηλή τάση και ελαστικότητα, όπως ο γραφίτης, του οποίου το μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση των επιπέδων του, έχει υπολογιστεί περίπου 1TPa και η αντοχή σε εφελκυσμό, να φτάνει, κατ' εκτίμηση, τα 130GPa.

5.3.3. Θερμικές Ιδιότητες

Οι νανοσωλήνες άνθρακα επιδεικνύουν εξαιρετικές θερμικές ιδιότητες. Χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα καλοί θερμικοί αγωγοί κατά μήκος τους, και επίσης, καλοί μονωτές πλευρικά του άξονά τους. Έχει αναφερθεί ότι η θερμική αγωγιμότητά τους εξαρτάται σχεδόν γραμμικά από τη θερμοκρασία και έχει υπολογιστεί η θερμική αγωγιμότητα ενός νανοσωλήνα να αγγίζει τα 2980W/Km [33],[34]. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο χαλκός που είναι πολύ γνωστός για την εξαιρετική θερμική του αγωγιμότητα, μεταδίδει 385W/Km. Επιπλέον, έχει προσδιοριστεί πειραματικά ότι η θερμική αγωγιμότητα των νανοσωλήνων άνθρακα μειώνεται εκθετικά με τη συγκέντρωση των ατομικών κενών στο πλέγμα τους. [34] Η μέγιστη θερμική τους ευστάθεια, ανέρχεται περίπου στους 750°C στον αέρα και στους 2800 °C στο κενό. [35] Τέλος, η θερμική τους σταθερότητα μειώνεται με τη μείωση της διαμέτρου τους, αλλά και την ύπαρξη ατελειών στη δομή τους.

5.3.4. Οπτικές Ιδιότητες

Η ικανότητα των νανοσωλήνων άνθρακα να απορροφούν ή να σκεδάζουν το φως, αλλά και να φθορίζουν, εξαρτάται από τη διάμετρο και τη χειρομορφία τους. Επίσης, έχει αναφερθεί ότι οι οπτικές του ιδιότητες επηρεάζονται και από το μήκος του νανοσωλήνα, όπου κατά την αύξησή του ενισχύεται η ικανότητά του να απορροφά το φως, αλλά και να φθορίζει στο κοντινό υπέρυθρο φάσμα.

5.3.5. Χημικές ιδιότητες-Αλληλεπιδράσεις

5.3.5.1. Αλληλεπιδράσεις νανοσωλήνων – μετάλλων

Πολλές εφαρμογές των νανοσωλήνων στηρίζονται στην αλληλεπίδραση τους με τα μέταλλα, με πιο χαρακτηριστικές εκείνες που αφορούν τη δημιουργία επαφών με νανοσωλήνες χαμηλής ωμικής αντίστασης, καθώς και με την κατασκευή μεταλλικών και υπεραγωγίων νανοκαλωδίων. Η ισχύς των δεσμών μεταξύ μετάλλου και επιφάνειας με νανοσωλήνα, οφείλεται στην καμπυλότητα της επιφάνειας.

5.3.5.2. Αλληλεπιδράσεις με μικρά μόρια.

Πολλές από τις φυσικές ιδιότητες των νανοσωλήνων άνθρακα μεταβάλλονται κατά την αλληλεπίδραση τους με μικρά μόρια. Οι ημιαγωγιμοί χαρακτήρα νανοσωλήνες, είναι πολύ ευαίσθητοι όσον αφορά τις ηλεκτρονικές τους ιδιότητες, όταν βρεθούν σε διαφορετικό χημικό περιβάλλον. Η αγωγιμότητά τους, για παράδειγμα, μπορεί να μεταβληθεί και ως προς το μέτρο της, κατά πολλές τάξεις μεγέθους, αλλά και ως προς το είδος της (είδος φορέων αγωγιμότητας).

5.3.5.3. Σύνθεση παραγώγων νανοσωλήνων άνθρακα.

Πολλές φορές είναι ιδιαίτερα χρήσιμο να επέμβουμε στους νανοσωλήνες άνθρακα με χημικές ή φυσικές μεθόδους, ώστε να προσκολληθούν πάνω τους συγκεκριμένα μόρια ή χαρακτηριστικές ομάδες, τα οποία θα τους προσδώσουν σημαντικές ιδιότητες χωρίς να τροποποιήσουν, όσο αυτό είναι δυνατό, τις εγγενείς ιδιότητες των νανοσωλήνων. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται σύνθεση παραγώγων (functionalization).

Η δημιουργία παραγώγων μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, είτε με επέμβαση στα ανοιχτά άκρα των νανοσωλήνων, είτε στην παράπλευρη επιφάνειά τους.

5.4. Εφαρμογές νανοσωλήνων άνθρακα

Οι νανοσωλήνες, λόγω των εξαιρετικών και διαφορετικών ιδιοτήτων τους, αποτελούν υλικά, που εφαρμόζονται, ή είναι δυνητικά εφαρμόσιμα σε πάρα πολλούς τομείς της τεχνολογίας. Ενδεικτικά, αναφέρονται οι κυριότεροι τομείς.

5.4.1. Σύνθετα Υλικά

Οι νανοσωλήνες άνθρακα, λόγω των ξεχωριστών μηχανικών τους ιδιοτήτων, έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν ως πρόσθετα σε άλλα υλικά, βελτιώνοντας την αντοχή τους και μειώνοντας το βάρος τους.

Η αποτελεσματικότητα των σύνθετων υλικών εξαρτάται από την ύπαρξη καλής συνοχής ανάμεσα στη μήτρα και στο ενισχυτικό υλικό. Με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης των νανοσωλήνων άνθρακα ως ενισχυτικό υλικό, θα πρέπει να απομονωθούν και να κατανεμηθούν ομοιόμορφα μέσα στη μήτρα, αλλά και να τροποποιηθούν χημικά στην επιφάνειά τους, ώστε να αυξηθεί η συνοχή τους με τις πολυμερικές αλυσίδες.

Τέτοιες εφαρμογές είναι η ενσωμάτωση σε στρατιωτικές στολές, σε αλεξίσφαιρα γιλέκα, στους προφυλακτήρες των οχημάτων, στις ρακέτες αντισφαίρισης, στους σκελετούς των ποδηλάτων, στα μπαστούνια του golf, κ.α. [36] Μία επιπλέον εφαρμογή είναι η χρήση τους ως ενισχυτικό στην παραγωγή τσιμέντου, μειώνοντας τη θερμική αγωγιμότητα του έως 20% και αυξάνοντας την αντοχή του περίπου κατά 70%. [37]

Η αντοχή των σύνθετων υλικών ενισχύεται σημαντικά με την ελαστική συμπεριφορά των νανοσωλήνων, απορροφώντας την ενέργεια κατά την επιβολή εξωτερικών φορτίων. [38] Οι νανοσωλήνες επειδή έχουν μικρή τάση για ρηγμάτωση κάτω από θλιπτικά φορτία, παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με τις συμβατικές ίνες άνθρακα που χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικό υλικό. [39]

Η προσθήκη νανοσωλήνων άνθρακα σε άλλα υλικά, καθιστά τα υλικά αυτά αγωγίμα λόγω των ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων. Μία εφαρμογή της δυνατότητας αυτής είναι στη δημιουργία υλικών που απορροφούν την ακτινοβολία ραντάρ ("stealth" εφαρμογές) και άλλων που επιτρέπουν την ηλεκτροστατική βαφή τους, όπως στη βιομηχανία των αυτοκινήτων. Οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν επεκταθεί ακόμη και σε διαστημικές εφαρμογές, καθώς η NASA τους έχει χρησιμοποιήσει στην κατασκευή διαστημικών οχημάτων.

5.4.2. Ηλεκτρονικά κυκλώματα

Το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας στρέφεται στη δημιουργία κυκλωμάτων μικρότερων διαστάσεων, καθώς τα μικρότερα ολοκληρωμένα κυκλώματα, οδηγούν σε μεγαλύτερες ταχύτητες.

Νανοσωλήνες άνθρακα έχουν χρησιμοποιηθεί σε τρανζίστορ, τα οποία αποτελούν τη βάση όλων των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, καθώς δρουν σαν γέφυρες που μεταφέρουν δεδομένα από το ένα μέρος του κυκλώματος στο άλλο. Το πρώτο τρανζίστορ από νανοσωλήνες κατασκευάστηκε από την IBM το 2001. [40]

Οι νανοσωλήνες άνθρακα, λόγω του υψηλού λόγου του μήκους προς τη διάμετρό τους, της σταθερότητας τους σε υψηλή πυκνότητα ρεύματος και της χαμηλής τάσης εκπομπής ηλεκτρονίων, αποτελούν υλικά ιδανικά για χρήση τους σε ηλεκτρονικά μικροσκόπια καθώς και στις διατάξεις σε οθόνες υγρών κρυστάλλων για μεγάλη απόδοση και μικρή κατανάλωση ρεύματος. [41]

5.4.3. Αποθήκευση Ενέργειας

Οι νανοσωλήνες άνθρακα διακρίνονται από τα χαρακτηριστικά εκείνα που είναι επιθυμητά σε ένα υλικό, για να χρησιμοποιηθεί ως ηλεκτρόδιο σε μπαταρίες και πυκνωτές. Έχουν μεγάλη ειδική επιφάνεια (έως και 1000m²/g), καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, λεία επιφάνεια, μεγάλη χημική σταθερότητα και ιδίως η γραμμική γεωμετρία καθιστά την επιφάνειά τους αρκετά προσιτή στον ηλεκτρολύτη.[41],[42] Έχει αναφερθεί ότι οι νανοσωλήνες παρουσιάζουν την υψηλότερη αντίστροφη χωρητικότητα από όλα τα είδη του άνθρακα για χρήση σε μπαταρίες λιθίου. [43]

Άλλη μια εφαρμογή των νανοσωλήνων άνθρακα είναι στα ηλεκτρόδια σε κελιά καυσίμου, εξαιτίας της μεγάλης θερμικής τους αγωγιμότητας και της μεγάλης ειδικής τους επιφάνειας.

Οι νανοσωλήνες άνθρακα χρησιμοποιούνται επίσης, για την αποθήκευση αερίων και κυρίως υδρογόνου, μέσω της φυσικής ή της χημικής προσρόφησής του σε αυτούς.

5.4.4. Βιολογικές – Ιατρικές εφαρμογές

Οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν ως μοριακοί αισθητήρες ανίχνευσης ή «εξερευνητές» με πιθανές εφαρμογές στη χημεία, τη βιολογία και την ιατρική, εξαιτίας της ηλεκτρικής τους αγωγιμότητας και της δυνατότητας της χημικής τροποποίησης τους με λειτουργικές ομάδες. Μία άλλη αξιόλογη εφαρμογή είναι η ηλεκτρική διέγερση μέσω νανοσωλήνων άνθρακα μονού τοιχώματος του εγκεφαλικού κυκλώματος, και η αναγέννηση των νευρώνων για την επαναφορά λειτουργιών που έχουν απολεσθεί. [36],[41],[44]

Παρόλο που δεν έχει διευκρινιστεί πλήρως η τοξικότητα ή μη των νανοσωλήνων άνθρακα, ωστόσο χρησιμοποιούνται ήδη σε ορισμένους τομείς της ιατρικής, όπως στη θεραπεία του καρκίνου, λειτουργώντας ως φορείς αντικαρκινικών ουσιών σε κακοήθη κύτταρα. Μικροσκοπικοί νανοσωλήνες άνθρακα εμφυτεύονται σε καρκινικά κύτταρα και όταν αυτοί εκτεθούν σε ακτινοβολία στο εγγύς υπέρυθρο – από ένα λέιζερ – τότε θερμαίνονται, καταστρέφοντας το καρκινικό κύτταρο, ενώ τα υγιή κύτταρα, χωρίς νανοσωλήνες, παραμένουν άφθαρτα. [45]

Επίσης, η δομή των νανοσωλήνων άνθρακα μπορεί να τροποποιηθεί με ευκολία, έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως μέσα για τη μεταφορά φαρμάκων στο σώμα. Οι

νανοσωλήνες επιτρέπουν την ελεγχόμενη αποδέσμευση του φαρμάκου στο συγκεκριμένο σημείο, ελαττώνοντας έτσι και τη δόση που πρέπει να λαμβάνει ο ασθενής. Το φάρμακο προσκολλάται πλευρικά ή πίσω από το σωλήνα, είτε είναι τοποθετημένο στο εσωτερικό του. [46] Τέλος, η ιδιότητα των νανοσωλήνων άνθρακα να φθορίζουν σε ένα μόνο μήκος κύματος, ανάλογα με τη διάμετρο τους, επιτρέπει με τη χρήση ενός εύρους διαμέτρων νανοσωλήνων άνθρακα, τον κάθε ένα για διαφορετικό στόχο, να πραγματοποιείται διάγνωση πολλαπλών παθήσεων με μία μόνο εξέταση.

5.4.5. Άλλες Εφαρμογές

Οι νανοσωλήνες άνθρακα, λόγω της μεγάλης ειδικής τους επιφάνειας και της ικανότητάς τους να προσκολλούν σχεδόν κάθε χημικό είδος στα τοιχώματά τους, χρησιμοποιούνται ευρέως ως καταλυτικά υποστρώματα. Άλλες εφαρμογές, αφορούν στη χρήση τους στα φωτοβολταϊκά κελιά για τη δημιουργία νανοπορώδων μεμβρανών, π.χ. για καθαρισμό και αφαλάτωση νερού.

Οι προοπτικές εφαρμογών αυτού του επιπέδου είναι πολύ σημαντικές. Αυτή τη στιγμή, κυριότερα εμπόδια στην προώθησή τους είναι η περιορισμένη στη μονάδα του χρόνου δυνατότητα παραγωγής των νανοσωλήνων, καθώς και η δυσκολία συνένωσής τους σε μακροδομές (νήματα) που θα διατηρούν τις ιδιότητές τους. Τελευταίες έρευνες και πειράματα δείχνουν πως αυτά τα εμπόδια είναι εφικτό να ξεπεραστούν.

5.4.6. Εφαρμογές στα κατασκευαστικά υλικά του φέροντα οργανισμού

Βασικός στόχος της χρήσης νανοσωλήνων άνθρακα στις κατασκευές είναι η ανάπτυξη υλικών υπερ-υψηλής επίδοσης για κατασκευαστικές εφαρμογές και η βελτίωση της γνώσης για τη συσχέτιση μεταξύ της νανο/μικρο-δομής των υλικών και των συνεπακόλουθων μακροσκοπικών ιδιοτήτων των υλικών.

Η νανοτεχνολογία, λοιπόν, μπορεί να φανεί χρήσιμη στην ανάπτυξη:

- Υλικών με αυξημένη ανθεκτικότητα και παρατεταμένη ή βελτιωμένη συμπεριφορά
- Πολυλειτουργικών υλικών με μηχανική απόδοση συνδυασμένη με ιδιότητες θερμικής, ηλεκτρικής ή μαγνητικής αγωγιμότητας/μόνωσης.
- Ενεργών προσαρμοστικών υλικών με προγραμματιζόμενα χαρακτηριστικά (αυτό-επισκευαζόμενα, με αισθητήρες, κ.τ.λ.).
- Υβριδικών οργανικών – ανόργανων υλικών, που συνδυάζουν τις συγκεκριμένες ιδιότητες κάθε συνιστώσας, με αποτέλεσμα νέα ή ανώτερη συμπεριφορά.

Στην πραγματικότητα, ήδη έχουμε πολύ ενθαρρυντικές εξελίξεις στους τομείς του σκυροδέματος, του χάλυβα και του γυαλιού. Το σκυρόδεμα γίνεται ισχυρότερο, πιο ανθεκτικό και διαστρώνεται ευκολότερα, ο χάλυβας σκληρότερο και το γυαλί αυτοκαθαρίζεται.

Πολλές, όμως, από τις προοπτικές της νανοτεχνολογίας στον κατασκευαστικό τομέα περιορίζονται από το κόστος και το σχετικά μικρό μέχρι τώρα αριθμό πρακτικών εφαρμογών. Πολλές από τις εφαρμογές αυτές βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο, με πολύ ενθαρρυντικά ως τώρα αποτελέσματα, και άλλες έχουν κόστος απαγορευτικό για τη μαζική παραγωγή και διάθεσή τους.

Παρόλα αυτά, το σκυρόδεμα έχει διαφοροποιηθεί πολύ λίγο από την πρώτη χρήση στην τρέχουσα μορφή του στην αρχή του 20^{ου} αιώνα. Καθώς, το προϊόν αντιμετωπίζει όλο και υψηλότερες απαιτήσεις απόδοσης, η κατασκευαστική βιομηχανία αναζητά τρόπους ανανέωσης του υλικού και βελτίωσης των «επιδόσεών» του.

Η προσθήκη μικρής ποσότητας CNT's μπορεί να βελτιώσει τις μηχανικές ιδιότητες δειγμάτων, που περιέχουν κύρια φάση τσιμέντου Portland και νερό. Οξειδωμένοι πολυτοιχωματικοί νανοσωλήνες (MWCNT's) δείχνουν τη μεγαλύτερη βελτίωση και στη θλιπτική (+25 N/mm²), αλλά και στην εφελκυστική αντοχή (+8 N/mm²), σε σύγκριση με τα μη ενισχυμένα δείγματα αναφοράς.

Ωστόσο, με την προσθήκη νανοσωλήνων άνθρακα σε οποιοδήποτε υλικό προκύπτουν δύο προβλήματα: η συσσωμάτωση των νανοσωλήνων και η έλλειψη συνάφειας μεταξύ αυτών και του περιέχοντος μακροϋλικού, γεγονός που προκαλεί την επονομαζόμενη ολίσθηση. Απαιτείται δηλαδή επιπρόσθετη έρευνα για να καθοριστούν οι βέλτιστες τιμές των νανοσωλήνων άνθρακα και των παραγόντων διασποράς για το σχεδιασμό μίξης.

Το κόστος της προσθήκης CNT's στο σκυρόδεμα, μπορεί να είναι απαγορευτικό προς το παρόν, όμως, γίνεται προσπάθεια μείωσης της τιμής τους (που μπορεί να φτάνει και τα 1000 ευρώ/gr αναλόγως με την ποιότητα) και, όταν αυτή η μείωση επιτευχθεί τότε τα οφέλη από την προσθήκη τους στο σκυρόδεμα θα αξιοποιηθούν αποτελεσματικότερα.

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

6.1. Σκοπός

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη της διάβρωσης του οπλισμού σε νανοτροποποιημένο κονίαμα.

Όσον αφορά στην επίδραση των τροποποιημένων νανοσωλήνων άνθρακα στη διάβρωση του οπλισμού, αναμένονται τα εξής αποτελέσματα:

- Βελτίωση των νανο-ιδιοτήτων και κατ' επέκταση μείωση της διάβρωσης.
- Δημιουργία γαλβανικού στοιχείου από την επαφή του άνθρακα με το χάλυβα.

Επομένως, σκοπός της μελέτης αυτής είναι να εξετάσει ποιο από τα δύο φαινόμενα έχει επικρατήσει.

6.2. Παρασκευή Δοκιμίων

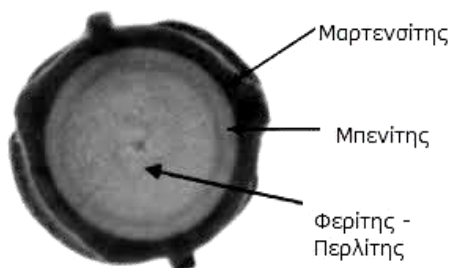
6.2.1. Υλικά

Χάλυβας

Η κατηγορία του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε είναι S500s Tempcore, διαμέτρου 10mm.

Οι χάλυβες της κατηγορίας αυτής διαθέτουν πλάγιες νευρώσεις, γεγονός που εξασφαλίζει την υψηλή συνάφεια με το σκυρόδεμα. Χαρακτηρίζονται ως συγκολλησιμοι χάλυβες και είναι προϊόντα θερμής έλασης (1000 ως 1050 °C). Στη συνέχεια της θερμής έλασης, ακολουθεί η μέθοδος Tempcore, κατά την οποία πραγματοποιείται ταχεία, έντονη ψύξη, η οποία προκαλεί μια «βαφή» του μετάλλου (quenching) σε βάθος 1,5 ως 2,0mm, ενώ το εσωτερικό της διατομής παραμένει διάπυρο κατά την κατεργασία. Αποτέλεσμα αυτής της θερμικής κατεργασία είναι η παραγωγή ενός όλκιμου προϊόντος, λόγω της ύπαρξης του μαλακού πυρήνα και της σκληρής εξωτερικής στοιβάδας που προσδίδει στο υλικό υψηλή αντοχή. Έτσι, δημιουργείται στην επιφάνεια του χάλυβα σκληρή μαρτενσιτική δομή, ενώ ο πυρήνας του χάλυβα παραμένει ωστενιτικός.

Ο συγκεκριμένος τύπος χάλυβα ονομάζεται και αυτό-επαναφοράς (self-tempering). Κατά το στάδιο της αυτοεπαναφοράς, η θερμότητα άγεται από τον πυρήνα του υλικού προς τον μαρτενσιτικό φλοιό, μετατρέποντας τη δομή του σε επαναφερόμενο μαρτενσίτη, ενώ ο πυρήνας μετασχηματίζεται κατά την τελική απόψυξη σε όλκιμο φερρίτη και περλίτη. Το τελικό προϊόν έχει μια σύνθετη μικροδομή, η οποία δίνει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, που αποτελείται από ένα σκληρό εξωτερικό φλοιό (επαναφερόμενου) μαρτενσίτη και από ένα όλκιμο πυρήνα φερριτικής-περλιτικής δομής.



Εικόνα 21: Εγκάρσια τομή ράβδου S500s Tempcore

Η χημική σύσταση των χαλύβδινων ράβδων τύπου S500s Tempcore πληροί τις προϋποθέσεις του προτύπου ΕΛΟΤ-971 για συγκολλησίμους χάλυβες.

Πίνακας 2: Χημική σύσταση δομικού χάλυβα S 500s

C	Mn	S	P	Si	Ni	Cr	Cu	V	Mo
0.18	0.99	0.047	0.023	0.15	0.09	0.09	0.21	0.002	0.021

Σύμφωνα με τον ΚΤΧ/2000, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των χαλύβδινων ράβδων τύπου S500s Tempcore κατά ΕΛΟΤ 959 και ΕΛΟΤ 971 δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 3: Μηχανικά χαρακτηριστικά των χαλύβδινων ράβδων τύπου S500s Tempcore

Μέγεθος	S500s
Όριο διαρροής f_y (MPa)	500
Εφελκυστική αντοχή f_t (MPa)	550
Λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής f_t/f_y	$\geq 1,05$

Τσιμέντο

Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή των δοκιμών είναι τύπου Portland II 35 και η ακριβής σύσταση του είναι:

Πίνακας 4: Σύσταση τσιμέντου Portland που χρησιμοποιήθηκε

SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	K₂O	Na₂O	SO₃	CaO_(f)	LOI
20.67	4.99	3.18	63.60	2.73	0.37	0.29	2.414	2.41	2.52

Σύμφωνα με τον Ελληνικό κανονισμό τσιμέντου, που ισχύει με σχετικό προεδρικό διάταγμα (ΠΔ) από το 1980 προβλέπεται ότι το τσιμέντο τύπου II, αποτελείται από το τσιμέντο Portland με έως 20% φυσική ή τεχνητή ποζολάνη. Ο αριθμός 35 αναφέρεται στις μηχανικές ιδιότητες. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι αναπτύσσει αντοχές σε θλίψη, μεγαλύτερη από 15N/mm² μετά το πέρας 7 ημερών, ενώ μετά από 28 ημέρες, κυμαίνεται από 25 έως 45 N/mm².

