



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ: ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Η χρήση ορισμένων οργανικών ουσιών, φιλικών προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο, ως αναστολέων της διάβρωσης του χάλυβα και των κραμάτων του σε θαλάσσιο περιβάλλον»

Όνοματεπώνυμο: Λουκία Λέντα

Αριθμός Μητρώου: 51114049

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Δρ. Σταματίνα Θεοχάρη, Αν. Καθηγήτρια

Μάρτιος 2023, Αθήνα



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

Τίτλος: Η χρήση ορισμένων οργανικών ουσιών, φιλικών προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο, ως αναστολέων της διάβρωσης του χάλυβα και των κραμάτων του σε θαλάσσιο περιβάλλον.

Συγγραφέας

ΛΟΥΚΙΑ ΛΕΝΤΑ

Αριθμός Μητρώου: 51114049

Επιβλέπουσα

Σταματίνα Θεοχάρη,

Αν. Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α.

Ημερομηνία εξέτασης

08/03/2023

Εξεταστική Επιτροπή

Δρ. Σταματίνα Θεοχάρη
Αν. Καθηγήτρια
ΠΑ.Δ.Α.

Δρ. Ισίδωρος Ιακωβίδης
Λέκτορας
ΠΑ.Δ.Α.

Δρ. Σταύρος
Χιονόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής
ΠΑ.Δ.Α.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Λέντα Λουκία του Αθανασίου, με αριθμό μητρώου 51114049 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών, δηλώνω ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα:



ΛΕΝΤΑ ΛΟΥΚΙΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου, που με στήριξαν στις αποφάσεις μου και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Η εκπόνηση της Διπλωματικής μου εργασίας έγινε με την επίβλεψη της Δρ. Σταματίνας Θεοχάρη την οποία ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθεια, τις συμβουλές και την καθοδήγησή της. Ευχαριστώ τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής και ιδιαίτερα τον Δρ. Ισίδωρο Ιακωβίδη, Λέκτορα. Επίσης, ευχαριστώ τη Δρ. Π. Πανταζοπούλου, Ακαδημαϊκή Υπότροφο του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής για την καθοδήγησή τους στο πειραματικό μέρος της εργασίας μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη συμφοιτήτριά μου Αναστασία και τον Κωστή για τη συμβολή και τη στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	2
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΝΑΥΠΗΓΙΚΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ.....	5
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	5
1.2 ΤΥΠΟΙ ΧΑΛΥΒΑ.....	6
1.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ.....	9
1.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ.....	15
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	15
2.2 ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΙ Η ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	15
2.3 ΔΙΑΒΡΩΣΗ.....	17
2.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	18
2.5 ΤΑ ΕΙΔΗ ΤΟΥ ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ.....	20
2.6 ΟΙ ΤΥΠΟΙ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΧΑΛΥΒΑ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ & ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ. ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ ΦΙΛΙΚΟΙ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	36
3.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	36
3.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ.....	37
3.3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....	41
3.4 ΑΝΤΙΔΙΑΒΡΩΤΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΙΣ.....	43
3.5 ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΑ ΧΑΛΥΒΔΙΝΑ ΜΕΡΗ ΠΛΟΙΟΥ.....	44
3.6 ΟΙ ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ.....	46
3.7 ΤΑ ΕΙΔΗ ΤΩΝ ΑΝΑΣΤΟΛΕΩΝ.....	49
3.8 ΕΙΔΙΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΝΑΣΤΟΛΕΩΝ.....	52
3.9 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΑΝΑΣΤΟΛΕΩΝ.....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	69
4.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	69
4.1.1 ΔΟΚΙΜΙΑ.....	69
4.1.2 ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ.....	69
4.1.3 ΟΡΓΑΝΑ – ΣΥΣΚΕΥΕΣ.....	75

4.1.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	76
4.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	78
4.2.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΜΑΖΑΣ.....	78
4.2.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΙΛΙΝΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	87
4.2.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ΟΠΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ.....	90
4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	96
ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	97
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	98
ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	104

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική εργασία έχει σκοπό τη μελέτη ορισμένων φυσικών οργανικών ουσιών, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως αναστολείς της διάβρωσης του χάλυβα και είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