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 150, ο συγκεκριμένος τύπος τσιμέντου είναι γενικής χρήσης και προτιμάται όταν απαιτείται ενδιάμεση αντοχή στην επίδραση θεϊκών αλάτων ή ενδιάμεση θερμότητα ενυδάτωσης.

Αδρανή

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.

Στην παρούσα πειραματική διαδικασία, ως αδρανές χρησιμοποιήθηκε άμμος, η οποία πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Η κοκκομετρική διαβάθμιση της άμμου που χρησιμοποιήθηκε είναι η παρακάτω:

Πίνακας 5: Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου

Διάμετρος κόκκων	% Σύσταση
4 mm < d	2.80
2 mm < d < 4 mm	30.60

1 mm < d < 2 mm	25.43
500 μm < d < 1 mm	14.22
250 μm < d < 500 μm	9.42
d < 250 μm	16.53

Πίνακας 6: Χημική Σύσταση άμμου (% αρχικού δείγματος άμμου)						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	LOI
1,4	0,64	0,48	54,6	0,34	0,08	42,4

Νερό

Το χρησιμοποιούμενο νερό πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγραφή EN 1008. Το νερό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δοκιμών τσιμεντοκονιάματος είναι απιονισμένο νερό.

Γενικά, το νερό που χρησιμοποιείται στην Παρασκευή του σκυροδέματος πρέπει να έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε άλατα και υψηλό pH. Ειδικότερα, το νερό που θα χρησιμοποιηθεί για την Παρασκευή του σκυροδέματος θα πρέπει να έχει:

1. Περιεκτικότητα σε άλατα μικρότερη από 3,5%
2. Περιεκτικότητα σε θειικά μικρότερη από 0,5%
3. pH μεγαλύτερο του 4
4. Περιεκτικότητα σε νάτριο, μικρότερη από 3% (υπολογισμένο σαν Na₂O)
5. Πλήρη έλλειψη σε λίπη ή έλαια
6. Χαμηλή περιεκτικότητα σε διαλυμένες οργανικές ουσίες.
7. Χαμηλή περιεκτικότητα σε αιωρούμενες οργανικές ουσίες

Η αναλογία νερού προς τσιμέντο (W/C) είναι πολύ σημαντική παράμετρος, που επηρεάζει τις ιδιότητες του φρέσκου και σκληρυμένου σκυροδέματος. Στο φρέσκο σκυροδέμα, η παραπάνω προσθήκη τσιμέντου, δυσκολεύει την εργασιμότητά του, και κατ' αντιστοιχία, μικρότερη ποσότητα τσιμέντου επιφέρει προβλήματα στο καλούπωμα.

Νανοσωλήνες Άνθρακα

Οι νανοσωλήνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τροποποιημένοι νανοσωλήνες μεταχείριση νιτρικού οξέος.

Η πρώτη κατηγορία CNTs που χρησιμοποιήθηκε είναι ONEX MX 1000C3 της εταιρείας GLONATECH, από τη σειρά «Multi-Wall Carbon Nanotubes MWCNTs ONEX-MW 1000 Series». Πρόκειται για πολυφλυκικούς νανοσωλήνες υψηλής καθαρότητας, που έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν μηχανικές, ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες στα τελικά προϊόντα, όπου απαιτείται υψηλή αντοχή σε αναλογία με το βάρος. Το προϊόν αυτό έχει περιεκτικότητα σε άνθρακα μεγαλύτερη από 98% και εφαρμόζεται συνήθως σε επικαλύψεις και σε εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας και της ναυπηγικής. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρόσθετα στο σκυρόδεμα και σε άλλα οικοδομικά υλικά, αυξάνοντας τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Βρίσκονται σε μορφή σκόνης, έχουν διάμετρο 20-65nm, μήκος $\geq 10\mu\text{m}$, και πυκνότητα $\leq 190\text{-}270\text{kg/m}^3$. [47]

Η δεύτερη κατηγορία CNTs είναι η κατηγορία 1000F. Η κατηγορία αυτή, είναι ίδια με την προηγούμενη, μόνο που έχει υποστεί χημική μεταχείριση νιτρικού οξέος. Εξαιτίας της φύσης του άνθρακα, αλλά και των δυνάμεων van der Waals μεταξύ των σωλήνων, οι νανοσωλήνες είναι υδροφοβικοί, γεγονός που μειώνει την ικανότητα διασπορά τους στο νερό και σε οργανικούς διαλύτες. Επιπλέον, η έκθεσή τους σε υπερήχους δε βελτιώνει τη διασπορά τους. Για το λόγο αυτό, γίνεται χημική τροποποίηση της επιφάνειά τους με νιτρικό οξύ, έχοντας ως αποτέλεσμα την υδροφιλική συμπεριφορά των νανοσωλήνων και την καλύτερη διασπορά τους. Αυτό οφείλεται στη δημιουργία των υδροξυλίων OH^- , τα οποία επιτρέπουν στο υδρογόνο να δημιουργήσει δεσμούς με τα μόρια του νερού. [48]

6.2.2. Κατηγορίες Δοκιμών

Κατασκευάστηκαν τέσσερις σειρές δοκιμών, με έξι δοκίμια κάθε σειρά:

1^η σειρά : Δοκίμια αναφοράς (χωρίς νανοσωλήνες)

2^η σειρά: Δοκίμια με μηχανικά τροποποιημένους νανοσωλήνες άνθρακα 0,1% κ.β. τσιμέντου (1000C3)

3^η σειρά: Δοκίμια με χημικά τροποποιημένους νανοσωλήνες (0,1% κ.β.τσιμέντου) με διασπορά στο νερό με τη βοήθεια υπερήχων (1000F με διασπορά)

4^η σειρά: Δοκίμια με χημικά τροποποιημένους νανοσωλήνες (0,1% κ.β.τσιμέντου) με διασπορά στο νερό, χωρίς τη βοήθεια υπερήχων (1000F χωρίς διασπορά)

6.2.3. Διαδικασία παρασκευής δοκιμών

Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Μηχανικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών στο ΔΠΘ. Η αναλογία νερού/τσιμέντου/ άμμου ήταν 0,5/1/3.

Ως διαβρωτικό περιβάλλον χρησιμοποιήθηκε διάλυμα 3.5% κ.β. NaCl. Για την επιτάχυνση της διαβρωτικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε μερική εμβάπτιση των δοκιμών στο υδατικό χλωριούχο διάλυμα 3,5%κ.β. NaCl.

1. Καθαρισμός Χαλύβων και καλουπιών

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία κατασκευής των δοκιμών τσιμεντοκονιάματος, απαιτείται ο καθαρισμός των ράβδων χάλυβα καθώς και ο καθαρισμός των καλουπιών, μέσα στα οποία θα τοποθετηθεί ο τσιμεντοπολτός μέχρι την σκλήρυνση.

Σε ότι αφορά στα καλούπια, απαιτείται πριν από κάθε χρήση τους, καθαρισμός και λείανση της εσωτερικής επιφάνειας, έτσι ώστε να αποκολλώνται εύκολα τα δοκίμια, μετά τη σκλήρυνση του τσιμεντοκονιάματος, αλλά και να αποφεύγονται ανωμαλίες στην επιφάνειά τους.

Ο καθαρισμός των ράβδων του χάλυβα είναι χρονοβόρα, αλλά απαραίτητη διαδικασία, και πραγματοποιείται σε κάθε χαλύβδινη ράβδο πριν από τη χρήση της. Οι ράβδοι τοποθετήθηκαν σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος, το οποίο περιέχει αναστολέα διάβρωσης, και παρέμειναν σε αυτό περίπου 10-15 λεπτά. Στη συνέχεια ξεπλύθηκαν με απιονισμένο νερό και εμβαπτίστηκαν σε ακετόνη, για την απομάκρυνση των λιπαρών ουσιών από την επιφάνειά τους.

Η διαδικασία καθαρισμού του χάλυβα είναι πολύ σημαντική και γίνεται με σκοπό την ενεργοποίηση της επιφάνειάς του, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί καλύτερη πρόσδεση με το τσιμεντοκονίαμα, όταν ο χάλυβας τοποθετηθεί μέσα σε αυτό. Επιπλέον, με τη διαδικασία αυτή απομακρύνονται σκόνες και οξείδια από την επιφάνειά του, καθώς και άλλα ανεπιθύμητα σωματίδια.

2. Κατασκευή δοκιμών τσιμεντοκονιάματος

Για την κατασκευή των δοκιμών του τσιμεντοκονιάματος, αναμίχθηκαν τσιμέντο, αδρανή και νερό σε αναλογία 1/3/0,5. Στο σκυρόδεμα προστέθηκαν οι τρεις κατηγορίες νανοσωλήνων άνθρακα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, μία για κάθε ομάδα δοκιμών. Το μίγμα εκχύθηκε στα καλούπια και τοποθετήθηκε σε καθένα από αυτά μια χαλύβδινη ράβδος, μήκους 10cm, η οποία προεξέχει περίπου 2cm. Τα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος που κατασκευάστηκαν είναι κυλινδρικού σχήματος, με διαστάσεις 10cm περίπου ύψος και διάμετρο 4cm περίπου.

Μετά από περίπου 3 ημέρες, το τσιμεντοκονίαμα είχε πλέον στερεοποιηθεί και έτσι, τα δοκίμια απομακρύνθηκαν από τα καλούπια. Τοποθετήθηκαν σε λεκάνες με νερό και παρέμειναν για άλλες 3 ημέρες με σκοπό την ενυδάτωση των δοκιμών.

3. Μόνωση οπλισμού

Προκειμένου να καθίσταται δυνατόν να λαμβάνονται μετρήσεις για το δυναμικό διάβρωσης του χάλυβα και την αντίσταση γραμμικής πόλωσης, ήταν απαραίτητη η δημιουργία ηλεκτρικής γέφυρας μεταξύ του οπλισμού και του ηλεκτροδίου μέτρησης.

Μετά την παραλαβή των δοκιμών, το ελεύθερο άκρο των οπλισμών καθαρίστηκε με γυαλόχαρτο, προκειμένου να απομακρυνθούν τμήματα, στα οποία είχε ξεκινήσει η διαδικασία της διάβρωσης, λόγω της έκθεσής τους στο περιβάλλον κατά τη μεταφορά τους.

Στη συνέχεια, για τη δημιουργία της ηλεκτρικής γέφυρας, το ένα άκρο ενός μικρού κομματιού σύρματος χαλκού τυλίχθηκε γύρω από το ελεύθερο άκρο του οπλισμού.

Στη συνέχεια, το ελεύθερο άκρο του οπλισμού μονώθηκε από το περιβάλλον. Αρχικά, τοποθετήθηκε σφικτήρας-δαχτυλίδι γύρω από το ελεύθερο άκρο του οπλισμού, έτσι ώστε

να εξασφαλιστεί η επαφή του με το σύρμα χαλκού. Στη συνέχεια, το ελεύθερο άκρο του οπλισμού καλύφθηκε με μίγμα από δύο κόλλες από εποξειδικές ρητίνες (Araldite AW 106, Hardener HV 953 U BD), σε αναλογία 100:80. Για να μην υπάρχει ροή της κόλλας στην περίμετρο των δοκιμών τοποθετείται αρχικά, χαρτοταινία γύρω από κάθε δοκίμιο.

Τόσο η άνω επιφάνεια κάθε δοκιμίου, όσο και το ελεύθερο άκρο κάθε ράβδου, καλύφθηκαν πλήρως με το μίγμα των εποξειδικών ρητινών, προκειμένου να μονωθεί πλήρως ο οπλισμός. Στη συνέχεια, τα δοκίμια αφέθηκαν ώσπου να στεγνώσει η κόλλα.

Αφού η κόλλα στα δοκίμια στέγνωσε πλήρως, κάθε κατηγορία βυθίστηκε σε ξεχωριστό δοχείο υδατικού διαλύματος NaCl 3.5% w/w μέχρι περίπου το ¼ του ύψους τους και πραγματοποιήθηκε η πρώτη μέτρηση του δυναμικού ανοιχτού κυκλώματος.

Μετά από 7 ημέρες, το υδατικό διάλυμα NaCl συμπληρώθηκε με απιονισμένο νερό, καλύπτοντα περισσότερο από τα ¾ του ύψους των δοκιμών.

Τα δοκίμια παρέμειναν στο διάλυμα για χρονικό διάστημα 152 ημερών. Σε όλο αυτό το διάστημα, η μέτρηση του δυναμικού ανοιχτού κυκλώματος γινόταν κάθε 7 ημέρες.

Η μέτρηση της αντίστασης γραμμικής πόλωσης, γινόταν ανά 7 ημέρες για τους δύο πρώτους μήνες, και ανά 15 ημέρες για τους επόμενους 3 μήνες.

6.3. Μέθοδοι Εκτίμησης Διάβρωσης Οπλισμού

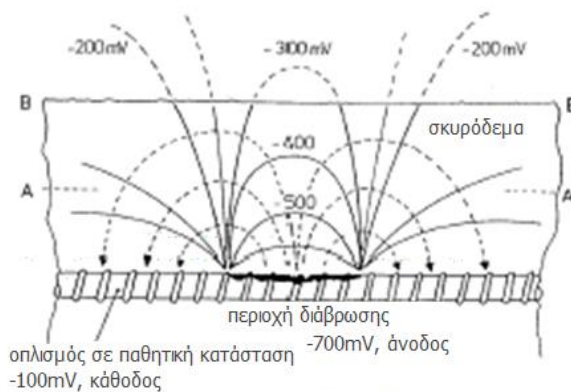
Η μελέτη της διάβρωσης των οπλισμών πραγματοποιήθηκε με τις ακόλουθες μεθόδους:

1. Μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης ανοιχτού κυκλώματος συναρτήσεως του χρόνου, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-879 “Standard method for Half Cell Potentials of reinforcing Steel in Concrete”.
2. Μέτρηση αντίστασης διάβρωσης συναρτήσεως του χρόνου με τη μέθοδο της Γραμμικής Πόλωσης (Linear Polarization), σύμφωνα με το πρότυπο ASTM G59-97 (2009)
3. Εκτίμηση απώλειας μάζας, με βάση το νόμο του Faraday.

6.3.1. Η μέτρηση του δυναμικού συναρτήσεως του χρόνου

Το δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος ή δυναμικό διάβρωσης είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας διάβρωσης και προσδιορίζεται από το άθροισμα των συνολικών ηλεκτροχημικών δράσεων αναγωγής και οξειδωσης. Η μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης είναι μια ποιοτική, μη καταστρεπτική μέθοδος, η οποία επιτρέπει την παρακολούθηση και τον χαρακτηρισμό της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα, συναρτήσεως του χρόνου. Για τον προσδιορισμό του μετράται η διαφορά δυναμικού του μετάλλου ως προς ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς με απλό ή ψηφιακό βολτόμετρο.

Το δυναμικό διάβρωσης εξαρτάται από τον τύπο του μετάλλου, τις συνθήκες περιβάλλοντος έκθεσης (υγρασία, pH, συγκέντρωση αλάτων), τη διαθεσιμότητα του οξυγόνου, τα επαγόμενα ρεύματα και από τη θερμοκρασία.



Εικόνα 22: Κατανομή δυναμικών διάβρωσης σε διαβρωμένο χάλυβα – δημιουργία μικρογαλβανικού στοιχείου.

Η μέτρηση δίνει πληροφορίες για τη σχετική τάση διάβρωσης μεταξύ διαφόρων μετάλλων, ενώ η χρονική εξέλιξη του αποκαλύπτει την προδιάθεση είτε μειωμένης διάβρωσης (π.χ. σχηματισμός προστατευτικού οξειδίου) όταν μετατοπίζεται ηλεκτροθετικά, είτε αυξημένης διάβρωσης, όταν μετατοπίζεται ηλεκτροαρνητικά με την πάροδο του χρόνου. [49]

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87: “Standard test method for Half Cell potentials of reinforcing Steel in Concrete”, οι τιμές του μετρούμενου δυναμικού διάβρωσης, αποτελούν ένδειξη για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο οπλισμός στο σκυρόδεμα. Για τιμές δυναμικού διάβρωσης έως -200mV , ο οπλισμός βρίσκεται στην παθητική περιοχή. Για τιμές μεταξύ -200mV και -350mV , η κατάσταση του οπλισμού είναι αβέβαιη (δεν ευρίσκεται πια στην παθητική κατάσταση και υπάρχει πιθανότητα 50% για διάβρωση). Τιμές ηλεκτροαρνητικότερες των -350mV δείχνουν ότι ο οπλισμός ευρίσκεται στην ενεργή περιοχή από άποψη διάβρωσης και οι πιθανότητες να διαβρωθεί είναι 90%.

Δυναμικό διάβρωσης χάλυβα ΟΣ ως προς $\text{Cu}/\text{CuSO}_4,\text{sat}$ [mV]	Κατάσταση οπλισμού
$E_{\text{corr}} > -200\text{mV}_{\text{CSE}}$	Ο οπλισμός βρίσκεται στην παθητική κατάσταση (δεν διαβρώνεται), με 90% πιθανότητα
$-200\text{mV}_{\text{CSE}} > E_{\text{corr}} > -350\text{mV}_{\text{CSE}}$	Κατάσταση οπλισμού αβέβαιη
$E_{\text{corr}} < -350\text{mV}_{\text{CSE}}$	Ο οπλισμός βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση (διαβρώνεται), με 90% πιθανότητα

Πίνακας 7: Συσχέτιση μεταξύ των τιμών του δυναμικού χαλύβδινου οπλισμού και της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87.

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας, ως ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο αργύρου – χλωριούχου αργύρου κορεσμένο σε χλωριούχο νάτριο (Ag/AgCl|NaCl sat'd). Κατά τη μέτρηση, το ηλεκτρόδιο αναφοράς τοποθετείται μέσα στο διάλυμα χλωριούχου νατρίου στα δοχεία με τα δοκίμια, και συνδέεται με το πολύμετρο. Ταυτόχρονα, το δοκίμιο συνδέεται με το πολύμετρο μέσω ηλεκτρικής επαφής, και έτσι δημιουργείται η δυνατότητα μέτρησης του δυναμικού ανοιχτού κυκλώματος. Οι μετρήσεις του δυναμικού που έγιναν για κάθε δοκίμιο, κατεγράφησαν και αποτυπώθηκαν σε διαγράμματα συναρτήσεως του χρόνου.

6.3.2. Γραμμική Πόλωση

Οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις βασίζονται στην ηλεκτροχημική φύση της διάβρωσης και μετρούν τις ηλεκτρικές ιδιότητες της ηλεκτρισμένης διπλοστοιβάδας, δηλαδή της διεπιφάνειας μετάλλου/ διαλύματος. Η κινητική των ηλεκτροχημικών δράσεων ενός μετάλλου, το οποίο διαβρώνεται μπορεί να προσδιοριστεί από τουλάχιστον τρεις παραμέτρους, όπως πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης i_{corr} , δυναμικό διάβρωσης E_{corr} , και σταθερές Tafel (β_a και β_c). Οπότε, η συμπεριφορά του μετάλλου μπορεί να απεικονιστεί από τις καμπύλες πόλωσης (E-I). Η εκτίμηση των παραπάνω παραμέτρων οδηγεί στον προσδιορισμό της αντίστασης πόλωσης R_p και του ρυθμού διάβρωσης.

Κοντά στο δυναμικό ισορροπίας ισχύει η γραμμική σχέση μεταξύ δυναμικού και πυκνότητας ρεύματος.

Η κλίση της καμπύλης πόλωσης για δυναμικό ίσο με το δυναμικό διάβρωσης δίνει αντίσταση πόλωσης R_p , όπου $R_p = \Delta E / \Delta i$.

Η παρακάτω εξίσωση είναι η εξίσωση Butler-Volmer για μικτό ηλεκτρόδιο:

Η εξίσωση Butler – Volmer μπορεί να μας δώσει τη συμμετοχή της καθοδικής και της ανοδικής δράσης στο ρεύμα μιας αντίδρασης μεταφοράς φορτίου.

$$i = i_{corr} \left[\exp\left(\frac{E - E_{corr}}{\beta_a}\right) - \exp\left(\frac{-(E - E_{corr})}{\beta_c}\right) \right]$$

Από το γραμμικό μετασχηματισμό της εξίσωσης Butler-Volmer, δηλαδή για $E = E_{corr}$ προκύπτει ότι:

$$\frac{di}{d(E - E_{corr})} = i_{corr} \left(\frac{1}{\beta_a} + \frac{1}{\beta_c} \right)$$

Οπότε

$$\frac{1}{i_{corr} \left(\beta_a + \beta_c \right)}$$

ή

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} = \frac{babc}{2,3i_{corr}(\beta_a + \beta_c)}$$

Όπου β_a και β_c η ανοδική και καθοδική σταθερά του Tafel αντίστοιχα.

Η συσχέτιση των μετρήσεων γραμμικής πόλωσης με την κατάσταση του χαλύβδινου οπλισμού δίνεται από κριτήρια που αναπτύχθηκαν βάσει εργαστηριακών δοκιμών και συνοψίζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Πίνακας 8: Συσχέτιση μεταξύ των τιμών της πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης χαλύβδινων οπλισμών σε σκυρόδεμα και της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα

i_{corr} ($\mu\text{A cm}^{-2}$)	Κατάσταση οπλισμού
$i_{corr} < 0,1 \mu\text{A cm}^{-2}$	Παθητική κατάσταση
$0,1 < i_{corr} < 0,5 \mu\text{A cm}^{-2}$	Χαμηλός ως μέτριος ρυθμός διάβρωσης
$0,5 < i_{corr} < 1 \mu\text{A cm}^{-2}$	Μέτριος ως υψηλός ρυθμός διάβρωσης
$i_{corr} > 1 \mu\text{A cm}^{-2}$	Υψηλός ρυθμός διάβρωσης

Πίνακας 9: Συσχέτιση μεταξύ των τιμών της πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης χαλύβδινων οπλισμών σε σκυρόδεμα και της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα

i_{corr} ($\mu\text{A cm}^{-2}$)	Κατάσταση κατασκευής
$i_{corr} < 0,2 \mu\text{A cm}^{-2}$	Δεν αναμένονται φαινόμενα διάβρωσης
$0,2 < i_{corr} < 1,0 \mu\text{A cm}^{-2}$	Πιθανότητα διάβρωσης σε 10-15 χρόνια
$1,0 < i_{corr} < 10 \mu\text{A cm}^{-2}$	Πιθανότητα διάβρωσης σε 2-10 χρόνια
$i_{corr} > 10 \mu\text{A cm}^{-2}$	Πιθανότητα διάβρωσης σε 2 χρόνια ή λιγότερο

Για την εφαρμογή της μεθόδου, απαιτείται να προσδιοριστεί πρώτα το δυναμικό διάβρωσης του χάλυβα. Εφαρμόζονται διάφορα δυναμικά στο χάλυβα και μετράται κάθε φορά το ρεύμα αποκρίσεως. Τα εφαρμοζόμενα δυναμικά είναι περίπου 20 mV μεγαλύτερα και μικρότερα από το δυναμικό διάβρωσης του χάλυβα. Με τις τιμές του δυναμικού E και τις αντίστοιχες εντάσεις ρεύματος I, συντάσσεται το διάγραμμα E-logI, το οποίο ονομάζεται καμπύλη πόλωσης.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Ταχύτητα
- Μη καταστρεπτικότητα, επομένως μπορεί η επιφάνεια του δοκιμίου να χρησιμοποιηθεί και για άλλες μετρήσεις.
- Ακρίβεια, ακόμα και σε πολύ μικρά ποσοστά διάβρωσης
- Εφαρμογή και σε περιπτώσεις που άλλες μέθοδοι (οπτικές, απώλειες βάρους) δεν μπορούν να εφαρμοστούν
- Αμελητέες ωμικές τάσεις.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε περιελάμβανε ποτενσιοστάτη / γαλβανοστάτη της EG&G Princeton Applied Research Model 263A. Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Power Suite της ίδιας εταιρείας.