Στην εργασία γίνεται μελέτη της διάβρωσης και πιο συγκεκριμένα της διάβρωσης του χάλυβα. Αναφέρονται οι μηχανισμοί διάβρωσης και τα είδη διαβρωτικού περιβάλλοντος. Αναλύεται ιδιαίτερα το φαινόμενο της διάβρωσης του χάλυβα που συμβαίνει στο θαλάσσιο περιβάλλον και οι τρόποι αντιμετώπισης της με τη χρήση αναστολέων με ιδιαίτερη έμφαση στη χρήση φυσικών ουσιών που δεν είναι τοξικές αλλά φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο. Στο πειραματικό μέρος της εργασίας αναπτύσσονται οι δοκιμές και τα πειράματα, μέσω των οποίων μελετήθηκε η συμπεριφορά του χάλυβα ως προς τη διάβρωση σε διαλύματα χλωριούχου νατρίου με και χωρίς την προσθήκη των αναστολέων. Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν τη μέθοδο της απώλειας μάζας, την οπτική και μικροσκοπική ανάλυση της επιφάνειας των δοκιμίων χάλυβα. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι οι οργανικές ουσίες που δοκιμάστηκαν, εκτός από φιλικές στο περιβάλλον, είναι και αποδοτικές ως αναστολείς της διάβρωσης του χάλυβα σε υδατικό περιβάλλον που περιέχει χλωριόντα.

Λέξεις κλειδιά: χάλυβας, διάβρωση, αναστολείς διάβρωσης φιλικοί προς περιβάλλον, οργανικές ουσίες φυτικής προέλευσης.

ABSTRACT

The purpose of this thesis was the study of some organic substances from herbal origins and are used as inhibitors against the corrosion of steel. These substances are also eco-friendly, non-toxic and do not endanger life and the environment.

In this thesis the corrosion of metals and especially the corrosion of steel is studied. The basic mechanisms of corrosion and the types of environments that influence the corrosion of metals are presented. The corrosion of steel in marine environments and the ways to prevent it by using inhibitors are analyzed. A special emphasis is given to the use of organic substances that are not toxic and do not endanger life and the environment. In the experimental part of this work the behavior of steel against corrosion was examined in chloride-containing solutions in the presence or not of natural organic substances. The measurements showed that the examined organic substances are eco – friendly and very effective as inhibitors against the corrosion of steel in an artificial marine environment.

Key words: steel, corrosion, eco-friendly and non-toxic corrosion inhibitors, organic substances from herbal origins.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

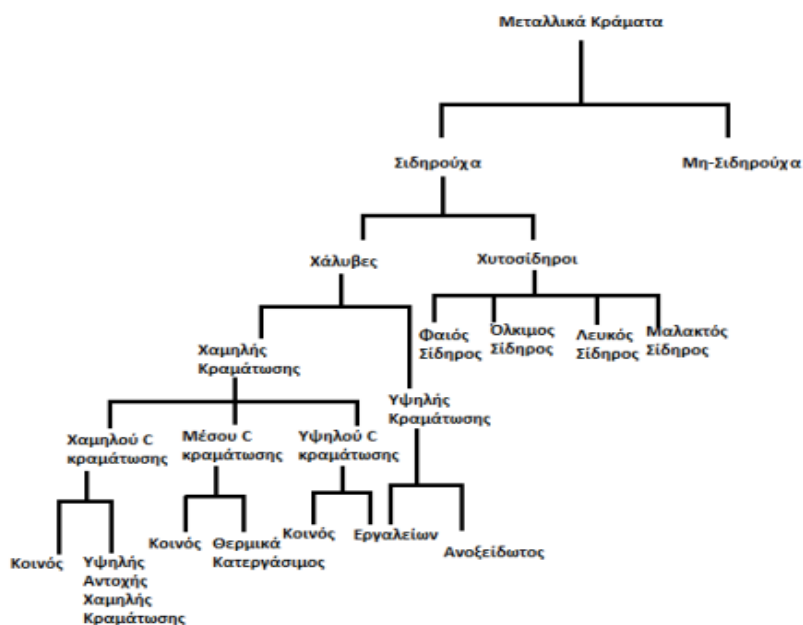
Τα ναυπηγικά υλικά και ιδιαίτερα οι χάλυβες υποφέρουν από το πρόβλημα της διάβρωσης ιδιαίτερα όταν βρίσκονται στο θαλάσσιο περιβάλλον. Για την προστασία τους από τη διάβρωση, καθώς η γάστρα και πολλά άλλα μέρη των πλοίων έρχονται σε επαφή με το θαλασσινό νερό, αναζητούνται και προτείνονται διάφορες μέθοδοι, επικαλύψεις και άλλες τεχνικές. Μεταξύ αυτών, είναι γνωστή και συνεχίζει να εμφανίζει επιστημονικό και τεχνολογικό ενδιαφέρον, η χρήση των αναστολέων διάβρωσης σε κλειστά συστήματα, αγωγούς και δεξαμενές και όπου αλλού είναι δυνατόν. Τα τελευταία χρόνια μεγάλο μέρος της έρευνας που διεξάγεται σε όλο τον κόσμο, αφορά τους αναστολείς που όχι μόνο προστατεύουν τα μεταλλικά υλικά και ειδικά το χάλυβα από τη διάβρωση, αλλά είναι επίσης, φιλικό προς το περιβάλλον και δεν αφήνουν ίχνη τοξικών ουσιών, που άμεσα ή έμμεσα επιβαρύνουν τη ζωή στον πλανήτη.

Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται αναφορά στις ιδιότητες, την ιστορία, τα είδη και την παραγωγή του χάλυβα, καθώς και στις εφαρμογές και στα χαλυβουργικά προϊόντα. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται το φαινόμενο της διάβρωσης του χάλυβα, με ιδιαίτερη έμφαση στους μηχανισμούς και τους παράγοντες που την επηρεάζουν, αλλά και στο κόστος και τις επιπτώσεις της για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Επιπλέον, αναφέρονται οι μορφές - τύποι της διάβρωσης και παρουσιάζεται το πρόβλημα της διάβρωσης των μεταλλικών υλικών στο θαλάσσιο περιβάλλον. Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι τρόποι προστασίας του χάλυβα από τη διάβρωση και περιγράφεται ο ρόλος που διαδραματίζουν οι αναστολείς της διάβρωσης. Αναφέρεται η αντιδιαβρωτική προστασία στις μεταλλικές κατασκευές, οι αντιδιαβρωτικές επιστρώσεις όπως και τα βασικά τους συστατικά. Παρουσιάζονται οι τύποι, οι κατηγορίες των αναστολέων και ιδιαίτερα οι πράσινοι αναστολείς. Το τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει το πειραματικό μέρος της εργασίας, στο οποίο μελετάται η δράση ορισμένων οργανικών φυσικών ουσιών, που δοκιμάστηκαν ως αναστολείς της διάβρωσης του χάλυβα σε διάλυμα χλωριόντων. Σύμφωνα με τα πορίσματα της μελέτης η χρήση αναστολέων διάβρωσης του χάλυβα που αποτελούνται από ουσίες φιλικές προς το περιβάλλον είναι απολύτως εφικτή. Στο τέλος της εργασίας παρατίθενται τα γενικά συμπεράσματα και οι βιβλιογραφικές αναφορές— παραπομπές που χρησιμοποιήθηκαν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΝΑΥΠΗΓΙΚΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι χάλυβες αποτελούν κράματα σιδήρου και άνθρακα σε διάφορες αναλογίες, και μπορεί να περιέχουν μικρές ποσότητες άλλων στοιχείων, όπως πυρίτιο, φώσφορο, θείο και μαγγάνιο. Η ανάμειξη του σιδήρου με τον άνθρακα δημιουργεί πολύ ισχυρά και ανθεκτικά κράματα, τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στη θραύση και την κρούση (Εικ. 1.1). Οι μεγαλύτερες ποσότητες χαλύβων παράγονται με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα (λιγότερο από 0,25%). Η μικροδομή τους αποτελείται από φερρίτη και περλίτη με αποτέλεσμα να είναι μαλακοί και να διαθέτουν σημαντική ολκιμότητα και δυσθραυστότητα.



Εικ. 1.1: Διάγραμμα σιδηρούχων κραμάτων [1]

Σε παλαιότερες εποχές, η βιομηχανική παραγωγή μιας χώρας αξιολογούνταν με βάση την παραγωγή της σε χάλυβα. Ωστόσο, οι χάλυβες δεν αποτελούν ένα και μοναδικό προϊόν. Σήμερα υπάρχουν περισσότεροι από 3.500 διαφορετικοί τύποι χάλυβα με πολύ διαφορετικές φυσικές, χημικές και περιβαλλοντικές ιδιότητες. Περίπου τα τρία τέταρτα των ειδών των χαλύβων έχουν δημιουργηθεί τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Οι σύγχρονοι χάλυβες είναι πολύ πιο ανθεκτικοί σε σύγκριση με τις παλαιότερες ποιότητες.

Οι χάλυβες λόγω του χαμηλού κόστους, της υψηλής αντοχής είναι τα πιο διαδεδομένα μεταλλικά κατασκευαστικά υλικά στον κόσμο. Χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές: από την αρχιτεκτονική έως τη ναυπηγική. Όσον αφορά την ναυπήγηση των εμπορικών πλοίων οι χάλυβες βρίσκονται στην πρώτη θέση σε σχέση με άλλα υλικά, όπως θα αναφερθεί στην συνέχεια της εργασίας. (Σούρσος, 2018) (Badr, 2014).

1.2 ΤΥΠΟΙ ΧΑΛΥΒΑ

Οι χάλυβες ανήκουν σε διάφορες κατηγορίες (grades), ανάλογα με την χημική τους σύσταση, την περαιτέρω κατεργασία και την κρυσταλλική δομή τους και κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες (carbon steel):

Περιέχουν άνθρακα (έως 2,06%) και μικρές ποσότητες μαγγανίου (έως 1,65%), πυριτίου (έως 0,6%) και χαλκού (έως 0,6%). Χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία και στην ναυπηγική ειδικά στην κατασκευή της γάστρας των πλοίων μιας και συγκολλούνται σχετικά εύκολα. Ορίζονται ως A, B, C, D με όριο διαρροής 235 MPa και με αυξημένη ανθεκτικότητα.