Η διάταξη ήταν των τριών ηλεκτροδίων.

1. Ηλεκτρόδιο εργασίας: ο χαλύβδινος οπλισμός των δοκιμών του τσιμεντοκονιάματος.
2. Ηλεκτρόδιο αναφοράς: αργύρου χλωριούχου αργύρου (Ag/AgCl | NaCl sat'd)
3. Αντίθετο ηλεκτρόδιο: ράβδος άνθρακα.

Ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιήθηκε το διάλυμα NaCl 3,5%κ.β., στο οποίο είναι εμβαπτισμένα τα δοκίμια.

Συνολικά έγιναν 13 μετρήσεις του σπλισμού των δοκιμών με τη μέθοδο της γραμμικής πόλωσης.

Η πόλωση του σπλισμού έγινε σε εύρος -20/+20mV πάνω και κάτω από το δυναμικό ισορροπίας και η επιφάνεια του σιδηροσπλισμού που εξεταζόταν ήταν 10cm². Από τη μέτρηση λαμβάνεται διάγραμμα του δυναμικού σε συνάρτηση με την πυκνότητα του ρεύματος διάβρωσης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, για δυναμικό κοντά στο δυναμικό ισορροπίας, ισχύει γραμμική σχέση μεταξύ δυναμικού και πυκνότητας ρεύματος. Στην περιοχή κοντά στο I=0, η συνάρτηση του δυναμικού ως προς την πυκνότητα του ρεύματος ακολουθεί το νόμο του Ohm. Η κλίση της ευθείας της συνάρτησης αυτής για δυναμικό $E=E_{corr}$ είναι η αντίσταση πόλωσης R_p . Συνοψίζοντας, από τις μετρήσεις γραμμικής πόλωσης καθορίζονται για κάθε δοκίμιο το δυναμικό διάβρωσης και η αντίσταση πόλωσης.

6.3.3. Ηλεκτροχημική απώλειας μάζας

Η θεωρητική εκτίμηση της απώλειας μάζας γίνεται μετατρέποντας τη ροή ηλεκτρονίων σε απώλεια μάζας με βάση το νόμο του Faraday, προκύπτοντας τα ακόλουθα:

$$m = \frac{MIt}{zF}$$

Όπου:

m : η μάζα του μετάλλου που καταναλώνεται,

I : το ηλεκτρικό ρεύμα (A)

t : χρόνος (s)

F: σταθερά Faraday (As ή Cb/mol)

z: αριθμός ανταλλασσόμενων ηλεκτρονίων (z=2 για την αντίδραση $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$)

M : Ατομικό βάρος μετάλλου (56g για το Fe)

6.4. Αποτελέσματα Μετρήσεων

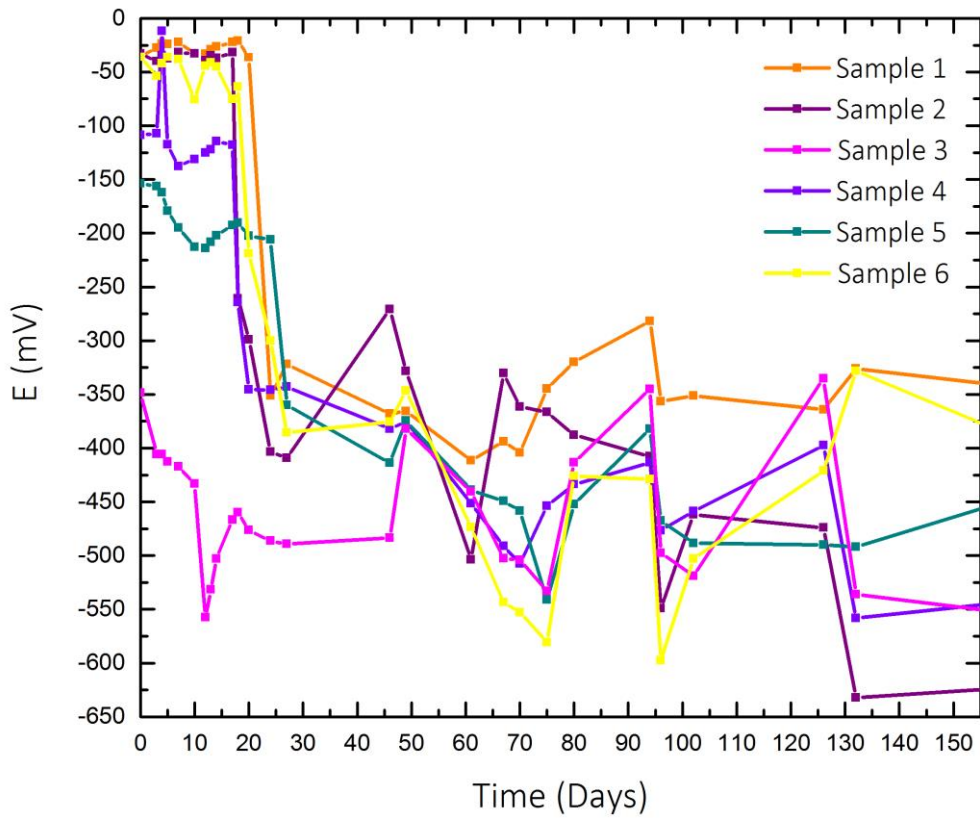
6.4.1 Μέτρηση δυναμικού διάβρωσης E(mV)

Οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης έγιναν στο σύνολο των δοκιμίων τα οποία παρέμειναν εμβαπτισμένα σε διάλυμα NaCl 3.5% επί 152 ημέρες. Η μέτρηση του δυναμικού γινόταν με συχνότητα 7 ημερών. Για τη μέτρηση του δυναμικού χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό πολύμετρο, ως ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο Ag/AgCl, ως αντίθετο ηλεκτρόδιο ράβδος άνθρακα και ως ηλεκτρόδιο εργασίας, ο χαλύβδινος σπλισμός των δοκιμίων. Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες και στα γραφήματα.

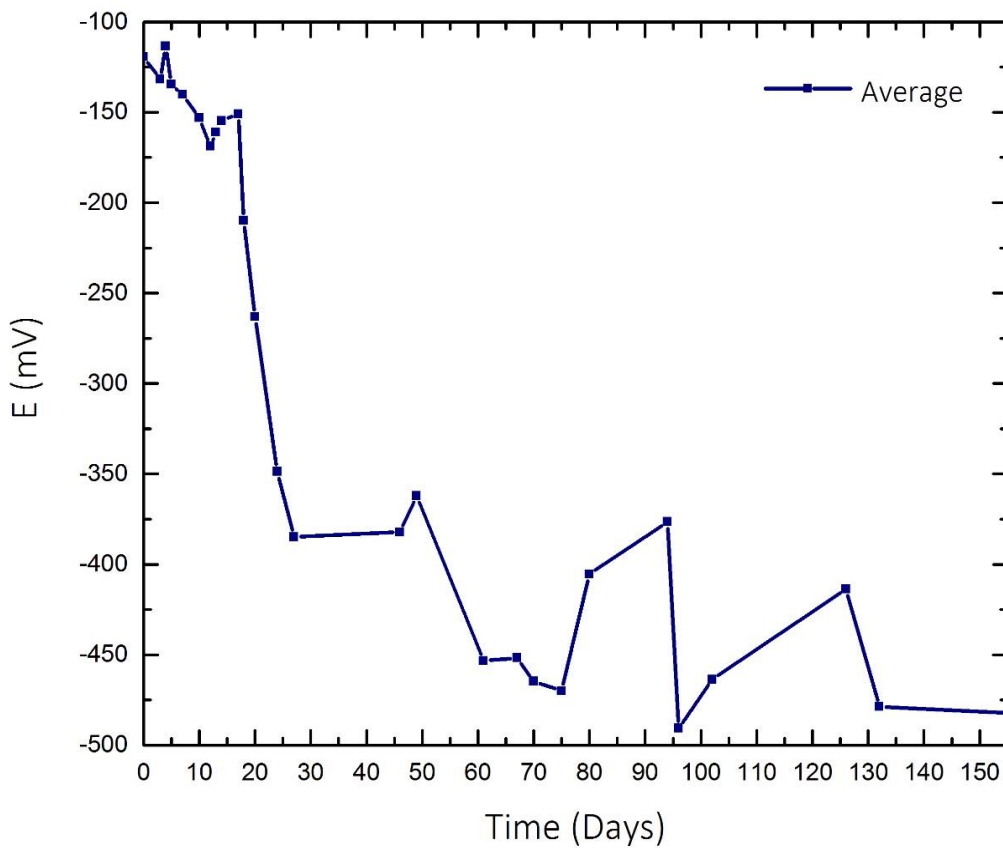
1^η ομάδα δοκιμίων (Δοκίμια Αναφοράς)

Πίνακας 10: Μετρήσεις Δυναμικού E(mV)

Χρόνος (Ημέρες)	1 ^ο	2 ^ο	3 ^ο	4 ^ο	5 ^ο	6 ^ο	M.O.
0	-35,4	-32,6	-348,6	-108,9	-153,8	-36,0	-119,2
3	-27,4	-39,9	-405,6	-107,2	-156,5	-53,7	-131,7
4	-23,7	-34,7	-405,8	-11,8	-162,2	-41,9	-113,4
5	-23,9	-37,6	-412,4	-117,4	-179,3	-36,0	-134,4
7	-22,1	-31,6	-417,1	-137,6	-194,8	-38,2	-140,2
10	-32,5	-32,8	-433,3	-131,2	-212,9	-75,4	-153,0
12	-33,2	-39,1	-557,6	-125,1	-214,0	-44,3	-168,9
13	-28,9	-34,5	-531,7	-122,2	-208,3	-41,2	-161,1
14	-26,3	-36,9	-502,9	-114,6	-202,0	-45,0	-154,6
17	-22,2	-31,4	-466,7	-117,8	-192,5	-75,2	-151,0
18	-20,7	-260,8	-459,8	-264,1	-190,4	-63,8	-209,9
20	-36,5	-299,0	-476,3	-345,6	-202,6	-218,9	-263,2
24	-351,3	-403,3	-486,2	-345,8	-206,1	-300,0	-348,8
27	-322,0	-409,1	-489,4	-343	-360,1	-385,6	-384,9
46	-368,1	-270,9	-483,4	-382	-413,7	-375,6	-382,3
49	-365,6	-328,5	-382,1	-375,3	-374,5	-346,7	-362,1
61	-411,6	-503,7	-440,3	-451,5	-439,0	-473,7	-453,3
67	-393,9	-330,3	-502,4	-491,0	-449,3	-543,5	-451,7
70	-404,1	-361,5	-504,2	-507,4	-458,2	-552,8	-464,7
75	-344,7	-366,3	-533,0	-453,6	-541,2	-580,7	-469,9
80	-320,0	-387,7	-413,2	-433,6	-452,1	-426,1	-405,5
94	-282,0	-407,8	-345,0	-413,5	-382,0	-428,9	-376,5
96	-356,5	-549,0	-497,5	-476,5	-467,5	-597,3	-490,7
102	-351,1	-461,8	-518,9	-458,9	-488,4	-502,8	-463,7
126	-364,0	-474,0	-335,1	-397,5	-490,0	-421,1	-413,6
132	-326,0	-632,0	-536,1	-558,4	-492,0	-328,3	-478,8
259	-399,5	-590,5	-614,4	-490,3	-295,8	-595,7	-497,7



Γράφημα 1: Μετρήσεις Δυναμικού E(mV)



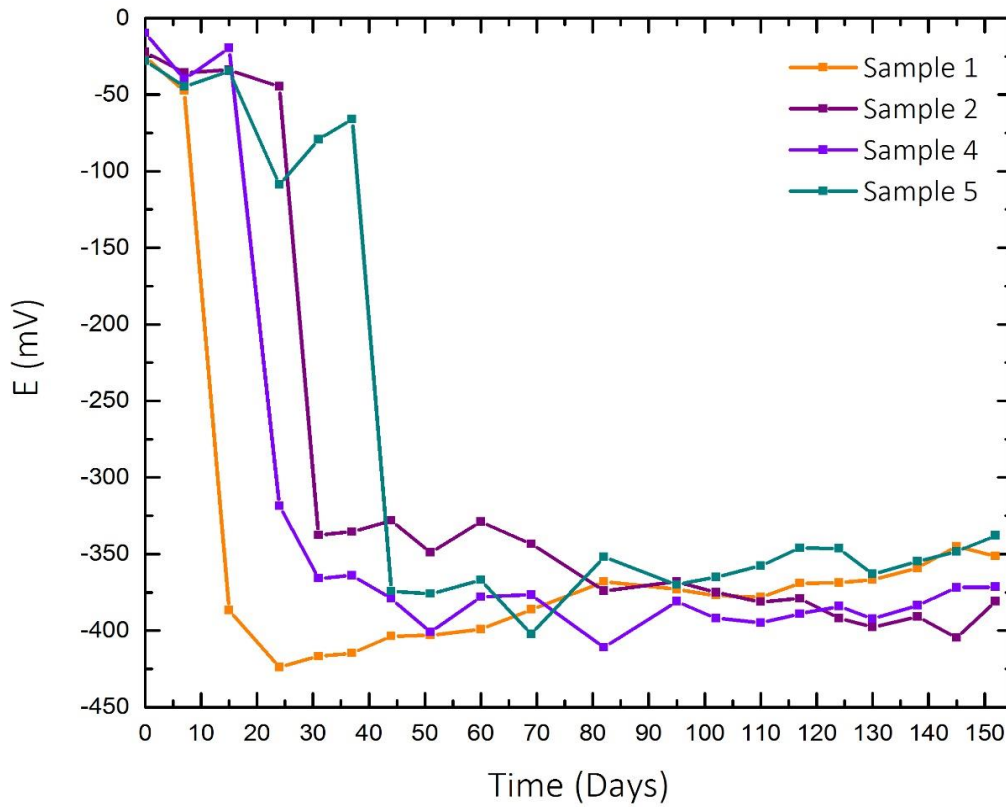
Γράφημα 2: Μέση Τιμή Δυναμικού E(mV)

2^η ομάδα δοκιμών (1000C3)

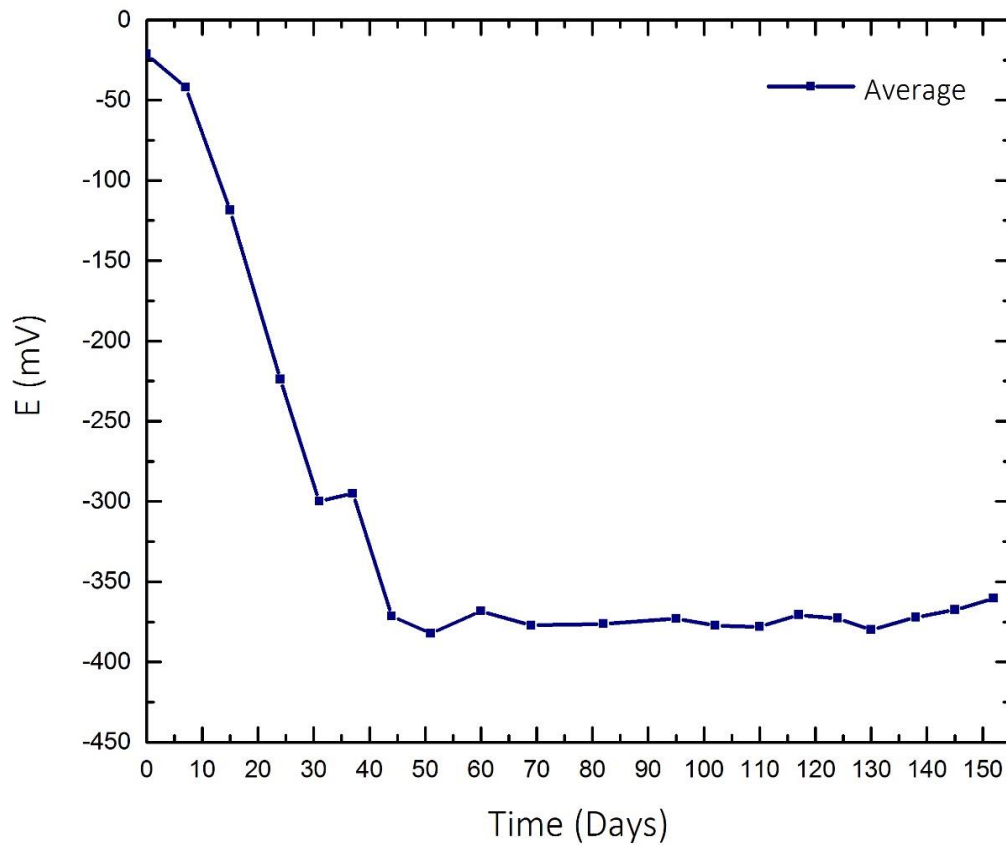
Πίνακας 11: Μετρήσεις Δυναμικού E(mV)

Χρόνος (Ημέρες)	1 ^ο	2 ^ο	3 ^ο	4 ^ο	5 ^ο	6 ^ο	Μ.Ο.
0	-25,4	-22,0	-19,8	-9,6	-28,0	-0,1	-21,2
7	-47,7	-35,8	-36,7	-39,8	-44,8	-262,2	-42,0
15	-386,7	-33,9	-30,1	-19,4	-34,7	-301,4	-118,6
24	-423,9	-44,7	-45,5	-318,6	-108,8	-365,4	-224,0
31	-416,7	-337,5	-31,7	-365,9	-79,2	-337,8	-299,8
37	-414,8	-335,4	-354,3	-363,9	-66,1	-318,8	-295,0
44	-403,7	-328,2	-319,9	-379,1	-374,2	-341,5	-371,3
51	-403,0	-349,0	-342,0	-401,0	-376,0	-372,0	-382,2
60	-399,0	-329,0	-343,0	-378,0	-367,0	-359,0	-368,2
69	-386,3	-343,4	-341,6	-376,6	-402,2	-359,9	-377,1
82	-368,0	-374,0	-359,0	-411,0	-352,0	-366,0	-376,2
95	-373,0	-368,0	-373,0	-381,0	-370,0	-388,0	-373,0
102	-377,0	-375,0	-682,0	-392,0	-365,0	-391,0	-377,2
110	-378,4	-381,3	-704,6	-394,8	-357,8	-408,5	-378,0
117	-369,0	-379,0	-724,0	-389,0	-346,0	-539,0	-370,7
124	-368,7	-391,9	-732,2	-384,0	-346,4	-617,7	-372,8
130	-366,8	-397,8	-738,0	-392,3	-363,0	-652,7	-379,9
138	-359,2	-390,8	-737,8	-383,4	-354,8	-683,2	-372,1
145	-344,9	-404,5	-730,0	-371,9	-348,5	-680,0	-367,4
152	-351,4	-380,9	-732,8	-371,5	-337,7	-683,6	-360,4

* Τα δοκίμια 3 και 6 δε συμπεριλαμβάνονται στον υπολογισμό της μέσης τιμής



Γράφημα 3: Μετρήσεις Δυναμικού E (mV)



Γράφημα 4: Μέση Τιμή Δυναμικού E (mV)

Παρατηρήσεις

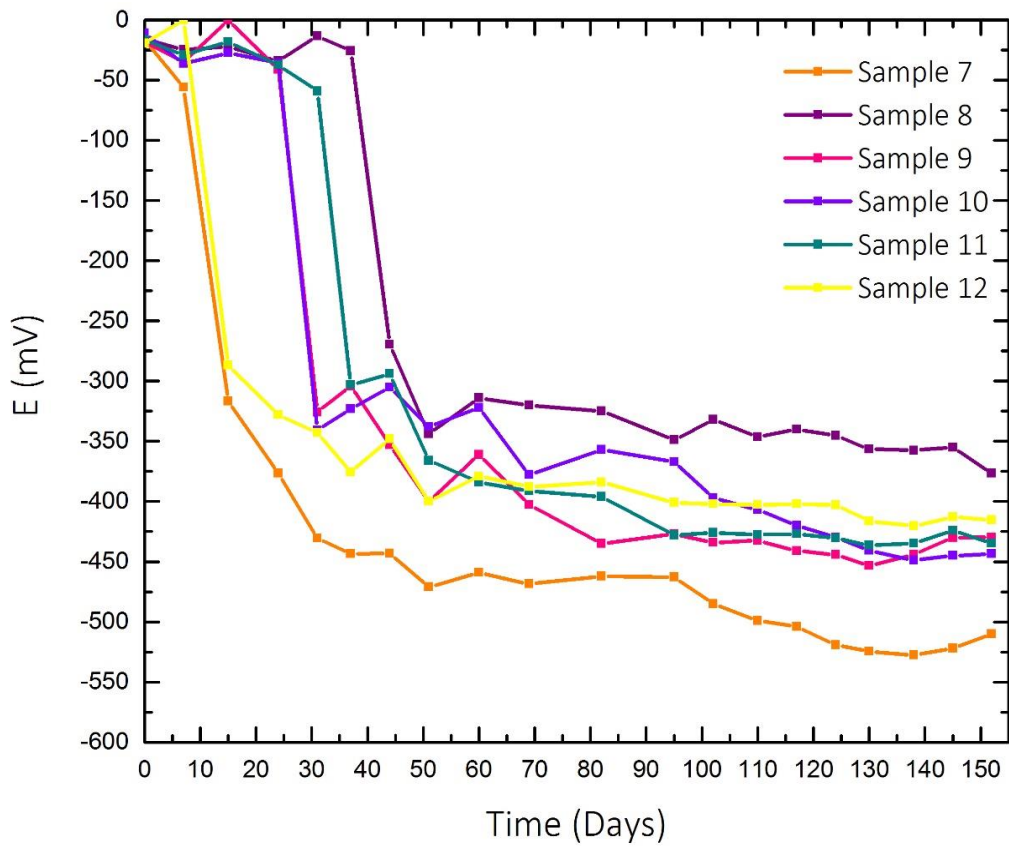
Ξεκινώντας από μικρές αρνητικές τιμές, γρήγορα κατέρχεται (εντός 20 ημερών) στα -350mV. Για τα δοκίμια αυτά, υπάρχει περίπου σταθερή πορεία μέχρι το τέλος του χρόνου εξέτασης.

- **1^η μέρα** : -17,48mV έως **15^η μέρα**: -134,36mV
Ο σπλισμός φαίνεται να βρίσκεται στην **παθητική κατάσταση** και να μην διαβρώνεται μέχρι την 15^η μέρα.
- **24^η μέρα**: -217,82mV έως **37^η μέρα**: -308,88mV
Από την 24^η μέρα, το δυναμικό έχει ξεπεράσει το 200mV, επομένως, ο σπλισμός βρίσκεται σε **αβέβαιη κατάσταση**. Δεν είναι σίγουρο αν διαβρώνεται, και αν αυτό συμβαίνει τότε γίνεται με πολύ αργό ρυθμό.
- **44^η μέρα**: -357,76mV έως **152^η μέρα**: -476,38mV
Από την 44^η μέρα, το δυναμικό έχει ξεπεράσει τα 350mV και δείχνει ανοδική τάση μέχρι και την τελευταία μέτρηση, την 152^η μέρα. Στο σημείο αυτό, ο σπλισμός έχει μεταβεί ήδη στην ενεργή κατάσταση, δηλαδή διαβρώνεται.