Με βάση την περιεκτικότητα άνθρακα, οι κοινοί χάλυβες χωρίζονται στις ακόλουθες υποκατηγορίες:

- a) Μαλακοί χάλυβες ή χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (mild steels $C < 0,30\%$),
- b) χάλυβες μεσαίου άνθρακα (medium carbon steels $0,30\% < C < 0,60\%$),
- c) χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (high carbon steels $0,60\% < C < 1,00\%$), και
- d) χάλυβες εξαιρετικά υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (ultra-high carbon steels $1,00\% < C < 2,00\%$).

- Κραματοποιημένοι χάλυβες (alloy steels), όπως οι ανοξείδωτοι χάλυβες, που είναι σιδηρούχα κράματα με υψηλή ποσότητα άλλων μετάλλων. Αυτά είναι:
 - a) Χάλυβες ελαφρού κράματος ή χάλυβες χαμηλής κραματοποίησης, που συνήθως περιέχουν χρώμιο, μολυβδαίνιο, βανάδιο, νικέλιο κ.λπ.. Το συνολικό ποσοστό τους δεν υπερβαίνει το 10% κατά βάρος (π.χ. εργαλειοχάλυβες) και

- b) Χάλυβες υψηλής κραματοποίησης (όπως είναι οι ανοξείδωτοι χάλυβες και οι ταχυχάλυβες). (Μαργαρίτης και Χαλίτι, 2018)

Σύμφωνα με την περαιτέρω επεξεργασία τους, οι χάλυβες χωρίζονται σε:

- a) Χάλυβες διαμόρφωσης, που υφίστανται περαιτέρω μηχανική κατεργασία (έλαση, διέλαση, κ.λπ.), και
- b) Χυτοχάλυβες, που παράγονται απευθείας με χύτευση υπό μορφή πλινθωμάτων («χελωνών») και επαναχυτεύονται για την κατασκευή διαφόρων εξαρτημάτων. (Σούρσος, 2018)

Τέλος, συχνά αναφέρονται οι φερριτικοί, οι περλιτικοί, οι μαρτενσιτικοί, οι μπαινιτικοί και άλλοι τύποι χαλύβων, ανάλογα με την μικροδομή και τις φάσεις που είναι παρούσες.

Παρακάτω δίνονται Πίνακες (1.1, 1.2 και 1.3) με την χημική σύσταση και τις μηχανικές ιδιότητες των κοινών ναυπηγικών χαλύβων. (Σούρσος, 2018) (Δουμένης, 2019)

Πίνακας 1.1: Χημική σύσταση κοινών ναυπηγικών χαλύβων

grade	C (max)	Mn	P (max)	S (max)	Si	Al (min)	Nb
A	0,21	*	0,035	0,035	0,50 (max)	-	-
B	0,21	0,8 (min)	0,035	0,035	0.35 (max)	-	-
D	0,21	0,6 (min)	0,035	0,035	0,1-0,35	0,020	-
E	0,18	0,7 (min)	0,035	0,035	0,1-0,35	0,020	-
AH 36	0,18	0,07-1,60	0,035	0,035	0,50 (max)	0,020	0,02-0,05
DH 36	0,18	0,90-1,60	0,035	0,035	0,50 (max)	0,020	0,02-0,05
EH 36	0,18	0,90-1,60	0,035	0,035	0,50 (max)	0,020	0,02-0,05

* % Mn όχι λιγότερο από 2,5 φορές το ποσοστό (%) C

Πίνακας 1.2: Χημική σύσταση ναυπηγικών χαλύβων υψηλής αντοχής

ΧΑΛΥΒΑΣ	ΑΗ32, DH32, EH32
	ΑΗ36, DH36, EH36
	ΑΗ40, DH40, EH40
Χημική Σύνθεση % κ.β	
C _{max}	0,18
Mn	0,90 – 1,60 ⁽¹⁾
Si _{max}	0,50
P _{max}	0,035
S _{max}	0,035
Al ₍₂₎	0,015
Nb ₍₂₎	0,02 – 0,05
V ₍₂₎	0,05 – 0,10
Ti _{max} ⁽²⁾	0,02
Cu _{max}	0,35
Cr _{max}	0,20
Ni _{max}	0,40
Mo _{max}	0,08

Πίνακας 1.3: Μηχανικές ιδιότητες ναυπηγικών χαλύβων

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ						
Χάλυβας	Όριο διαρροής σε MPa	Όριο Θραύσης σε MPa	% Επιμήκυνση	Δυσθραυστότητα (J) για t ≤ 50 mm		
				θ °C	διαμήκης	εγκάρσια
A- B- D- E	>235	400-520	22%	+20		
				0	27	20
				-20	27	20
				-40	27	20
ΑΗ32- DH32 EH32	315-350	440-590	22%	0	31	22
				-20	31	22
				-40	31	22
ΑΗ36 DH36 EH36	>350	490-620	21%	0	34	24
				-20	34	24
				-40	34	24
ΑΗ40 DH40 EH40	>390	510-660	20%	0	41	27
				-20	41	27
				-40	41	27

Με βάση τον προηγούμενο πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι οι τέσσερις ομάδες χαλύβων έχουν διαφορά στη τιμή της δυσθραυστότητας ανάλογα με τη θερμοκρασία μέτρησης, καθώς η αλλαγή της θερμοκρασίας προκαλεί μεταβολή από την όλκιμη στην ψαθυρή θραύση.