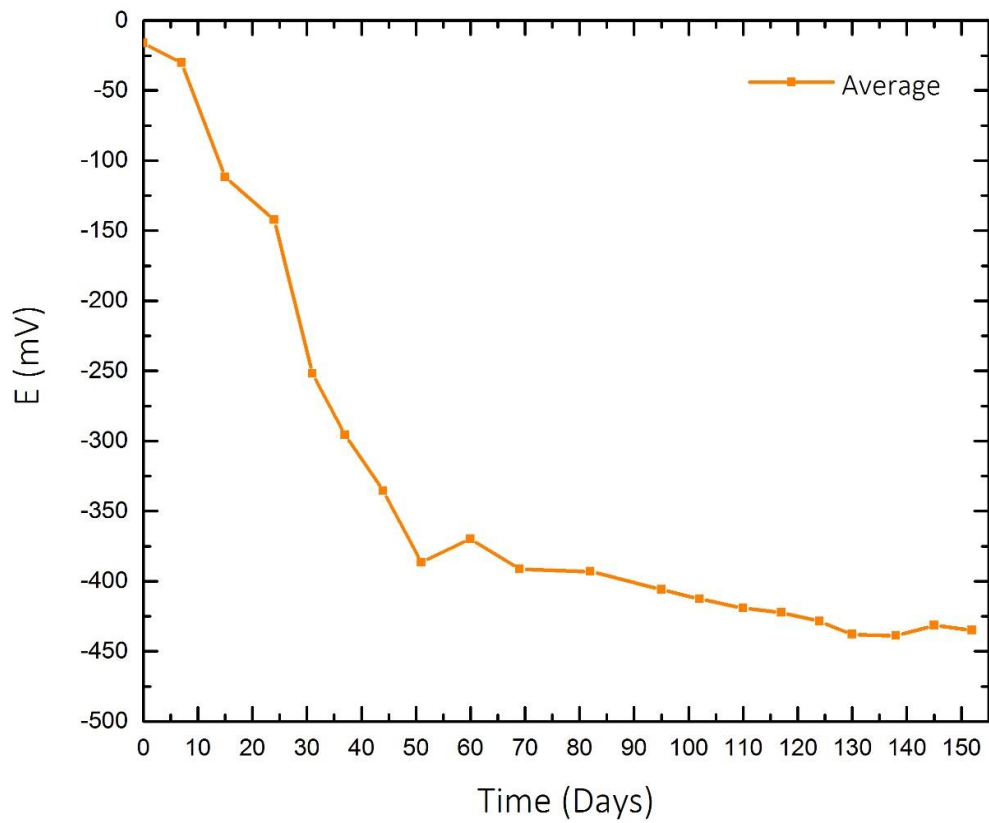
3^η ομάδα δοκιμών (1000F με διασπορά)

Πίνακας 12: Μετρήσεις Δυναμικού E(mV)

Χρόνος (Ημέρες)	7°	8°	9°	10°	11°	12°	M.O.
0	-16,6	-15,7	-18,0	-10,7	-16,4	-19,2	-16,1
7	-56,2	-24,6	-35,0	-36,2	-29,0	0,0	-30,1
15	-316,8	-22,1	0,0	-27,3	-18,2	-286,9	-111,8
24	-376,7	-34,1	-41,1	-35,7	-37,5	-328,2	-142,2
31	-430,6	-13,3	-325,8	-340,7	-59,2	-343,0	-252,1
37	-443,6	-25,5	-304,1	-323,0	-303,2	-375,4	-295,8
44	-443,0	-269,6	-353,0	-305,2	-294,0	-348,2	-335,5
51	-471,0	-344,0	-400,0	-338,0	-366,0	-400,0	-386,5
60	-459,0	-314,0	-361,0	-322,0	-384,0	-379,0	-369,8
69	-468,5	-320,1	-402,8	-377,8	-391,3	-387,8	-391,3
82	-462,0	-325,0	-435,0	-357,0	-396,0	-384,0	-393,1
95	-463,0	-349,0	-427,0	-367,0	-428,0	-401,0	-405,8
102	-485,0	-332,0	-434,0	-397,0	-426,0	-402,0	-412,6
110	-499,0	-346,4	-432,5	-407,0	-427,6	-402,8	-419,2
117	-504,0	-340,0	-441,0	-420,0	-427,0	-402,0	-422,3
124	-519,1	-345,4	-444,3	-429,6	-430,3	-402,8	-428,6
130	-524,6	-356,4	-453,2	-440,8	-436,6	-416,3	-437,9
138	-527,7	-357,4	-444,1	-448,8	-434,5	-420,3	-438,8
145	-522,0	-355,0	-430,0	-445,0	-424,0	-413,0	-431,5
152	-509,8	-376,7	-429,6	-443,6	-434,5	-415,1	-434,9



Γράφημα 5: Μετρήσεις Δυναμικού E (mV)



Γράφημα 6: Μετρήσεις Δυναμικού E (mV)

Παρατηρήσεις

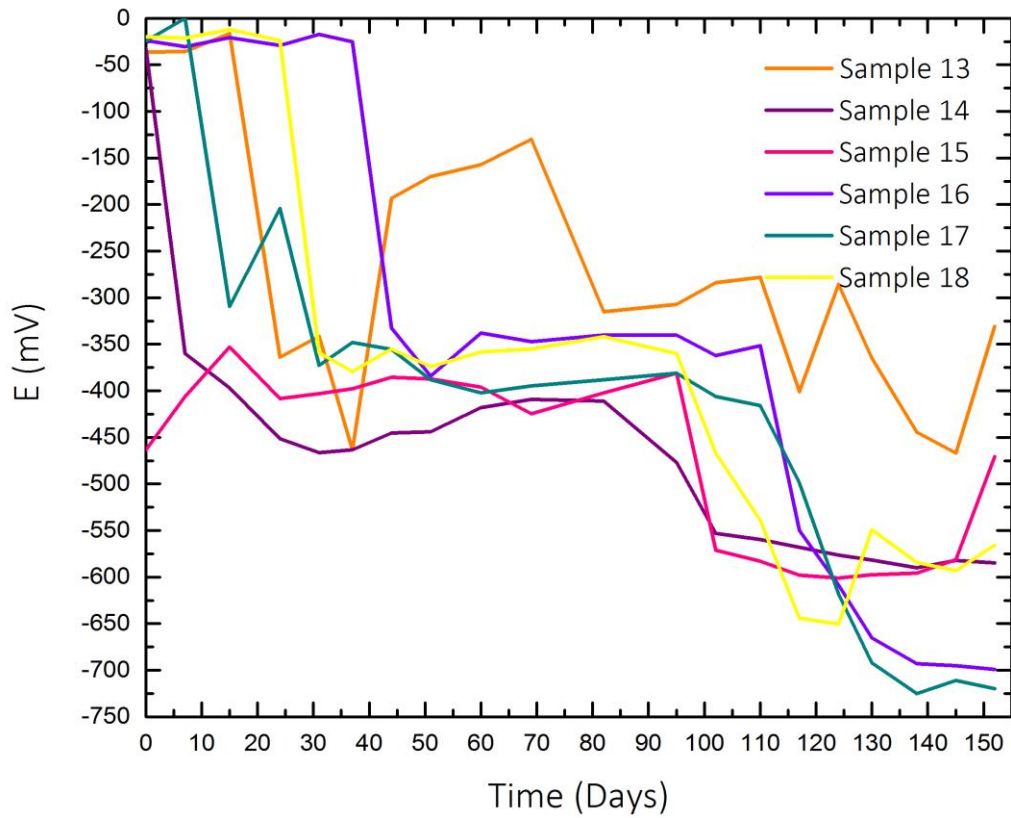
Το δυναμικό όλων των δοκιμών ξεκινά από μικρές αρνητικές τιμές, αλλά εντός 10-30 ημερών κατέρχεται στα επίπεδα -300/-350mV.

- **1^η μέρα** : -16,10mV έως **24^η μέρα**: -142,216mV
Ο σπλισμός φαίνεται να βρίσκεται στην **παθητική κατάσταση** και να μην διαβρώνεται μέχρι και την 24^η μέρα.
- **31^η μέρα**: -252,10mV έως **44^η μέρα**: -335,50mV
Από την 31^η μέρα, το δυναμικό έχει ξεπεράσει το 200mV, επομένως, ο σπλισμός βρίσκεται σε αβέβαιη κατάσταση. Δεν είναι σίγουρο αν διαβρώνεται, και αν αυτό συμβαίνει τότε γίνεται με πολύ αργό ρυθμό. Στην κατάσταση αυτή ο σπλισμός βρίσκεται για 13 ημέρες, μέχρι την 44^η μέρα, όπου το δυναμικό παραμένει μικρότερο των 350mV.
- **51^η μέρα**: -386,50mV έως **152^η μέρα**: -434,94mV
Από την 51^η μέρα, το δυναμικό έχει ξεπεράσει τα 350mV και δείχνει ανοδική τάση μέχρι και την τελευταία μέτρηση, την 152^η μέρα. Στο σημείο αυτό, ο σπλισμός έχει μεταβεί ήδη στην ενεργή κατάσταση, δηλαδή διαβρώνεται.

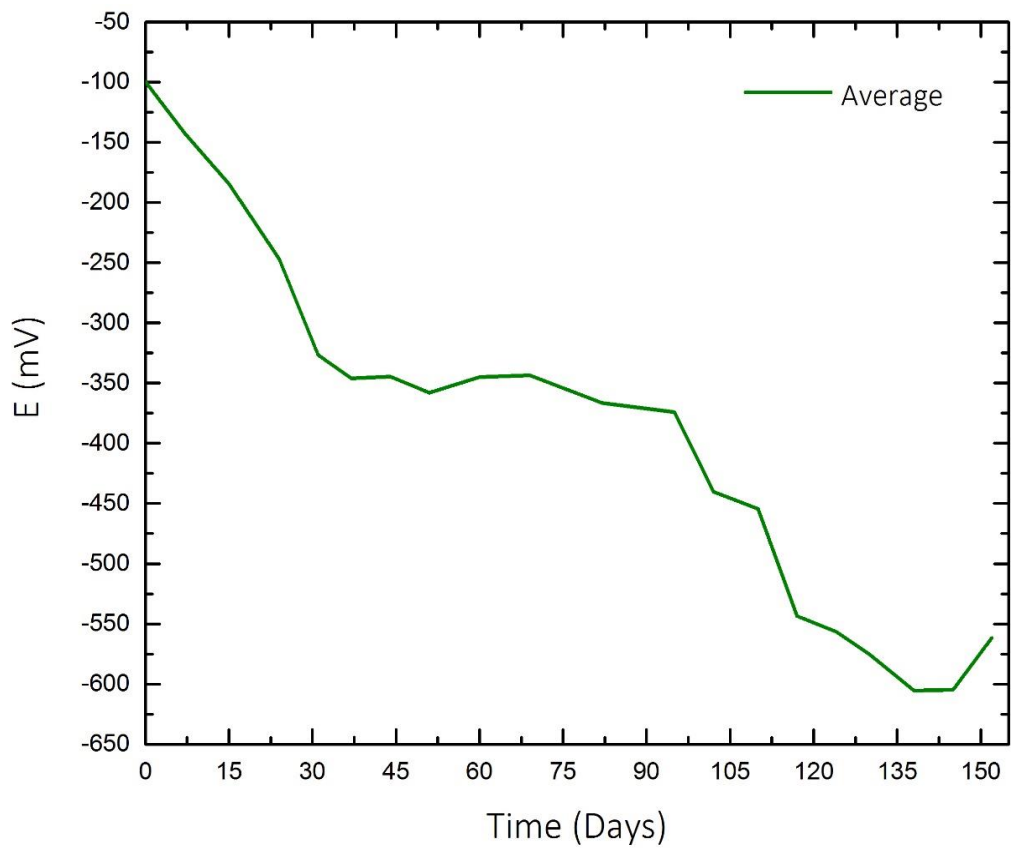
4^η ομάδα δοκιμών (1000F χωρίς διασπορά)

Πίνακας 13: Μετρήσεις Δυναμικού E(mV)

Χρόνος (Ημέρες)	13 ^ο	14 ^ο	15 ^ο	16 ^ο	17 ^ο	18 ^ο	M.O.
0	-35,8	-32,4	-463,1	-23,8	-24,2	-19,7	-99,8
7	-35,4	-360,1	-406,1	-30,1	0,0	-21,2	-142,1
15	-16,1	-397,1	-353,0	-20,7	-309,5	-11,6	-184,6
24	-363,7	-451,5	-408,2	-28,8	-204,1	-23,6	-246,6
31	-341,4	-466,5	-403,2	-16,9	-372,7	-359,0	-326,6
37	-463,3	-463,4	-397,7	-24,9	-348,2	-379,3	-346,1
44	-193,4	-445,1	-385,5	-332,6	-355,5	-354,9	-344,5
51	-170,0	-444,0	-387,0	-384,0	-388,0	-374,0	-357,8
60	-157,0	-418,0	-396,0	-338,0	-402,0	-358,0	-344,8
69	-129,8	-409,0	-424,6	-347,2	-394,9	-355,2	-343,4
82	-315,0	-411,0	-402,0	-340,0	-388,0	-342,0	-366,3
95	-307,0	-477,0	-381,0	-340,0	-381,0	-360,0	-374,3
102	-284,0	-553,0	-571,0	-362,0	-406,0	-467,0	-440,5
110	-278,0	-559,5	-582,8	-351,7	-415,6	-538,9	-454,4
117	-401,0	-568,0	-598,0	-550,0	-499,0	-644,0	-543,3
124	-285,5	-576,2	-600,9	-608,5	-617,9	-650,4	-556,5
130	-364,8	-581,5	-597,6	-665,0	-692,0	-549,1	-575,0
138	-444,2	-590,0	-595,9	-693,0	-725,2	-584,2	-605,4
145	-467,0	-582,0	-581,0	-695,0	-711,0	-593,0	-604,8
152	-330,9	-584,5	-470,8	-699,0	-719,7	-566,0	-561,8



Γράφημα 7: Μετρήσεις Δυναμικού E (mV)

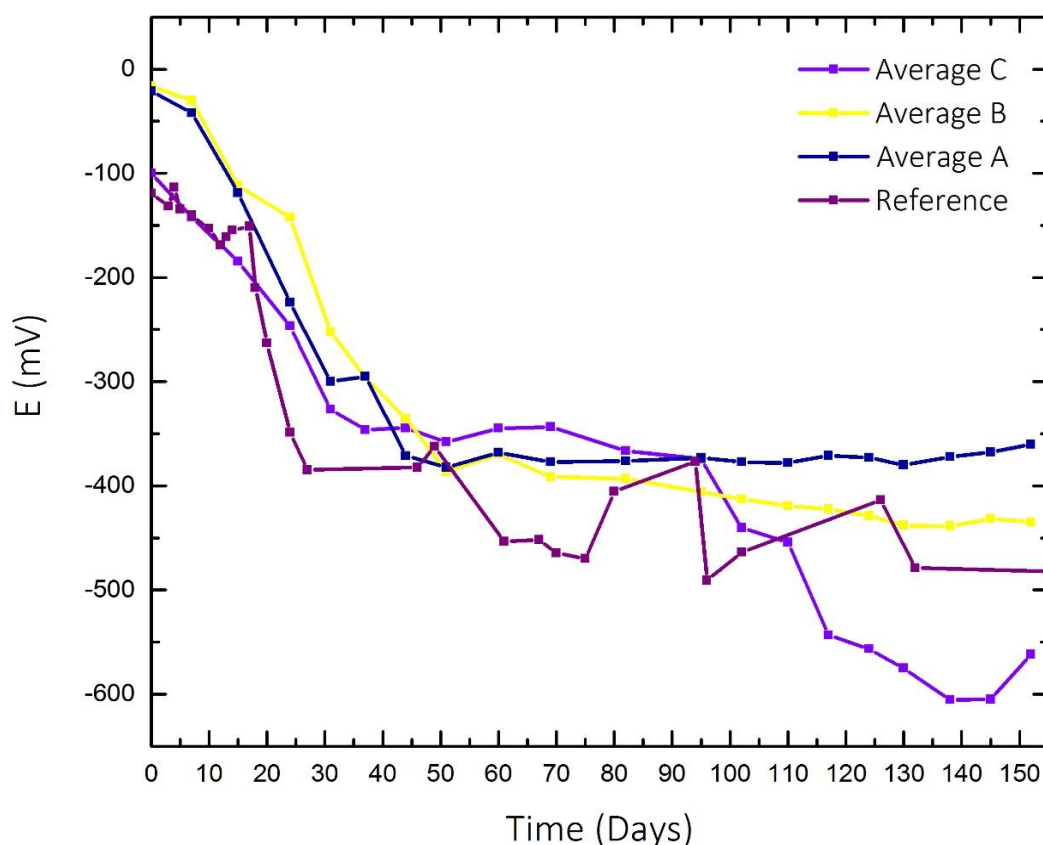


Γράφημα 8: Μέση Τιμή Δυναμικού E (mV)

Παρατηρήσεις

Τα δοκίμια ξεκινάνε από μικρές αρνητικές τιμές, αλλά εντός 30 ημερών κατέρχονται στα -300/-350mV. Από την 100^η-110^η ημερών κατεβαίνει στα -600/-700mV.

- **1^η μέρα** : -99,83mV έως **15^η μέρα**: -184,66mV
Ο σπλισμός φαίνεται να βρίσκεται στην **παθητική κατάσταση** και να μην διαβρώνεται μέχρι και την 14^η μέρα.
- **24^η μέρα**: -246,65mV έως **69^η μέρα**: -343,45mV
Από την 24^η μέρα, σχετικά πολύ σύντομα, το δυναμικό έχει ξεπεράσει το 200mV, επομένως, ο σπλισμός βρίσκεται σε αβέβαιη κατάσταση. Δεν είναι σίγουρο αν διαβρώνεται, και αν αυτό συμβαίνει τότε γίνεται με πολύ αργό ρυθμό. Στην κατάσταση αυτή ο σπλισμός βρίσκεται για 45 ημέρες, μέχρι την 69^η μέρα, όπου το δυναμικό παραμένει μικρότερο των 350mV.
- **82^η μέρα**: -366,33mV έως **152^η μέρα**: -561,86517mV
Από την 82^η μέρα, το δυναμικό έχει ξεπεράσει τα 350mV και δείχνει ανοδική τάση μέχρι και την τελευταία μέτρηση, την 152^η μέρα. Στο σημείο αυτό, ο σπλισμός έχει μεταβεί ήδη στην ενεργή κατάσταση, δηλαδή διαβρώνεται.



Γράφημα 9: Μέση Τιμή Δυναμικού E(mV) για τις 4 ομάδες δοκιμίων

Μερικό Συμπέρασμα 1

Οι τρεις ομάδες δοκιμίων δείχνουν να έχουν περίπου κοινή συμπεριφορά μέχρι και την 110^η μέρα. Από τη μέτρηση αυτή και μετά, μόνο οι ομάδες A και B συνεχίζουν να έχουν κοινή συμπεριφορά, ενώ η ομάδα C παρουσιάζει απότομη αύξηση του δυναμικού.

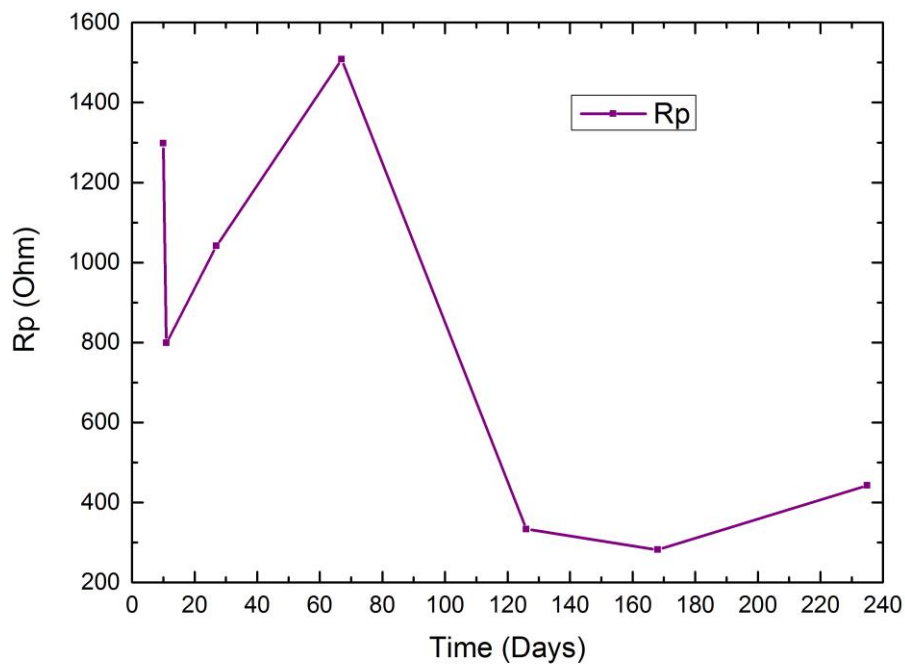
Από το διάγραμμα αυτό είναι φανερό ότι τα δοκίμια με τροποποιημένους ναοσωλήνες άνθρακα έχουν μεγαλύτερη τάση προς διάβρωση σε σύγκριση με αυτά που δεν έχουν τους τροποποιημένους ναοσωλήνες.