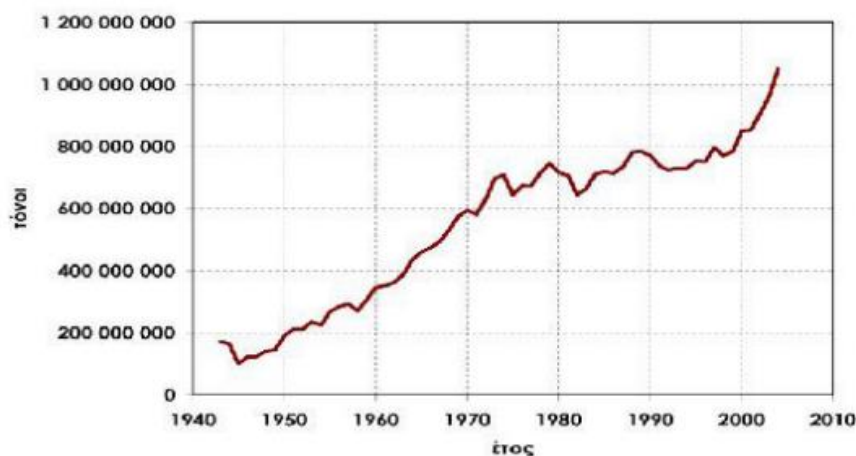
1.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

Οι χάλυβες παράγονται κυρίως με τρεις μεθόδους:

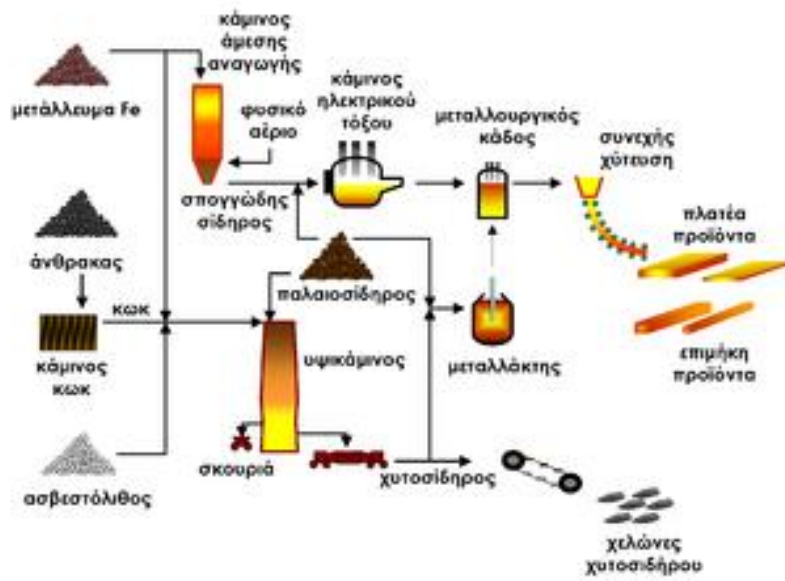
1. Χυτοσίδηρος παράγεται με αναγωγή σιδηρομεταλλεύματος σε υψικάμινο, που στην συνέχεια μετατρέπεται σε χάλυβα σε ένα μεταλλάκτη με εμφύσηση οξυγόνου.
2. Σπογγώδης σίδηρος παράγεται με άμεση αναγωγή (δηλ. αναγωγή σε στερεά κατάσταση) του σιδηρομεταλλεύματος σε κάμινο, και στην συνέχεια μετατρέπεται σε χάλυβα σε κάμινο (κλίβανο) ηλεκτρικού τόξου.
3. Σκραπ (δηλαδή παλαιοσίδερα) ανατήκονται σε κάμινο (κλίβανο) ηλεκτρικού τόξου.

Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία του 2005, η παγκόσμια παραγωγή χάλυβα προερχόταν από τις δύο πρώτες διαδικασίες (65,4%) και από την τρίτη κατηγορία (31,7%) προερχόταν από παλαιοσίδερα τήξης ηλεκτρικού τόξου και σπογγώδη σίδηρο. Ένα μικρό ποσοστό (2,9% για το 2005) προερχόταν από την μετατροπή χυτοσιδήρου σε καμίνο ανοικτής εστίας ή άλλες μεθόδους.