6.4.2 Μέτρηση αντίστασης πόλωσης R_p (Ω)

1^η ομάδα δοκιμών (Δοκίμια Αναφοράς)

Πίνακας 21: Μετρήσεις Αντίστασης Πόλωσης $R_p(\Omega)$

Χρόνος (Ημέρες)	Μ.Ο.
10	1298,371
11	799,0344
27	1041,527
67	1508,119
126	333,2869
168	281,7888
235	442,2393

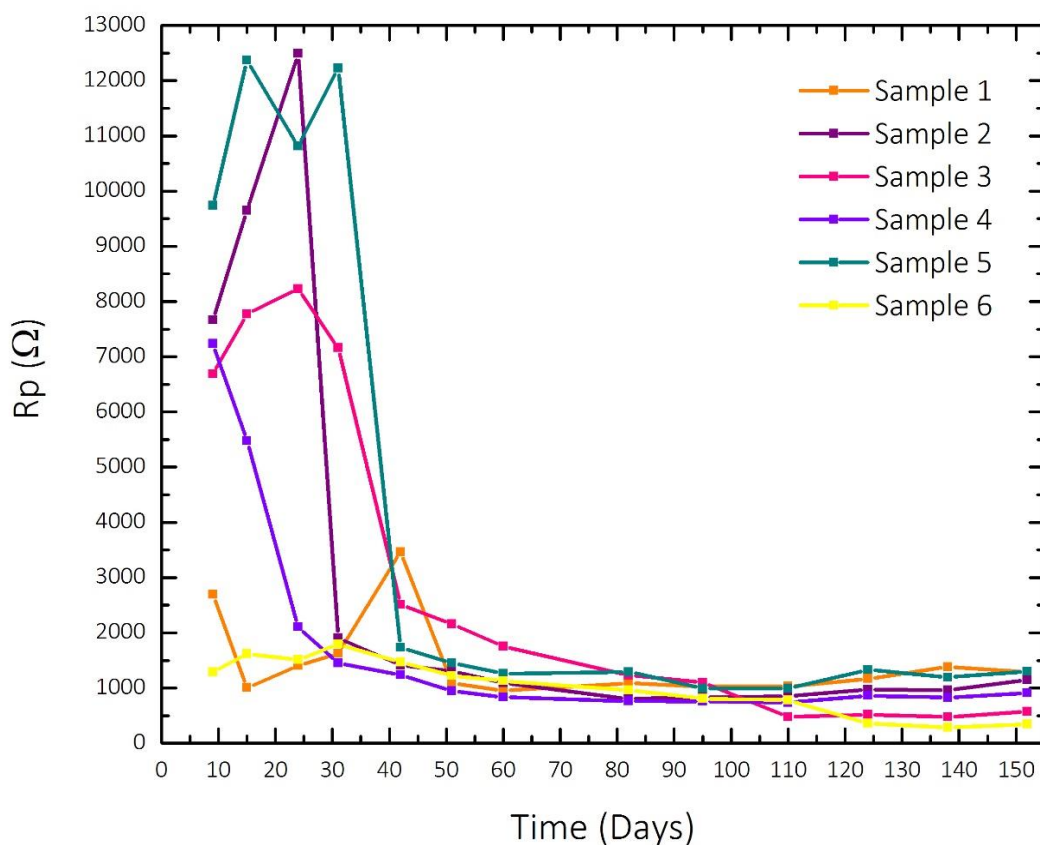


Γράφημα 10: Μετρήσεις Αντίστασης Πόλωσης $R_p(\Omega)$

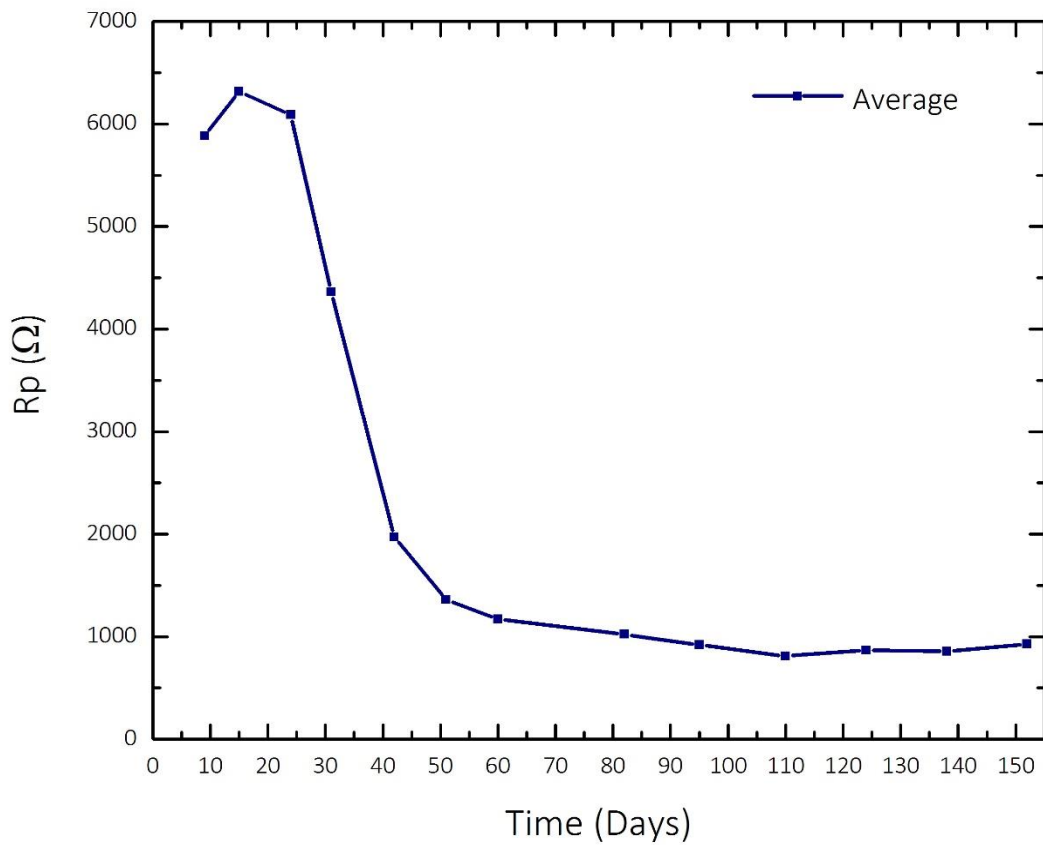
2^η ομάδα δοκιμών (1000C3)

Πίνακας 14: Μετρήσεις Αντίστασης Πόλωσης $R_p(\Omega)$

Χρόνος (Ημέρες)	1 ^ο	2 ^ο	3 ^ο	4 ^ο	5 ^ο	6 ^ο	M.O.
9	2690,270	7668,19	6685,402	7240,711	9735,303	1291,813	5885,281
15	1006,810	9646,803	7774,327	5478,702	12368,549	1619,663	6315,809
24	1404,795	12487,918	8229,873	2105,139	10810,394	1511,442	6091,593
31	1627,608	1911,869	7162,941	1453,497	12222,746	1791,633	4361,715
42	3463,873	1414,559	2510,113	1236,983	1734,524	1467,386	1971,239
51	1085,302	1304,037	2162,370	944,421	1452,871	1221,854	1361,809
60	952,523	1088,417	1752,851	833,641	1261,952	1127,306	1169,448
82	1087,862	803,812	1230,536	760,791	1291,508	959,219	1022,288
95	1027,976	830,844	1102,030	756,813	996,136	808,028	920,304
110	1030,536	848,313	476,657	735,143	994,040	781,685	811,062
124	1165,500	972,322	519,682	859,855	1331,186	360,563	868,184
138	1384,339	961,932	476,889	829,164	1191,776	286,469	855,094
152	1293,105	1146,716	576,826	910,743	1300,397	344,913	928,783



Γράφημα 11: Μετρήσεις Αντίστασης Πόλωσης $R_p(\Omega)$



Γράφημα 12: Μέση Τιμή Αντίστασης Πόλωσης $R_p(\Omega)$

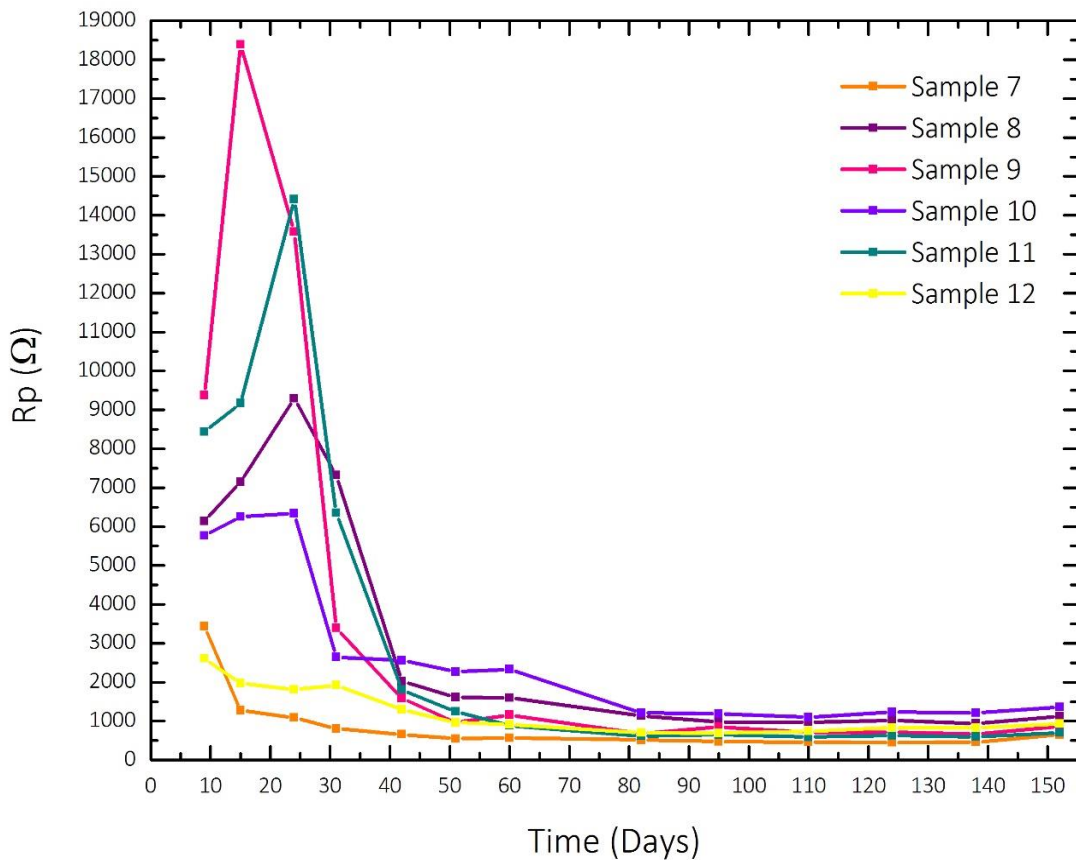
Παρατηρήσεις

Παρατηρείται ότι η μέση τιμή της αντίστασης πόλωσης για την 1^η ομάδα δοκιμών αυξάνεται ως την 15^η μέρα, φτάνοντας στα 6315,809Ω, στη συνέχεια μειώνεται σταδιακά. Από την 110^η μέρα έως την 95^η μέρα παρατηρούνται μικρής τάξεως αυξομειώσεις.

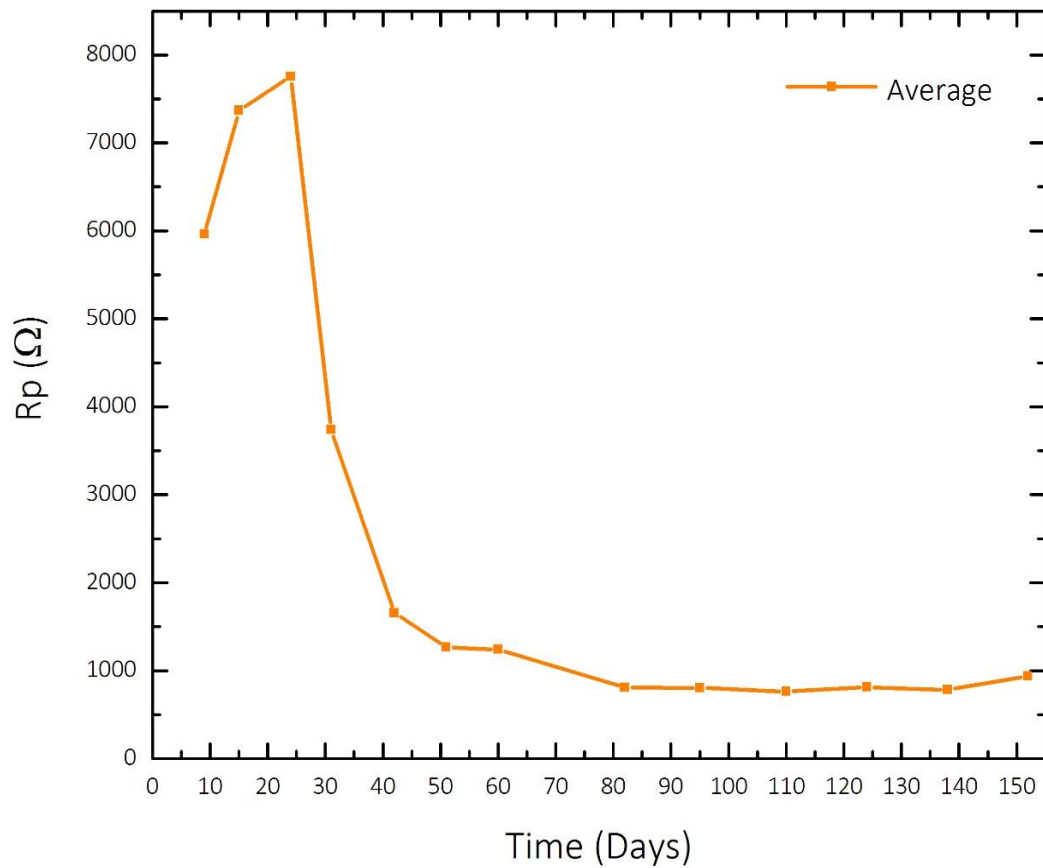
3^η ομάδα δοκιμών (1000F με διασπορά)

Πίνακας 13: Μετρήσεις Αντίστασης Πόλωσης $R_p(\Omega)$

Χρόνος (Ημέρες)	7°	8°	9°	10°	11°	12°	M.O.
9	3435,716	6144,527	9378,191	5769,664	8442,667	2607,526	5963,049
15	1273,586	7146,059	18384,753	6258,557	9167,243	1973,619	7367,303
24	1090,000	9298,829	13577,934	6338,107	14413,589	1810,424	7754,814
31	808,409	7321,865	3395,373	2648,748	6348,596	1926,305	3741,549
42	656,448	2026,096	1584,345	2563,774	1805,033	1299,959	1655,943
51	547,645	1606,443	964,617	2271,716	1239,839	965,577	1265,973
60	569,366	1595,489	1161,364	2327,334	886,062	912,609	1242,037
82	515,867	1137,667	672,226	1217,344	614,843	703,261	810,201
95	472,581	974,138	849,052	1187,000	652,798	693,143	804,785
110	459,667	970,776	710,415	1100,444	590,909	742,046	762,376
124	448,189	1017,418	713,550	1233,723	632,248	827,857	812,164
138	457,970	939,577	666,707	1212,476	600,486	826,344	783,926
152	654,938	1124,627	859,531	1356,223	698,317	935,750	938,231



Γράφημα 13: Μετρήσεις Αντίστασης Πόλωσης $R_p(\Omega)$



Γράφημα 14: Μέση Τιμή Αντίστασης Πόλωσης $R_p(\Omega)$

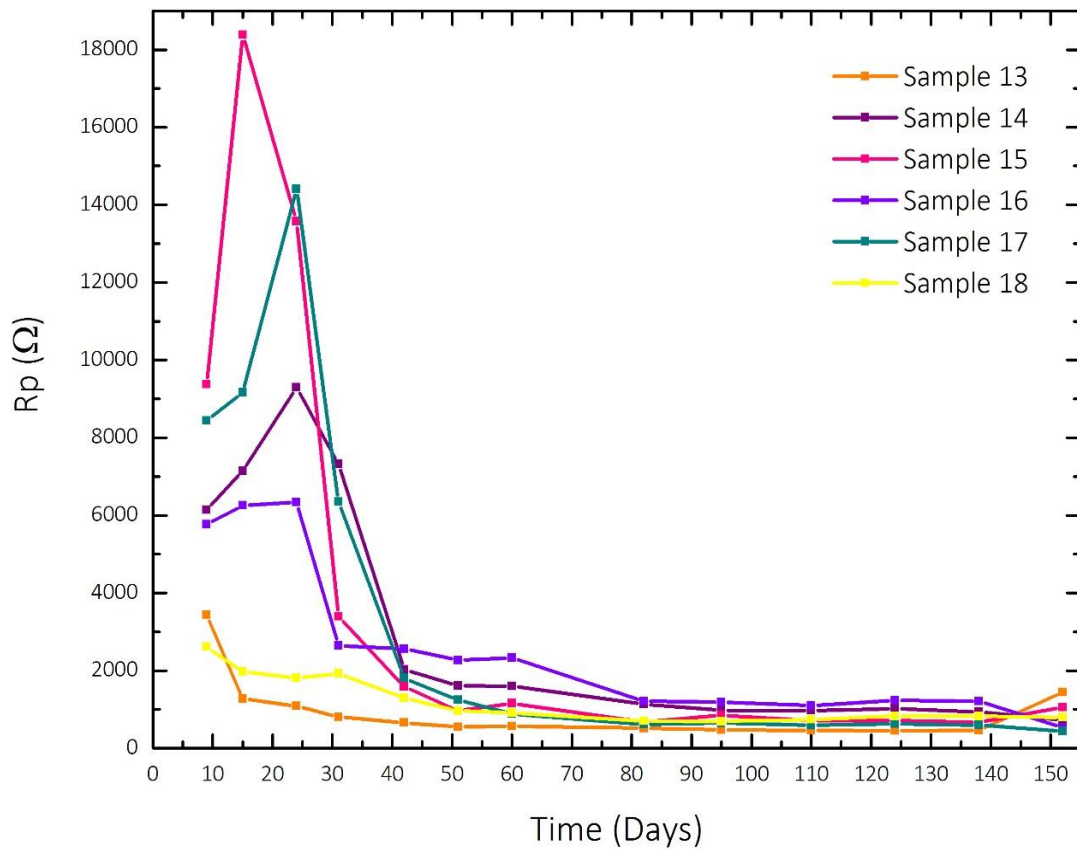
Παρατηρήσεις

Παρατηρείται ότι η μέση τιμή της αντίστασης πόλωσης για την 2^η ομάδα δοκιμών αυξάνεται ως την 24^η μέρα, φτάνοντας στα 7754,814Ω, στη συνέχεια μειώνεται σταδιακά. Από την 110^η μέρα έως την 95^η μέρα παρατηρούνται μικρής τάξεως αυξομειώσεις.

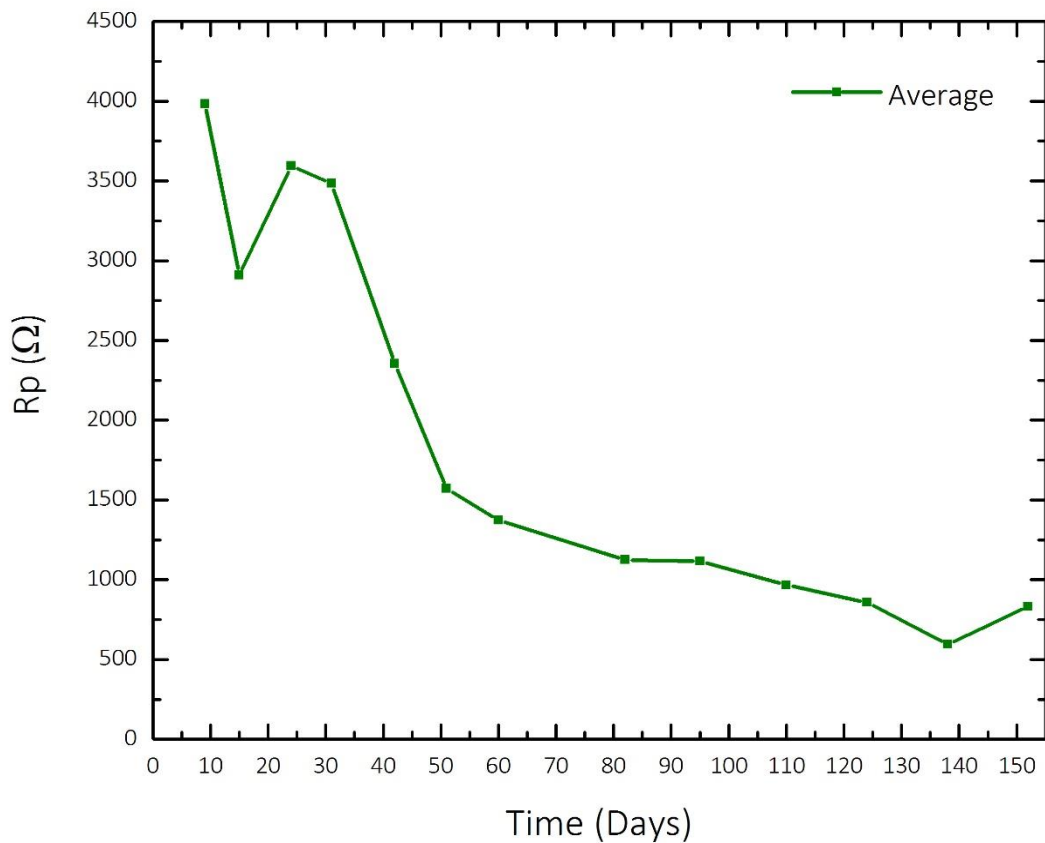
4^η ομάδα δοκιμών (1000F χωρίς διασπορά)

Πίνακας 16: Μετρήσεις Αντίστασης Πόλωσης $R_p(\Omega)$

Χρόνος (Ημέρες)	13°	14°	15°	16°	17°	18°	M.O.
9	3435,716	6144,527	9378,191	5769,664	8442,667	2607,526	3983,740
15	1273,586	7146,059	18384,753	6258,557	9167,243	1973,619	2910,367
24	1090,000	9298,829	13577,934	6338,107	14413,589	1810,424	3595,008
31	808,409	7321,865	3395,373	2648,748	6348,596	1926,305	3485,799
42	656,448	2026,096	1584,345	2563,774	1805,033	1299,959	2353,789
51	547,645	1606,443	964,617	2271,716	1239,839	965,577	1570,788
60	569,366	1595,489	1161,364	2327,334	886,062	912,609	1373,644
82	515,867	1137,667	672,226	1217,344	614,843	703,261	1123,690
95	472,581	974,138	849,052	1187,000	652,798	693,143	1116,533
110	459,667	970,776	710,415	1100,444	590,909	742,046	966,706
124	448,189	1017,418	713,550	1233,723	632,248	827,857	858,420
138	457,970	939,577	666,707	1212,476	600,486	826,344	594,280
152	1443,414	730,049	1055,743	538,906	437,395	792,783	833,048



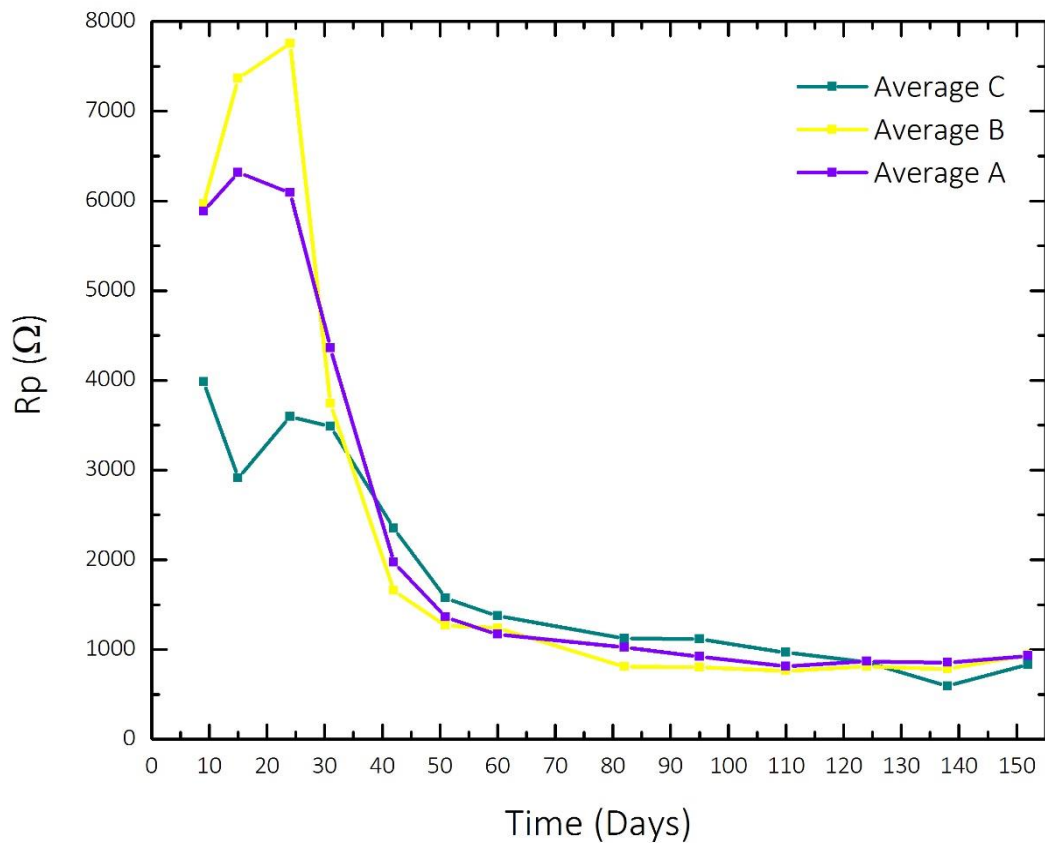
Γράφημα 15: Μετρήσεις Αντίστασης Πόλωσης $R_p(\Omega)$



Γράφημα 16: Μέση Τιμή Αντίστασης Πόλωσης $R_p(\Omega)$

Παρατηρήσεις

Παρατηρείται ότι η μέση τιμή της αντίστασης πόλωσης για την 3^η ομάδα δοκιμών μειώνεται αρχικά ως την 15^η μέρα, φτάνοντας στα 2910,367Ω. Στη συνέχεια, παρατηρείται μία αύξηση την 24^η μέρα, φτάνοντας τα 3595,008Ω. Από το σημείο αυτό, παρατηρείται πάλι μείωση της αντίστασης πόλωσης, φτάνοντας την 138^η μέρα τα 594,280Ω. Παρατηρείται όμως, την 152^η μέρα, μία αύξηση πάλι στα 833,048Ω.