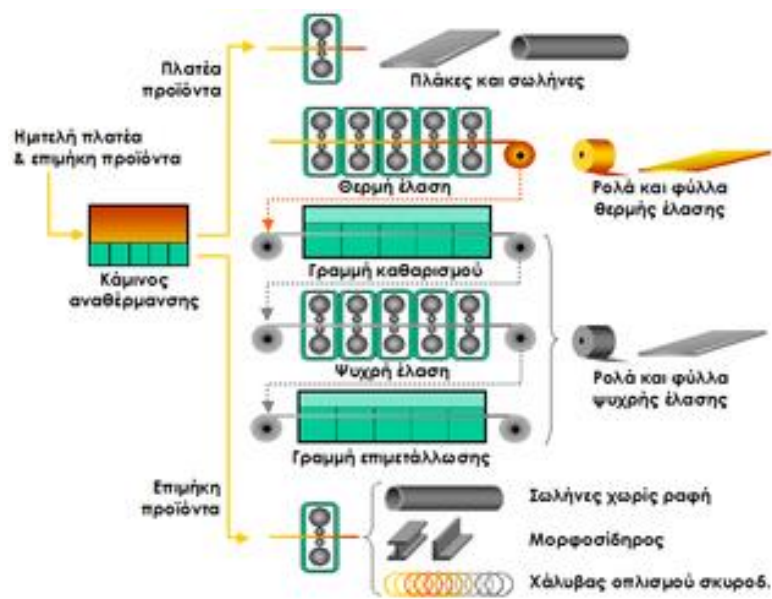
Στην Ελλάδα, η παραγωγή του χάλυβα παρουσιάζει αύξηση (Εικ. 1.2) (περίπου ένα εκατ. τόνοι ετησίως) που προέρχεται από την τήξη του παλαιοσίδηρου (Εικ. 1.3 & 1.4).(Birat, 2006) (Μαντά, 2012)



Εικ. 1.2: Παράγωγή χάλυβα στην Ελλάδα[2]



Εικ. 1.3: Παράγωγή χυτοσιδήρου και ημιτελών προϊόντων χάλυβα [3]



Εικ. 1.4: Παράγωγή χάλυβα [4]

1.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

Ο χάλυβας στις διάφορες μορφές του παρουσιάζει ιδιότητες οι οποίες μπορούν να καλύψουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Οι εφαρμογές χάλυβα μπορούν να χωριστούν σε διάφορους τομείς της πρωτογενούς αγοράς, όπως για κτήρια και υποδομές, μηχανικό εξοπλισμό, αυτοκίνητα, μεταλλικά προϊόντα, οικιακές συσκευές και ηλεκτρολογικό εξοπλισμό.

Οι κατασκευαστές υποστηρίζουν ότι το ποσοστό που έχει ο άνθρακας αλλά και ο ρυθμός απόψυξης μπορούν να ασκήσουν πολύ μεγάλη επιρροή πάνω στην μικροδομή, που αυτή θα καθορίσει την σκληρότητα και την αντοχή που θα έχει ο χάλυβας. Στις πιο πολλές περιπτώσεις οι ναυπηγικοί χάλυβες αποψύχονται στον αέρα, μετά την διαδικασία της εξέλασης, η οποία πραγματοποιείται εν θερμώ αλλά και μετά από οποιαδήποτε άλλη διαδικασία της θερμικής επεξεργασίας. (Δημητρακόπουλος, 2016)

Τον 20^ο αιώνα, ο σίδηρος αντικαταστάθηκε από το χάλυβα και μέχρι σήμερα είναι το σημαντικότερο υλικό στον τομέα της ναυπηγικής για την κατασκευή ενός πλοίου. Στη διάρκεια των πρώτων δεκαετιών η χρήση των ναυπηγικών χαλύβων γινόταν με βάση την αντοχή τους, η οποία ορίζεται από το όριο διαρροής ή την τάση θραύσης. Δόθηκε μεγάλη σημασία στην ιδιότητα της δυσθραυστότητας και της αντίστασης στη διάδοση ρωγμών των χαλύβων κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, εξαιτίας των αναφορών που υπήρξαν για 200 περιπτώσεις πλοίων περίπου που υπέστησαν σοβαρές θραύσεις. Εκείνη την περίοδο βέβαια οι περισσότερες αστοχίες οφείλονταν σε σχεδιαστικά λάθη ή λάθος συγκολλήσεις. Για το λόγο αυτό ακολούθησε η ανάπτυξη νέων τύπων χαλύβων άνθρακα-μαγγανίου που διέθεταν καλύτερη αντοχή σε ψαθυρή θραύση. Ένας ακόμη λόγος για την δημιουργία τέτοιων χαλύβων ήταν η ανάγκη κατασκευής υποβρυχίων (Εικ. 1.5). Το 1940 έως και τις αρχές 1950 έγινε αντικατάσταση των μαλακών χαλύβων με όριο διαρροής 225 MPa από χάλυβες υψηλής τάσης θραύσης (high-tensile strength, HTS steel), με όριο διαρροής 350 MPa. Από το τέλος της δεκαετίας του 1950 άρχισε να γίνεται χρήση του χάλυβα HY-80 με όριο διαρροής 560 MPa και επακολούθησαν και άλλοι τύποι όπως HY100 και HY-130 με όρια διαρροής 690 MPa και 900 MPa αντίστοιχα. (Δημητρακόπουλος, 2016) (Αρακάς, 2015)