Γράφημα 17: Μέση Τιμή Αντίστασης Πόλωσης $R_p(\Omega)$ για τις 4 ομάδες δοκιμών

Μερικό Συμπέρασμα 2

Στις δύο πρώτες ομάδες δοκιμών, παρατηρείται αρχικά μια αύξηση της αντίστασης πόλωσης, ενώ στη συνέχεια μειώνεται δραστικά, με μία τάση προς σταθεροποίηση από 95^η μέρα για την 1^η ομάδα και από την 82^η μέρα για τη 2^η ομάδα. Αντίθετα, η 3^η ομάδα δοκιμών παρουσιάζει κάποιες αυξομειώσεις μέχρι την 24^η μέρα, ενώ στη συνέχεια μειώνεται συνεχώς, χωρίς να παρουσιάζει τάση για σταθεροποίηση.

6.4.3 Μέτρηση Ρεύματος Διάβρωσης I_{corr}

Για τη μέτρηση του ρεύματος διάβρωσης I_{corr} , χρησιμοποιήθηκε ο τύπος

$$R_p = B / I_{corr}$$

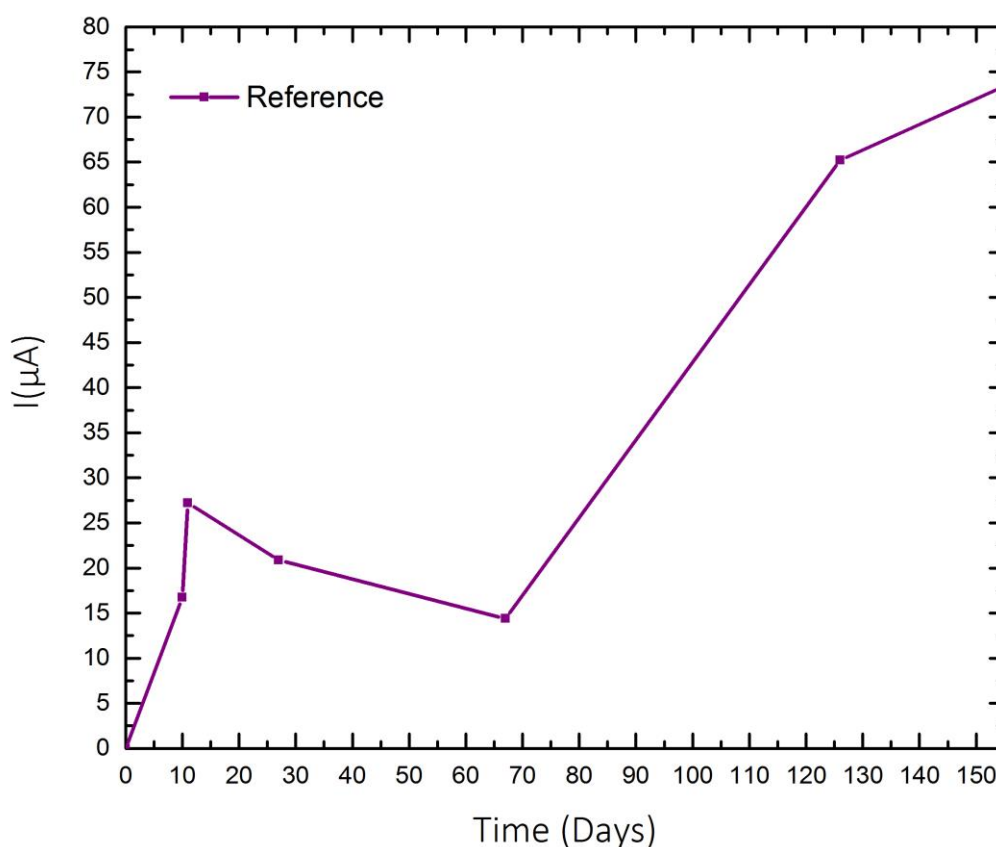
$$\text{όπου } B = \beta_a \cdot \beta_c / 2,3(\beta_a + \beta_c)$$

Επειδή το οξειδωτικό της αντίδρασης είναι το οξυγόνο, δε μπορεί να προσδιοριστεί ο καθοδικός συντελεστής β_c . Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιούμε και για τους δύο συντελεστές την τιμή 0,1. [50]

1^η ομάδα δοκιμών (Δοκίμια Αναφοράς)

Πίνακας 17: Υπολογισμός Ρεύματος Διάβρωσης I_{corr} (μA)

Χρόνος (Ημέρες)	Μ.Ο.
10	16,743
11	27,206
27	20,872
67	14,414
126	65,226
168	77,146
235	49,156

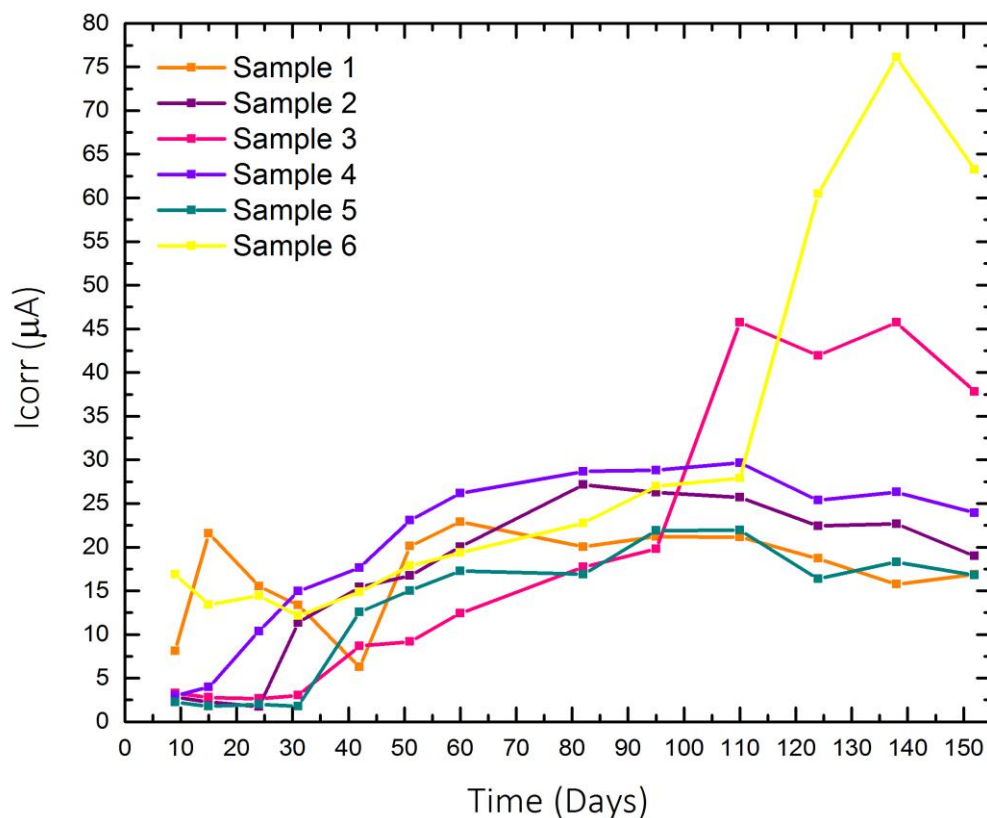


Γράφημα 18: Υπολογισμός Ρεύματος Διάβρωσης I_{corr} (μA)

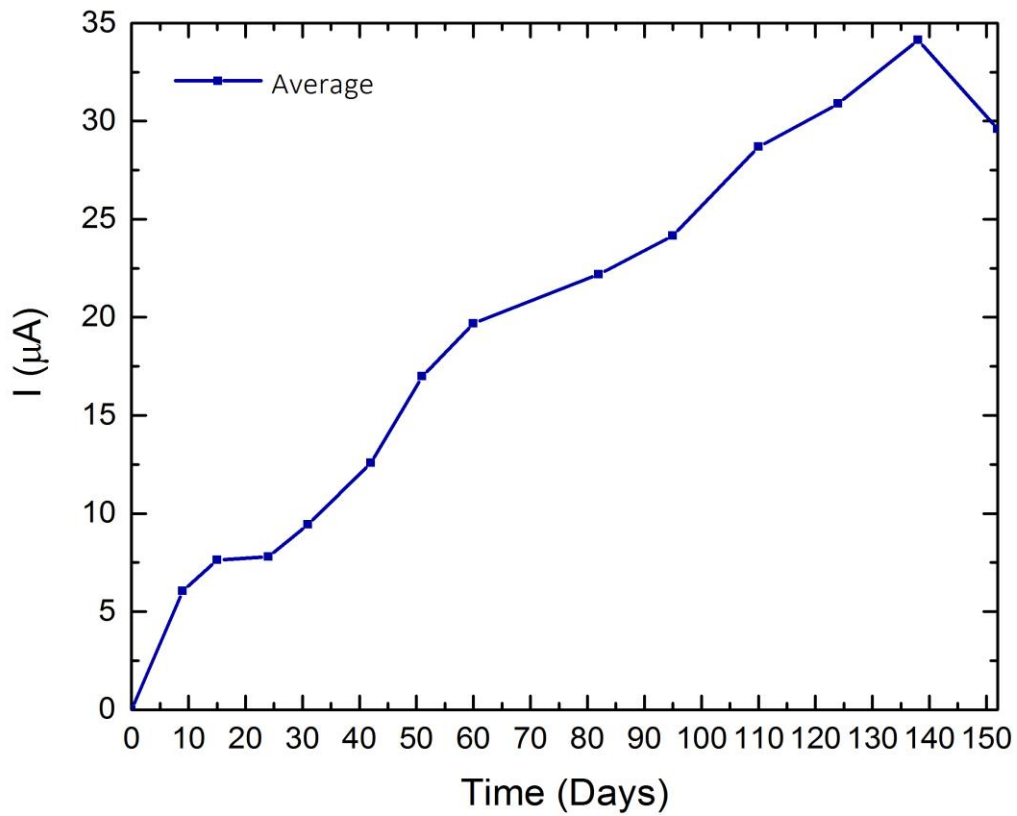
2^η ομάδα δοκιμών (1000C3)

Πίνακας 18: Υπολογισμός Ρεύματος Διάθρωσης I_{corr} (μA)

Χρόνος (Ημέρες)	1 ^ο	2 ^ο	3 ^ο	4 ^ο	5 ^ο	6 ^ο	M.O.
9	8,105	2,844	3,262	3,010	2,238	16,879	6,056
15	21,590	2,252	2,794	3,967	1,757	13,413	7,629
24	15,521	1,745	2,648	10,358	2,016	14,426	7,786
31	13,358	11,356	3,034	14,960	1,778	12,129	9,438
42	6,295	15,413	8,687	17,629	12,571	14,859	12,576
51	20,094	16,721	9,164	23,086	15,007	17,850	16,987
60	22,899	20,026	12,438	26,163	17,272	19,346	19,690
82	20,043	27,132	17,714	28,662	16,882	22,729	22,193
95	21,216	26,248	19,788	28,815	21,896	26,979	24,157
110	21,165	25,704	45,747	29,665	21,930	27,897	28,684
124	18,700	22,423	41,956	25,364	16,379	60,469	30,881
138	15,750	22,661	45,730	26,299	18,292	76,109	34,140
152	16,862	18,989	37,808	23,936	16,767	63,223	29,597



Γράφημα 19: Υπολογισμός Ρεύματος Διάθρωσης I_{corr} (μA)



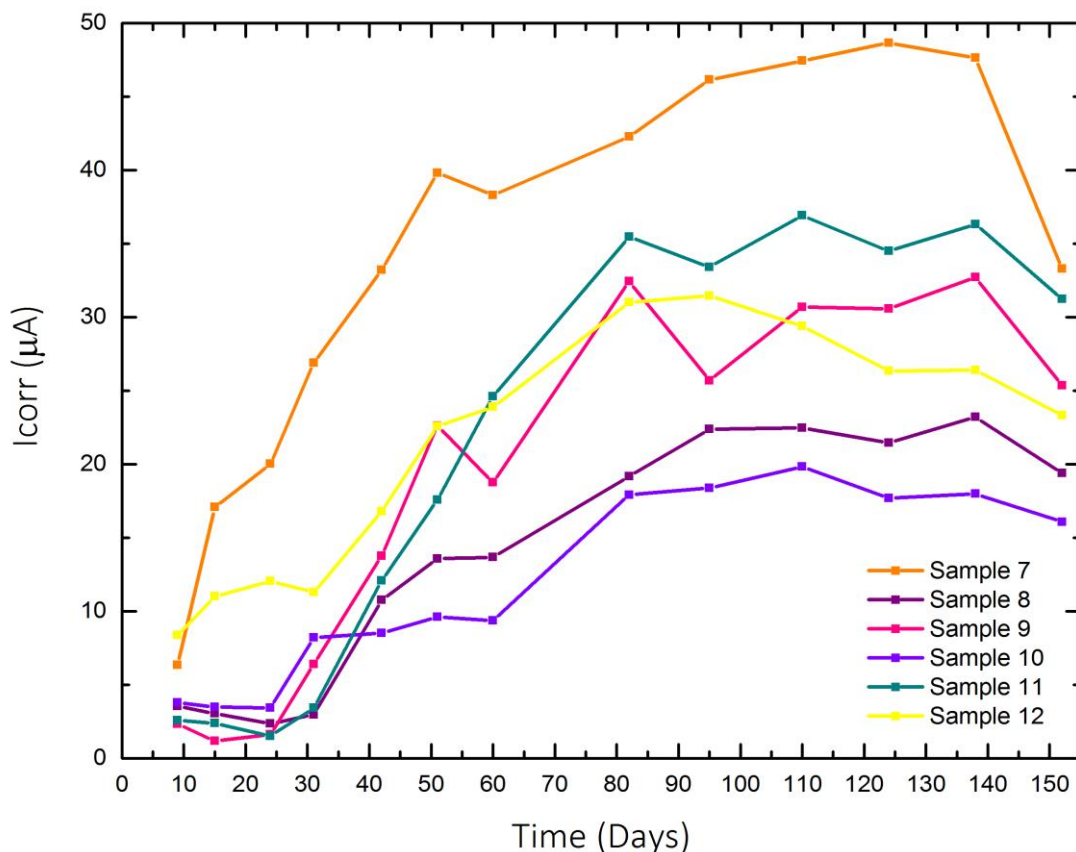
Γράφημα 20: Μέση Τιμή Ρεύματος Διάβρωσης I_{corr} (μA)

Παρατηρήσεις

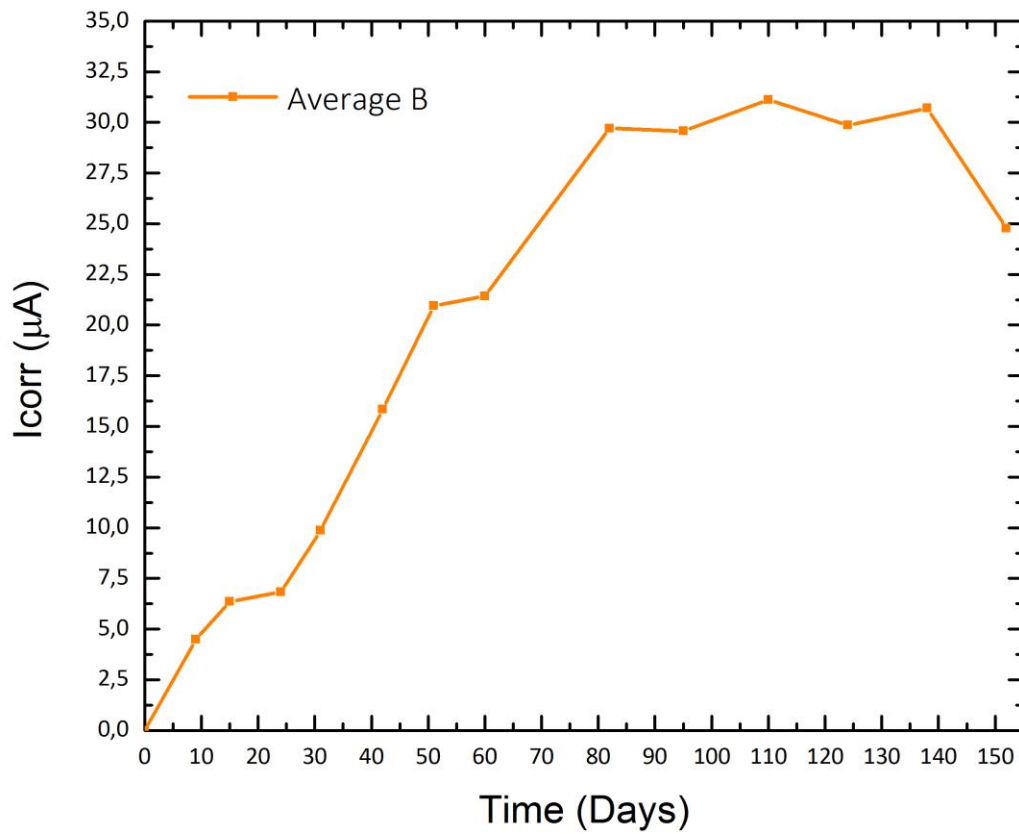
Παρατηρούμε ότι γενικά, υπάρχει μεγάλη διακύμανση των τιμών, οποία δυσχεραίνει μετά την 100^η μέρα έκθεσης.

Πίνακας 19: Υπολογισμός Ρεύματος Διάβρωσης I_{corr} (μA)

Χρόνος (Ημέρες)	7°	8°	9°	10°	11°	12°	M.O.
9	6,346	3,547	2,325	3,779	2,582	8,362	4,490
15	17,069	3,041	1,181	3,473	2,369	11,009	6,358
24	20,009	2,344	1,605	3,440	1,512	12,044	6,826
31	26,888	2,968	6,402	8,205	3,423	11,289	9,863
42	33,218	10,761	13,763	8,505	12,080	16,773	15,850
51	39,814	13,572	22,610	9,598	17,578	22,576	20,958
60	38,301	13,666	18,768	9,368	24,616	23,885	21,434
82	42,262	19,159	32,436	17,918	35,462	31,008	29,707
95	46,138	22,389	25,687	18,377	33,405	31,450	29,574
110	47,430	22,457	30,685	19,822	36,907	29,376	31,112
124	48,654	21,437	30,566	17,680	34,493	26,333	29,860
138	47,617	23,205	32,708	17,986	36,312	26,384	30,702
152	33,286	19,380	25,364	16,076	31,229	23,307	24,773



Γράφημα 21: Υπολογισμός Ρεύματος Διάβρωσης I_{corr} (μA)



Γράφημα 22: Μέση Τιμή Ρεύματος Διάβρωσης I_{corr}(μA)

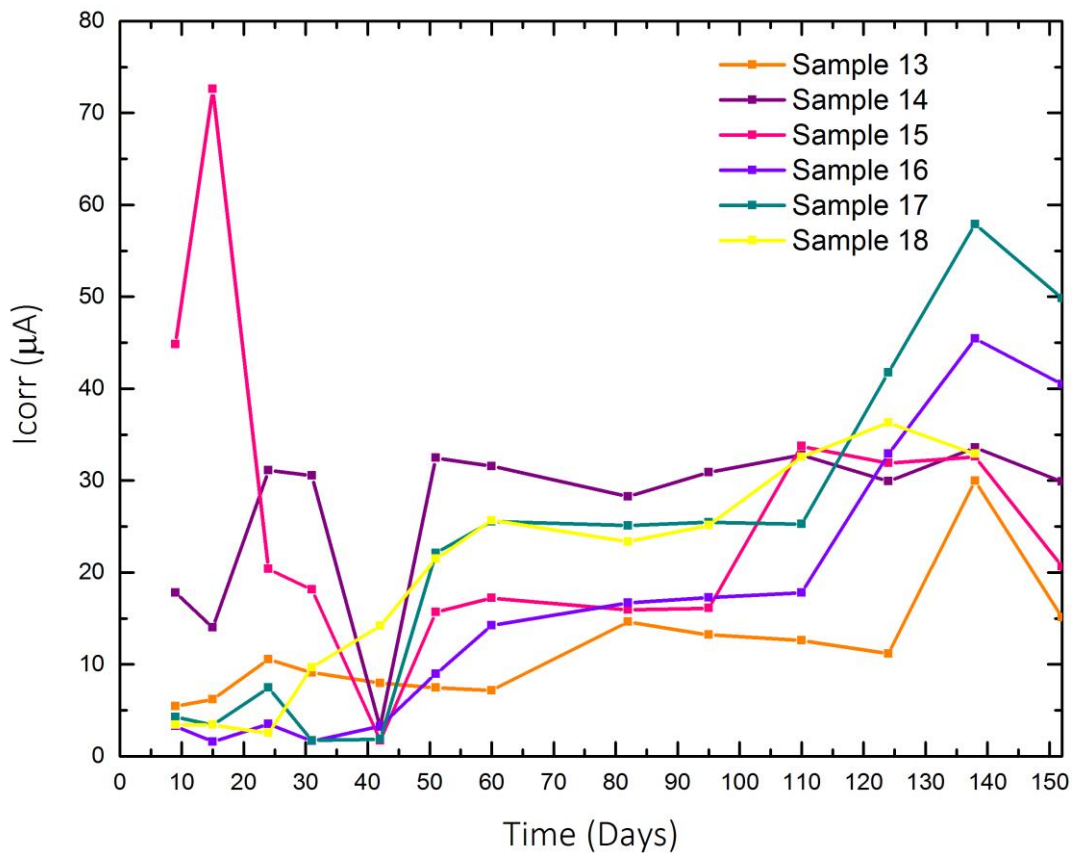
Παρατηρήσεις

Τα δοκίμια αυτά εμφανίζουν μεγάλη διασπορά τιμών, αρκετά μεγαλύτερη από τα δοκίμια χωρίς τροποποιημένους νανοσωλήνες.

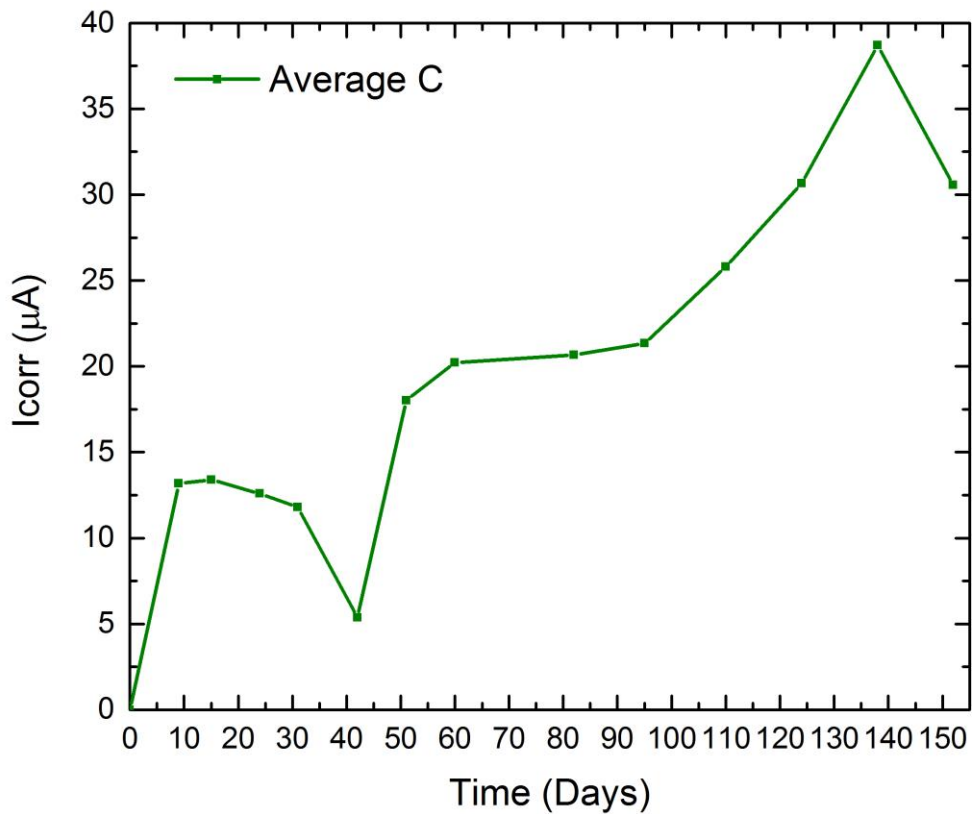
4^η ομάδα δοκιμών (1000F χωρίς διασπορά)

Πίνακας 20: Υπολογισμός Ρεύματος Διάβρωσης I_{corr} (μA)

Χρόνος (Ημέρες)	13°	14°	15°	16°	17°	18°	M.O.
9	5,455	17,799	44,829	3,269	4,267	3,400	13,169
15	6,194	13,999	72,618	1,591	3,400	3,400	13,401
24	10,550	31,110	20,383	3,508	7,442	2,538	12,588
31	9,108	30,532	18,139	1,657	1,713	9,673	11,805
42	7,952	3,184	1,723	3,243	1,864	14,167	5,356
51	7,442	32,453	15,672	8,974	22,100	21,471	18,018
60	7,155	31,569	17,204	14,217	25,534	25,670	20,224
82	14,616	28,271	15,927	16,673	25,109	23,341	20,656
95	13,202	30,906	16,099	17,255	25,449	25,126	21,339
110	12,598	32,776	33,728	17,799	25,262	32,572	25,789
124	11,174	29,903	31,892	32,895	41,735	36,278	30,646
138	29,954	33,558	32,589	45,441	57,885	32,912	38,723
152	15,106	29,869	20,655	3,269	49,844	27,506	30,573



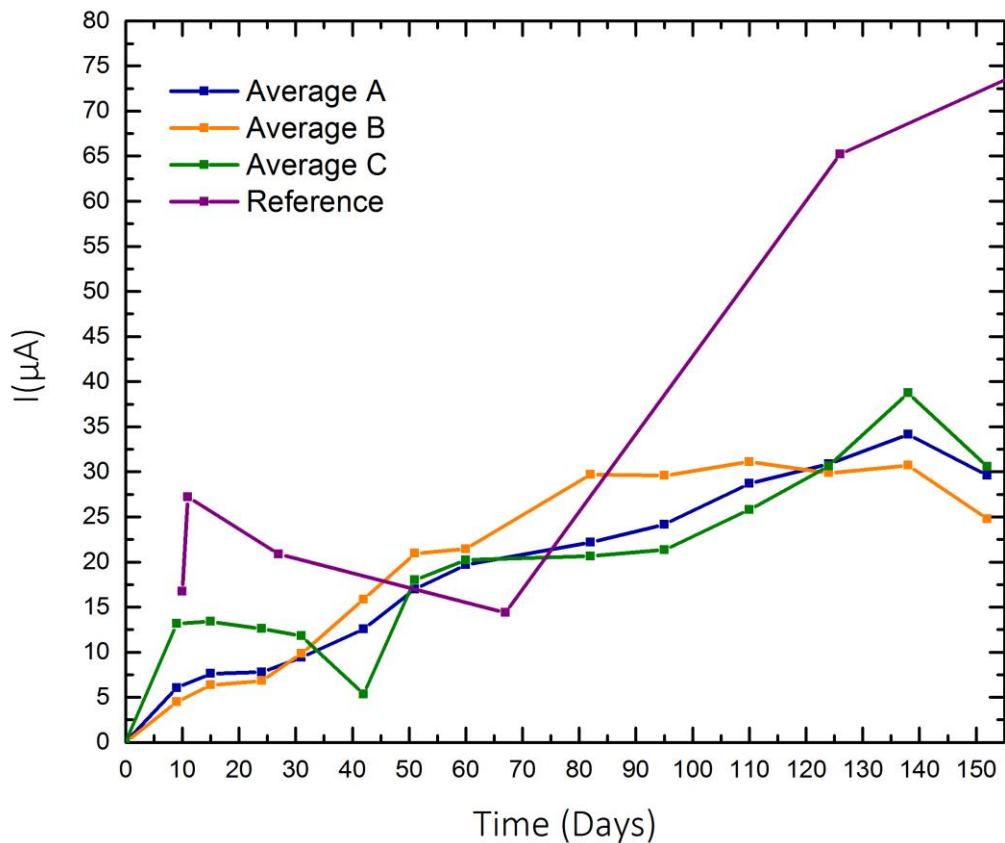
Γράφημα 23: Υπολογισμός Ρεύματος Διάβρωσης I_{corr} (μA)



Γράφημα 24: Μέση Τιμή Ρεύματος Διάβρωσης I_{corr}(μA)

Παρατηρήσεις

Υπάρχει διακύμανση των τιμών του I_{corr}, αλλά παρουσιάζει τη μικρότερη διασπορά σε σύγκριση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες.



Γράφημα 25: Μέση Τιμή Ρεύματος Διάβρωσης I_{corr} (μA) για τις 4 ομάδες δοκιμίων

Μερικό Συμπέρασμα 3

Λόγω των έντονων διακυμάνσεων του I_{corr} δεν είναι δυνατόν να βγουν κάποια συμπεράσματα και γι' αυτό το λόγο θα προχωρήσουμε σε διαγράμματα ηλεκτροχημικής (θεωρητικής) απώλειας μάζας.

6.4.4. Μέτρηση απώλειας μάζας

Η απώλεια μάζας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$m = \frac{MIt}{zF}$$

Όπου:

m: η μάζα του μετάλλου που καταναλώνεται,

I: ηλεκτρικό ρεύμα (A),

t: χρόνος (s),

F: σταθερά Faraday (A s ή Cb/mol)

z: αριθμός ανταλλασσόμενων ηλεκτρονίων ($z=2$ για την αντίδραση $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$)

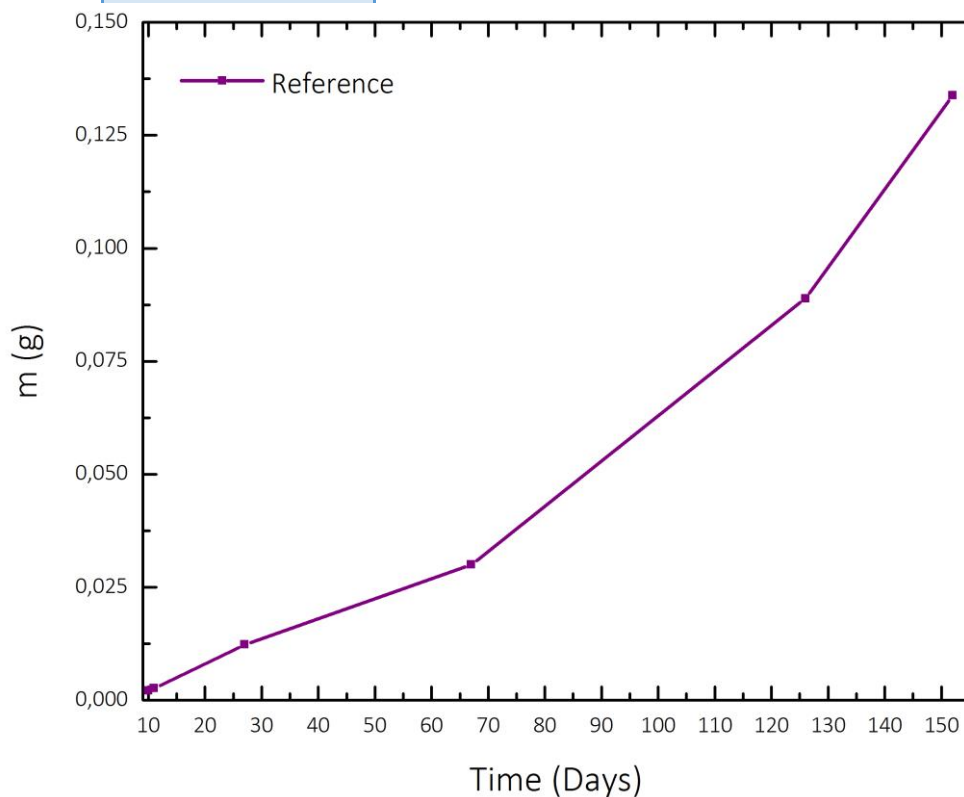
M: Ατομικό βάρος μετάλλου (56 g για το Fe).

1^η ομάδα δοκιμίων (Δοκίμια Αναφοράς)

Πίνακας 21: Θεωρητικός Υπολογισμός Ηλεκτροχημικής Απώλειας Μάζας (g)

Χρόνος (Ημέρες)	Απώλεια Μάζας m(g)
3	0
10	0,00211
11	0,00264

27	0,01230
67	0,02999
126	0,08892
168	0,13379

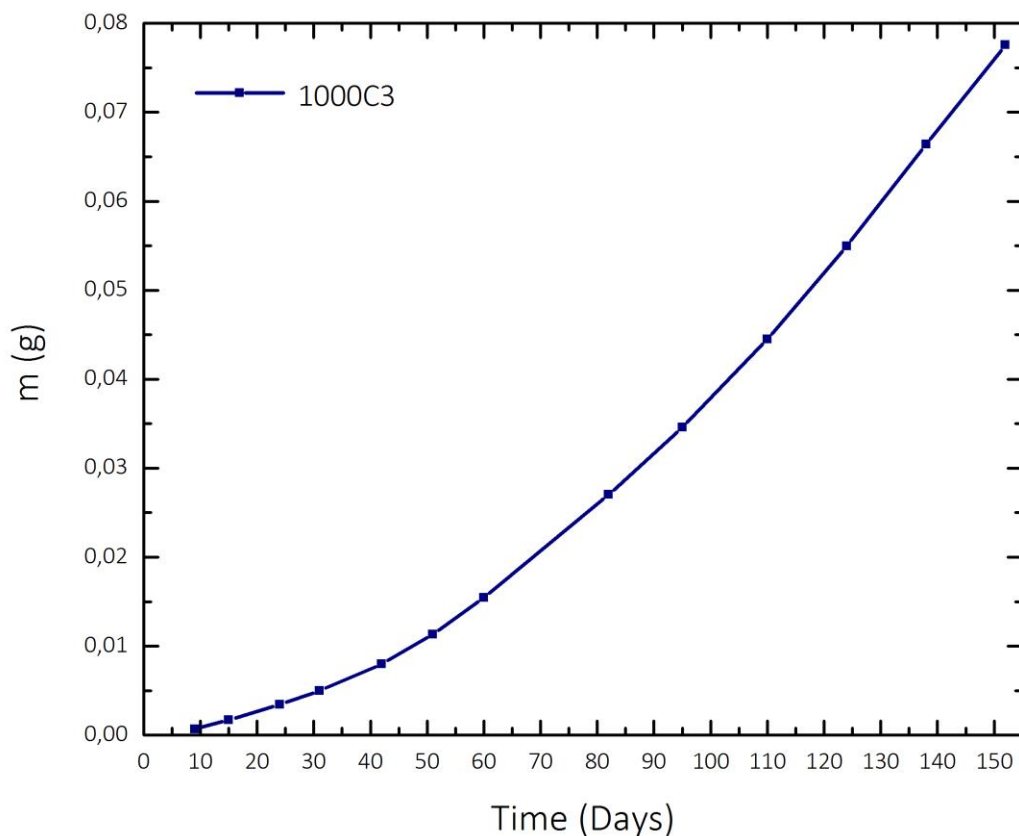


Γράφημα 26: Μέση Τιμή Απώλειας Μάζας(g)

2^η ομάδα δοκιμών (1000C3)

Πίνακας 22: Θεωρητικός Υπολογισμός Ηλεκτροχημικής Απώλειας Μάζας (g)

Χρόνος (Ημέρες)	Χρόνος (sec)	M(g)	I*t (μΑ*day)	Z	F (As)	μΑ σε Α	Απώλεια Μάζας m(g)
9	86400	56	27,357	2	96485	1,00E-06	0,00068
15	86400	56	68,438	2	96485	1,00E-06	0,00172
24	86400	56	137,657	2	96485	1,00E-06	0,00345
31	86400	56	197,982	2	96485	1,00E-06	0,00496
42	86400	56	318,958	2	96485	1,00E-06	0,00800
51	86400	56	452,242	2	96485	1,00E-06	0,01134
60	86400	56	616,914	2	96485	1,00E-06	0,01547
82	86400	56	1078,068	2	96485	1,00E-06	0,02703
95	86400	56	1379,452	2	96485	1,00E-06	0,03459
110	86400	56	1775,198	2	96485	1,00E-06	0,04451
124	86400	56	2192,44	2	96485	1,00E-06	0,05497
138	86400	56	2647,923	2	96485	1,00E-06	0,06639
152	86400	56	3093,226	2	96485	1,00E-06	0,07756

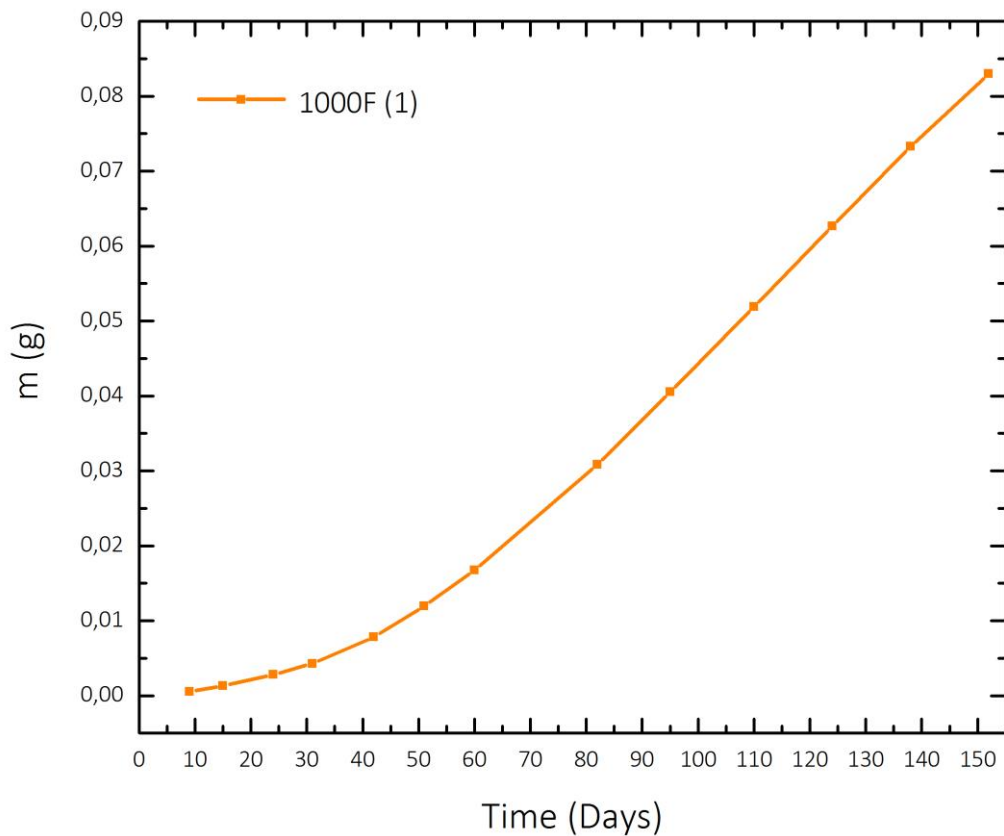


Γράφημα 27: Μέση Τιμή Απώλειας Μάζας(g)

3^η ομάδα δοκιμών (1000F με διασπορά)

Πίνακας 29: Θεωρητικός Υπολογισμός Ηλεκτροχημικής Απώλειας Μάζας (g)

Χρόνος (Ημέρες)	Χρόνος (sec)	M(g)	I*t (μA*day)	Z	F (As)	μA σε A	Απώλεια Μάζας m(g)
9	86400	56	20,283	2	96485	1,00E-06	0,00050
15	86400	56	52,852	2	96485	1,00E-06	0,00133
24	86400	56	112,050	2	96485	1,00E-06	0,00281
31	86400	56	170,498	2	96485	1,00E-06	0,00427
42	86400	56	311,792	2	96485	1,00E-06	0,00782
51	86400	56	477,739	2	96485	1,00E-06	0,01198
60	86400	56	668,071	2	96485	1,00E-06	0,01675
82	86400	56	1231,137	2	96485	1,00E-06	0,03087
95	86400	56	1616,575	2	96485	1,00E-06	0,04053
110	86400	56	2071,074	2	96485	1,00E-06	0,05193
124	86400	56	2498,186	2	96485	1,00E-06	0,06264
138	86400	56	2922,419	2	96485	1,00E-06	0,07327
152	86400	56	3310,008	2	96485	1,00E-06	0,08299

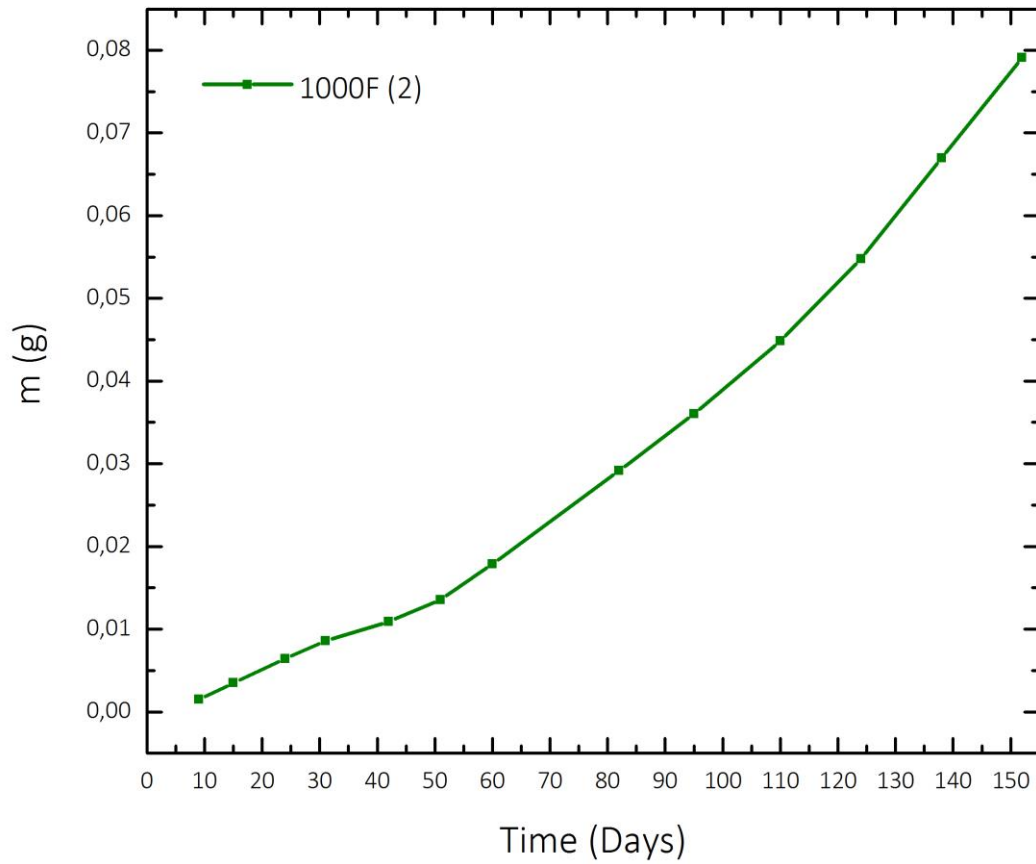


Γράφημα 28: Μέση Τιμή Απώλειας Μάζας(g)

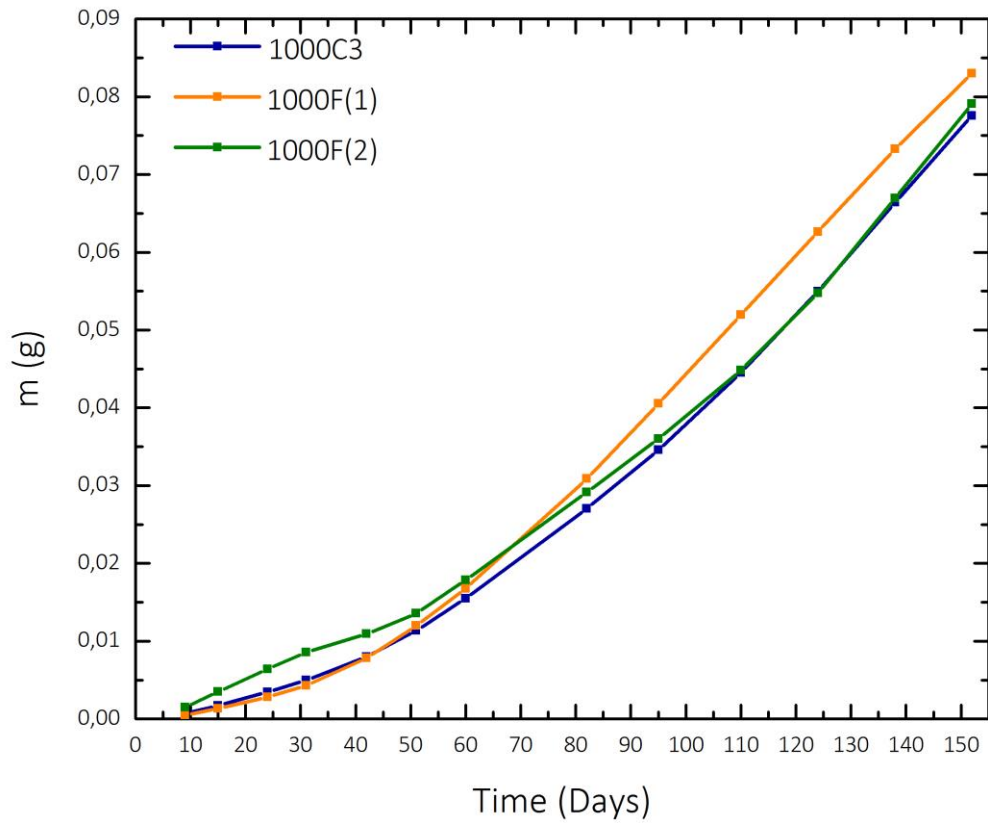
4^η ομάδα δοκιμών (1000F χωρίς διασπορά)

Πίνακας 24: Θεωρητικός Υπολογισμός Ηλεκτροχημικής Απώλειας Μάζας (g)