Εικ. 1.5: Υποβρύχιο 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου [5]

Από το 1960 έως 1970 δημιουργήθηκε μια νέα ομάδα χαλύβων, των φερριτικών. Η ανακάλυψη αυτή έγινε χάρις τη βιομηχανία κατασκευής θαλάσσιων εξεδρών εξόρυξης πετρελαίου (off shore industry) που ήθελε χάλυβες με υψηλή αντοχή και δυσθραυστότητα, να συγκολλούνται εύκολα και τα χαλυβουργεία να παράγουν χάλυβες, χωρίς ανεπιθύμητες προσμίξεις. Αυτή η ομάδα χαλύβων έχει ονομαστεί “μικρο-κραματωμένοι χάλυβες υψηλής αντοχής” (high strength low alloy, HSLA steels), και θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα ναυπηγικά υλικά. Επίσης υπάρχουν και άλλες δύο κατηγορίες χάλυβα υψηλής αντοχής τύπου AH36 και AH32 όπου η ονομασία προέρχεται από τη Διεθνή Ομοσπονδία Νοηγνομώνων (International Association of Classification Societies, IACS). Οι Νοηγνώμονες είναι υπεύθυνοι και για τον έλεγχο της παραγωγής του χάλυβα στα χαλυβουργεία ώστε να ακολουθούνται οι σωστές προδιαγραφές.

Η κατασκευή της γάστρας των πλοίων και των δεξαμενών γίνεται από κοινό ναυπηγικό χάλυβα (Εικ. 1.6). Τα τελευταία χρόνια γίνεται έρευνα για την χρήση χαλύβων υψηλής αντοχής, οι οποίοι είναι ελάσματα με μικρότερο πάχος και λιγότερο βάρος σε σχέση με τους ανθρακούχους χάλυβες.



Εικ. 1.6: Κατασκευή γάστρας πλοίου από χάλυβα [6]

Σε σχέση με τους κοινούς μαλακούς χάλυβες (mild steel) οι χάλυβες υψηλής αντοχής έχουν:

- Χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα
- Μεγαλύτερη σκληρότητα
- Υψηλότερη αντοχή
- Εμφανίζει την ίδια αντοχή σε κόπωση
- Εξίσου καλή συγκολλησιμότητα, ενώ
- Η αντοχή του σε διάβρωση είναι παρόμοια

Οι χάλυβες υψηλής αντοχής χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των φορτηγών πλοίων μεταφοράς μεταλλεύματος (χύδην) και από το 1960, αυξάνεται η χρήση τους στις πλωτές εξέδρες εξόρυξης πετρελαίου. Οι κοινόι χάλυβες προορίζονται για τις συνθήκες λειτουργίας στις οποίες λειτουργούν τα πλοία και οι πλωτές κατασκευές. Οι ειδικοί χάλυβες με πιο βελτιωμένες ιδιότητες χρησιμοποιούνται στα πλοία που μεταφέρουν υγροποιημένο αέριο (LNG) (Εικ. 1.7). Επιπλέον οι ανοξείδωτοι χάλυβες χρησιμοποιούνται σε μικρά σκάφη, σκάφη αναψυχής και ιστιοπλοϊκά για την κατασκευή δεξαμενών πετρελαίου Diesel και νερού, στον άξονα που συνδέει την μηχανή με την έλικα όπως και την έλικα (Εικ. 1.8). Τέλος, άλλες χρήσεις του χάλυβα αναφέρονται σχετικά με την κατασκευή εγκαταστάσεων παραγωγής ανανεώσιμων

μορφών ενέργειας (αιολική ενέργεια, γεωθερμική ενέργεια), τη διαμόρφωση λιμένων και πλωτών αεροδρομίων, εγκαταστάσεις παραγωγής πόσιμου νερού με τη μέθοδο της αφαλάτωσης, τις υποβρύχιες τηλεπικοινωνίες και τη θαλάσσια βιοτεχνολογία. (Αρακάς, 2015) (Δουμένης, 2019)



Εικ. 1.7: Δεξαμενή LNG πλοίου από χάλυβα[7]



Εικ. 1.8: Έλικα πλοίου από ωστενιτικό χάλυβα για πλοία που πλέουν σε πάγο[8]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στη διάβρωση του χάλυβα που συντελείται στο θαλάσσιο περιβάλλον. Ως θαλάσσιο περιβάλλον ορίζεται το τμήμα εκείνο του φυσικού περιβάλλοντος το οποίο περιλαμβάνει τις εκβολές των ποταμών, τις παράκτιες περιοχές, τις παρακείμενες στις ακτές θαλάσσιες ζώνες, τις περιοχές της ανοιχτής θάλασσας, τις περιοχές του ωκεάνιου βυθού, καθώς και τα θαλάσσια οικοσυστήματα.