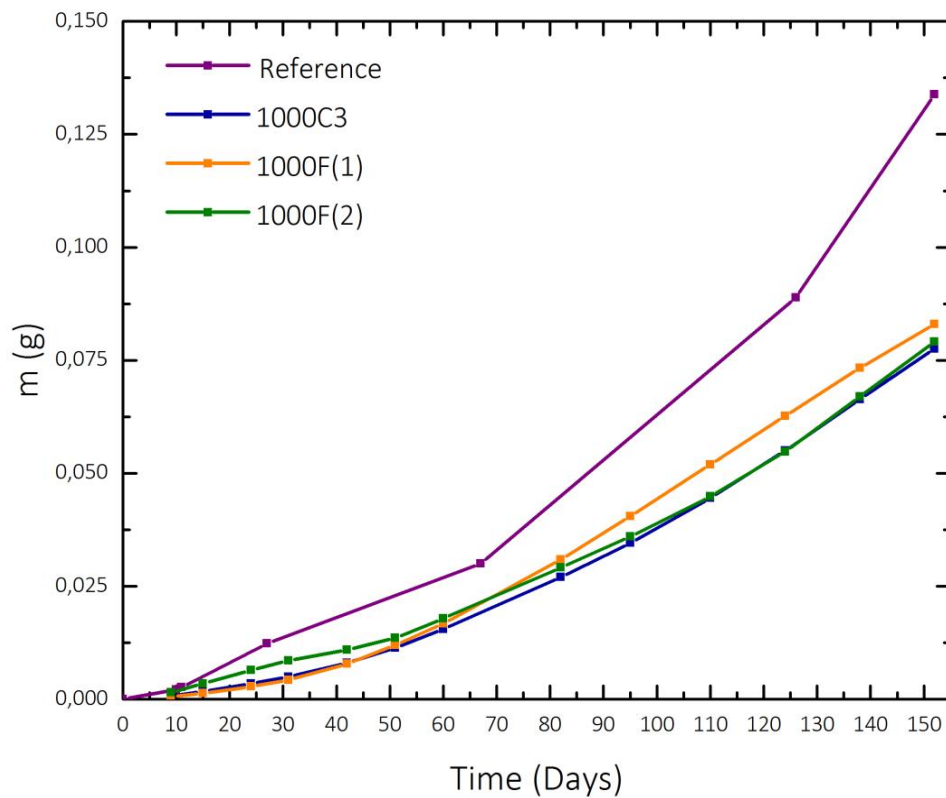
Χρόνος (Ημέρες)	Χρόνος (sec)	M(g)	I*t (μΑ*day)	Z	F (As)	μΑ σε Α	Απώλεια Μάζας m(g)
9	86400	56	59,486	2	96485	1,00E-06	0,00149
15	86400	56	139,187	2	96485	1,00E-06	0,00349
24	86400	56	255,873	2	96485	1,00E-06	0,00642
31	86400	56	341,315	2	96485	1,00E-06	0,00856
42	86400	56	435,662	2	96485	1,00E-06	0,01092
51	86400	56	541,046	2	96485	1,00E-06	0,01357
60	86400	56	712,748	2	96485	1,00E-06	0,01787
82	86400	56	1162,860	2	96485	1,00E-06	0,02916
95	86400	56	1435,916	2	96485	1,00E-06	0,03600
110	86400	56	1788,878	2	96485	1,00E-06	0,04485
124	86400	56	2184,174	2	96485	1,00E-06	0,05476
138	86400	56	2670,132	2	96485	1,00E-06	0,06695
152	86400	56	3154,284	2	96485	1,00E-06	0,07909



Γράφημα 29: Μέση Τιμή Απώλειας Μάζας(g)

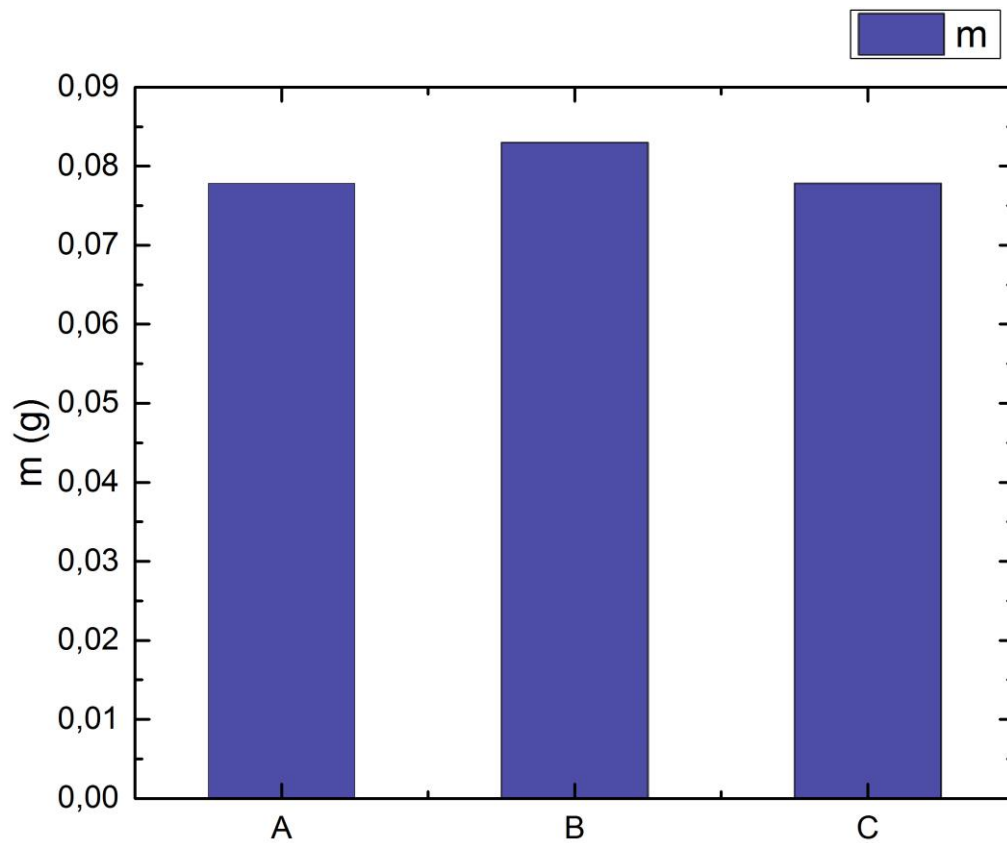


Γράφημα 30: Μέση Τιμή Απώλειας Μάζας(g) για τις 3 ομάδες δοκιμίων



Γράφημα 31: Μέση Τιμή Απώλειας Μάζας(g) για τις 4 ομάδες δοκιμών

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα αυτό, και οι τρεις κατηγορίες δοκιμών δίνουν παραπλήσιες τιμές απώλειας μάζας. Μπορούμε να πούμε ότι τα δοκίμια με τους μη τροποποιημένους ναυσοωλήνες εμφανίζουν μια κάποια υπεροχή.

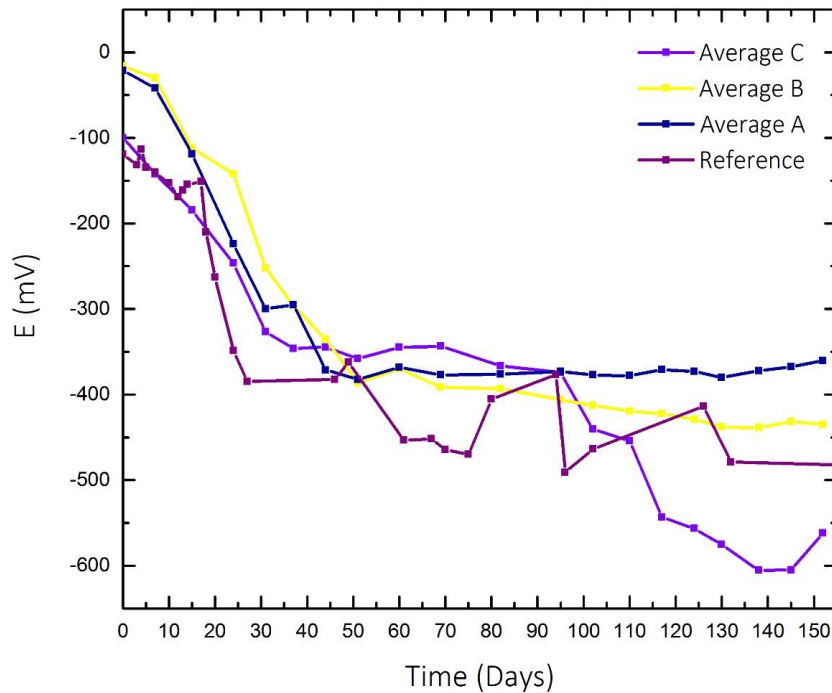


Γράφημα 32: Μέση Τιμή Απώλειας Μάζας για τις 3 ομάδες δοκιμίων με προσθήκη νανοσωλήνων

Μερικό Συμπέρασμα 4

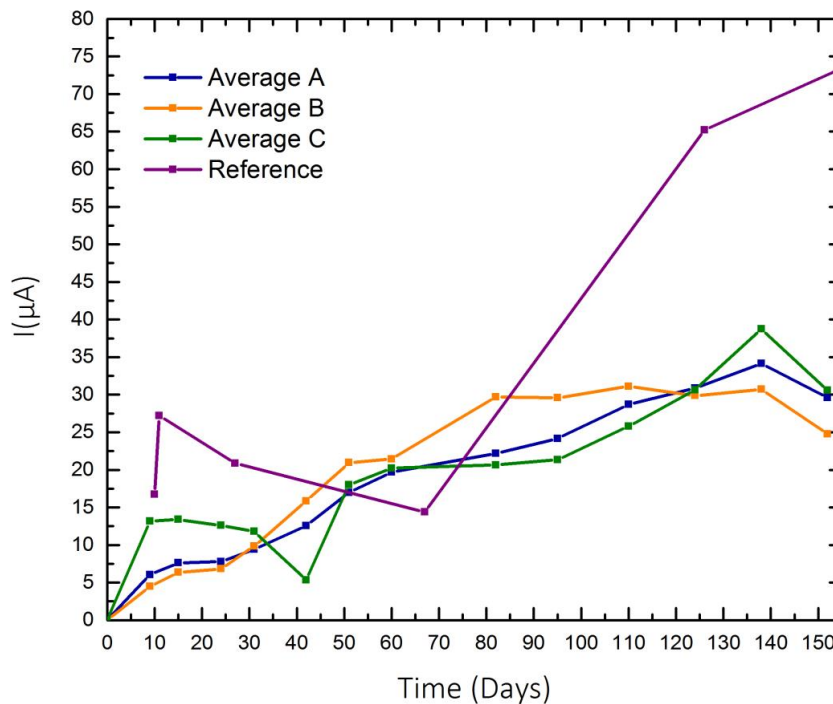
Από το συγκεντρωτικό διάγραμμα, προκύπτει ότι η απώλεια μάζας στα δοκίμια χωρίς τροποποιημένους νανοσωλήνες άνθρακα παρουσιάζουν τη μικρότερη απώλεια μάζας. Τα δοκίμια της 3^{ης} κατηγορίας, με τροποποιημένους νανοσωλήνες με διασπορά, εμφανίζουν την πιο μεγάλη απώλεια μάζας, ενώ τα δοκίμια της 4^{ης} κατηγορίας, που περιλαμβάνουν τροποποιημένους νανοσωλήνες χωρίς διασπορά, βρίσκονται μεταξύ των δύο άλλων κατηγοριών.

6.5. Συζήτηση Αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα



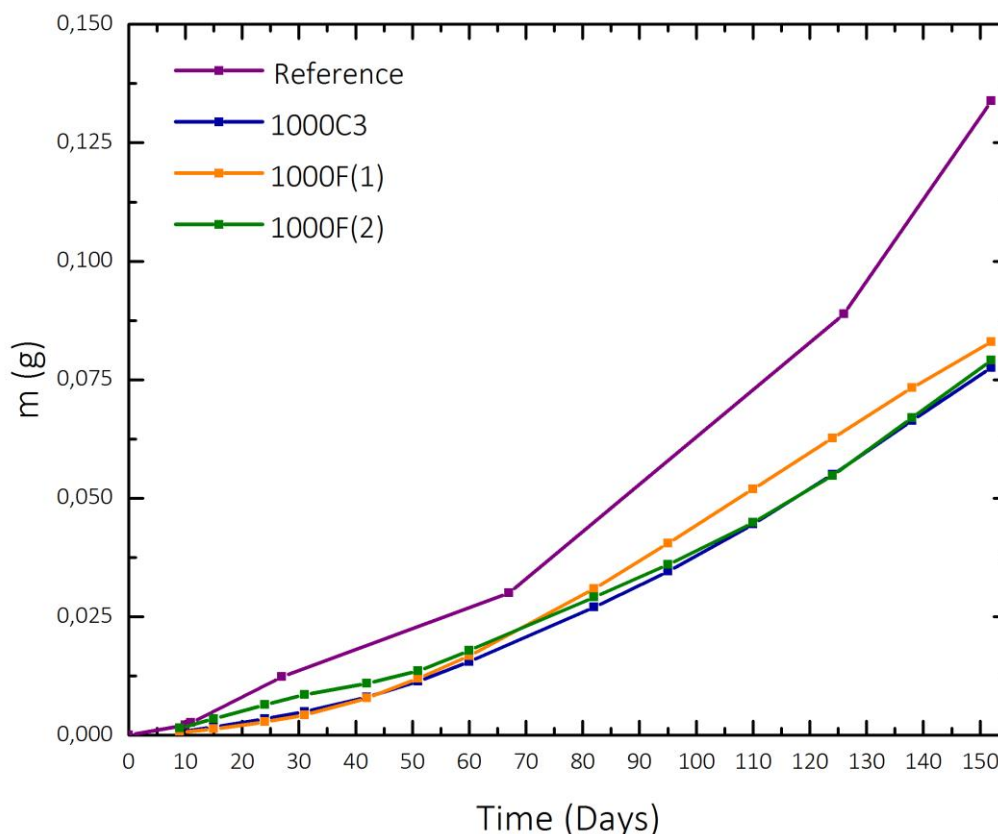
Γράφημα 33: Μέση Τιμή Δυναμικού E (mV)

Από το συγκεντρωτικό διάγραμμα των δυναμικών διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου προκύπτει ότι όλα τα δοκίμια που περιέχουν CNTs, έχουν προδιάθεση προς διάβρωση, μικρότερη των δοκιμών χωρίς CNTs. Διακρίση μεταξύ των δοκιμών με CNTs δε μπορεί να γίνει.



Γράφημα 34: Μέση Τιμή Ρεύματος Διάβρωσης I_{corr} (μA)

Από το συγκεντρωτικό διάγραμμα του ρεύματος διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου, προκύπτει ότι και πάλι τα δοκίμια χωρίς CNTs έχουν προδιάθεση προς διάβρωση μικρότερη των δοκιμών χωρίς CNTs. Διάκριση μεταξύ των δοκιμών με CNTs δεν είναι δυνατόν να γίνει.



Γράφημα 35: Μέση Τιμή Απώλειας Μάζας (g)

Στο διάγραμμα των απωλειών μάζας συναρτήσει του χρόνου, προκύπτει πάλι ότι τα δοκίμια που περιέχουν CNTs έχουν διάβρωση σημαντικά μικρότερη των δοκιμών χωρίς CNTs. Διάκριση μεταξύ των δοκιμών με CNTs δεν είναι και πάλι δυνατόν να γίνει.

Από τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας προκύπτει το σημαντικό συμπέρασμα ότι η χρήση των απλών CNTs, καθώς και η χρήση των χημικά τροποποιημένων CNTs - με διασπορά ή χωρίς - καθυστερούν τη διάβρωση του σπλισμού στον ίδιο βαθμό, καθώς δίνουν περίπου την ίδια απώλεια μάζας. Μοναδικό μειονέκτημα της χρήσης τροποποιημένων CNTs είναι η υψηλή τους τιμή. Όμως, σε σύγκριση με τους κοινούς CNTs, η μη απαίτηση χημικής τροποποίησης, καθώς και διασποράς με υπερήχους μειώνει το συνολικό κόστος. Παρά ταύτα, η τιμή τους σήμερα, για το σκυρόδεμα, παρά το μικρό ποσοστό τους (0,1% κατά βάρος τσιμέντου) εξακολουθεί να είναι υψηλό.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Χ.Ζέρης, " Δομική Μηχανική ΙΙΙ - Οπλισμένο Σκυρόδεμα", Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2013.
- [2] Ν.Λίτινας, "Αδρανή υλικά στο σκυρόδεμα", Σκυρόδεμα & Χάλυβας, 2010, <http://www.skyrodemanet.gr>
- [3] T.Hirschi, H.Knauber, M.Lanz, J.Schlumpf, S.Schrabbach, C.Spring, U.Waeber, "Εγχειρίδιο Τεχνολογίας Σκυροδέματος Sika", 2007
- [4] Π. Μιχάλης, Σ. Δημητρίου, "Μελέτη Σύνθεσης Σκυροδέματος", Πτυχιακή εργασία, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής, ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης, 2007
- [5] Ch.Malami, V.Kaloidas, G.Batis, N.Kouloumbi, "Carbonation and Porosity of Mortar Specimens with Pozzolanic and Hydraulic Cement Admixture", Cement and Concrete Reasearch, Vol.24, No8, 1994, p.1444-1454II.
- [6] Σ.Τσίμας, Σ.Τσιβιλής, Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου - Αθήνα : Ε.Μ.Π, 2004
- [7] Μ. Κοκκίνη, «Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα» Σχολή Πολιτικών Μηχ/κων, Ε.Μ.Π.
- [8] Παναγόπουλος Γ., Κίρτας Ε., «Κατασκευές Οπλισμένου Σκυροδέματος Ι», Εκπαιδευτικές Σημειώσεις, Τμήμα ΠΔΕ, ΤΕΙ Σερρών, 2005
- [9] ΕΛΟΤ EN 10080-2005 «Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος-Συγκολλησιμοι χάλυβες - Μέρος 1: Γενικές απαιτήσεις», ΕΛΟΤ 1421-2-2007 «Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος-Συγκολλησιμοι χάλυβες – Μέρος 2:Τεχνική κατηγορία B500A», ΕΛΟΤ 1421-3-2007 «Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Συγκολλησιμοι χάλυβες – Μέρος 3:Τεχνική κατηγορία B500C»
- [10] Γ. Μπατής, Καθηγητής ΕΜΠ «Χρήση νέων υλικών για την αύξηση της ανθεκτικότητας των κατασκευών, Εισήγηση στην ημερίδα του ΤΕΕ «Ενίσχυση κτιρίων με σύγχρονα υλικά», 2007
- [11] J.R.Davis, Davis&Associates, ASM, Corrosion: Understanding the basis, international, The Materials Information Society, U.S.A., 2004.
- [12] <http://corrosion-doctors.org/Corrosion-Thermodynamics/Free-energy.htm>
- [13] Frank Newman Speller «Corrosion, Causes and Prevention - an engineering problem» McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1926
- [14] Κουλουμπή Ν., Διάβρωση και Προστασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1999

- [15] Mars G. Fontana, Corrosion Engineering, McGraw-Hill, New York, 1978
- [16] J.R.Davis & Associates, Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance ASM International (The Materials Information Society) , IOM Communications, USA 2001.
- [17] Δ.Κ.Υφαντής, Υλικά, Διάβρωση και Προστασία (Θεωρία και Ασκήσεις), Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2002
- [18] P.R.Roberge, Handbook of Corrosion Engineering, McGraw Hill Handbooks, 1999
- [19] J.Scully, The Fundamentals of Corrosion, Pergamosn Press, London, 1975
- [20] H.Uhlig, Corrosion and Corrosion Control, John Wiley&Sons, Inc., New York, 1971
- [21] Naval Facilities Engineering Command, «Corrosion Control – NAVFAC MO-307», 1992
- [22] Γ.Μπατής, Φθορά και Προστασία Υλικών - Αθήνα : Ε.Μ.Π., 1999
- [23] Ν. Κουλουμπή, «Διάβρωση και Προστασία», Σημειώσεις μαθήματος «Φθορά και προστασία υλικών», Σχολής Χημικών Μηχ/κών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2010
- [24] Yajun Liu, Xianming Shi, “Electrochemical chloride extraction and electrochemical injection of corrosion inhibitor in concrete: State of the Knowledge”, Corrosion Reviews. (27), 2011, p. 53–82
- [25] Θ. Π. Τάσιος, Κ. Αλιγιζάκη «Ανθεκτικότητα Οπλισμένου Σκυροδέματος», Εκδόσεις Φοίβος, Αθήνα 1993
- [26] Σ. Η. Δρίτσος «Ενισχύσεις / επισκευές κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα» Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα, 2005
- [27] E. Rakanta, Th. Zafeiropoulou, G. Batis, “Corrosion protection of steel with DMEA-based organic inhibitor”, Construction and Building Materials (44), 2013, p. 507–513
- [28] Θ. Παναγιωτίδης, «Αναστολείς Διάβρωσης: Ένα αποτελεσματικό όπλο κατά της διάβρωσης» <http://e-archimedes.gr>
- [29] Γ. Μπατής, Ε. Ρακαντά, «Η καθοδική προστασία του οπλισμού στο σκυρόδεμα», Σκυρόδεμα, Τεύχος 3, 2006, σελ. 72-83
- [30] P. Roberge, “Corrosion Engineering: Principles and Practice”, McGraw-Hill Companies Inc., 2008
- [31] P. Molera, X. Oller, M. Del Vale, F. Gonzalez, “Formulation and Characterization of Anticorrosive Paints”, Pigment & Resin Technology (33), 2004, p. 99 - 104
- [32] G. Batis, N. Kouloumbi, P. Pantazopoulou, “Protection of reinforced concrete by coatings and corrosion inhibitors”, Pigment & Resin Technology (29), 2000, p. 159-163

- [33] J.Hone, M.Whitney, A.Zettle, Synthetic Met. 105 (1999) 2498-2499
- [34] J.Che, T.Cagin, W.A.Goddard, 7th Foresight Conference on Molecular Nanotechnology, October 1999, Santa Clara, Ca
- [35] www.wikipedia.org
- [36] X. E. E. Reynhout and J. C. Reijenga, " The Wondrous World of Carbon Nanotubes", Eindhoven University of Technology, 2003 (asterisk)
- [37] G. Yak ovules, J. Kerosene, A. Gail's, I.Girniene, Mater. Sci. 12 (2006) 147-151
- [38] P. M. Alayna, O.Z.Zhou, "Applications of Carbon Nanotubes, Editors M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus and Ph.Avouris, Springer Publication, 2001, 391-420
- [39] S.Curran, P. M. Ajayan, W. Blau, D.L. Carroll, J.Coleman,A.B.Dalton, A.P. Daley, B.McCarthy, A.Strevens, Adv.Mater., 10,1998,1091
- [40] P.G. Collins, M.S. Arnold and P.Avouris, Science 292 (2001) 706
- [41] www.azonano.com
- [42] S. Berber, Y.Kwon, D. Tomanek, "Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes", Phys.Rev. Let 84, 4613-4616(2000)
- [43] B.Gao,C.Bower,J.D.Lorentzen, L. Fleming, A.Kleinhammes, X.P.Tang, et al Chem. Phys. Lett 327(2000) 69
- [44] A. Mazzatenta, M.Giugliano, S.Campidelli, L. Gamba ziti, L.Businaro, H.Markram et al, J.Neurosci. 27 (2007) 6931-6936
- [45] www.physics4u.gr/news/2005/scnews2053.html
- [46] A. Bianca, K.Kostarelos amd M.Prato, 674 (2005)
- [47] www.glonatech.com
- [48] M. Vesalius Naseh, A.A.Khodadadi, Y.Mortazavi, O.Alizadeh Sahraei, F.Pourfayaz, and S.Mosadegh Sedghi, " Functionalization of Carbon Nanotubes Using Nitric Acid Oxidation and DBD Plasma", International Journal of Chemical , Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering Vol:3, No:1, 2009. [31] Χ.Ζέρης, " Δομική Μηχανική ΙΙΙ - Οπλισμένο Σκυρόδεμα", Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2013
- [49] Ι.Α. Μουμτζης, Δ.Π. Σαζού, "Ηλεκτροχημεία", Εκδόσεις ΖΗΤΗΣΕ, Θεσσαλονίκη 1992
- [50] Denny A. Jones Macmillan, "Principles and prevention of corrosion", 1992, σελ.147-148