Όλα τα υλικά, φυσικά και τεχνητά, ανεξαρτήτως χημικής σύστασης και δομής φθείρονται με την πάροδο του χρόνου εξαιτίας των δράσεων με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται. Η φθορά αυτή επηρεάζει αρνητικά τη δομική συμπεριφορά τους, και κατ' επέκταση τις ιδιότητες των υλικών, όπως η αξιοπιστία και η αντοχή τους. Όσον αφορά τα μεταλλικά υλικά και ιδιαίτερα τους χάλυβες, η συμπεριφορά στη διάβρωση, το κόστος, οι μηχανικές ιδιότητες, η ικανότητα συγκόλλησης, η αντοχή σε θερμική καταπόνηση, η ευκολία παραγωγής τους, τα θερμικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους είναι κάποιες από τις παραμέτρους επιλογής των υλικών αυτών, για κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή και ιδιαίτερα στη ναυπηγική.

Η διάβρωση του χάλυβα στο θαλάσσιο περιβάλλον χρήζει ιδιαίτερης προσοχής διότι έχει επίπτωση σε αρκετές κατασκευές, μεταλλικές και μη, όπως είναι οι γέφυρες, οι ναυπηγικές κατασκευές και οι κατασκευές που βρίσκονται σε παραθαλάσσιες περιοχές.

2.2 ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΙ Η ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Η διάβρωση του χάλυβα έχει πολύ σοβαρές επιπτώσεις στην οικονομία και τη βιομηχανική διαδικασία, πρόβλημα το οποίο στις μέρες μας έχει οξυνθεί επηρεάζοντας με άμεσο ή έμμεσο τρόπο την καθημερινή ζωή. (Pantazopoulou et al., 2022)

Η σημασία του φαινομένου της διάβρωσης για την Οικονομία μιας χώρας μπορεί να γίνει κατανοητή καθώς σχετίζεται άμεσα με τον οικονομικό αντίκτυπο που έχει και κατά συνέπεια με την ένταση των διεθνών προσπαθειών για την καταπολέμησή του. Υπολογίζεται ότι το 40% των μετάλλων και των κραμάτων που παράγονται

παγκοσμίως κάθε χρόνο επηρεάζονται δυσμενώς από τη διάβρωση. Έτσι, για παράδειγμα, εάν σε έλασμα πλοίου δημιουργηθεί «διάβρωση με βελονισμούς», και παρατηρηθεί ακόμα και μια εγκοπή, βάθους 10% του πάχους του ελάσματος, θα πρέπει αυτό να αντικατασταθεί.

Σήμερα, η μελέτη του φαινομένου της διάβρωσης και η προστασία των μετάλλων από αυτήν αναπτύσσεται σε πολλούς επιστημονικούς κλάδους, οι οποίοι περιλαμβάνουν τις επιστήμες της φυσικοχημείας και της μεταλλοτεχνίας, τις επιστήμες των υλικών, της χημείας των πολυμερών και της φυσικής των επιφανειών. Η επιστήμη των υλικών περιλαμβάνει την έρευνα, το σχεδιασμό και την ανακάλυψη νέων υλικών, με ιδιότητες που δεν υπάρχουν στη φύση. Επομένως, το θέμα είναι διεπιστημονικό και ως τέτοιο θα πρέπει να αντιμετωπίζεται. Αυτό εξηγεί και το πλήθος των αναφορών σχετικά με τη διάβρωση των μετάλλων σε διάφορους επιστημονικούς κλάδους. (Koch, 2016). Για παράδειγμα, σύμφωνα με τον O.H.E. (1990), αναφέρεται ότι 200.000 ερευνητές και 18.550 ειδικοί σ' όλο το κόσμο εμπλέκονται στην έρευνα σχετικά με τη διάβρωση και προστασία από αυτή. Σε μηνιαία βάση εκδίδονται σε όλο το κόσμο πλήθος περιοδικών, που περιλαμβάνουν θέματα διάβρωσης και προστασίας. Κάθε επιστημονικά αναπτυγμένο κράτος έχει ιδρύσει «Ινστιτούτο κατά της Διάβρωσης», που συντονίζει την προσπάθεια σε εθνική βάση. Η «Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία Διάβρωσης» και ο O.O.Σ.A. συντονίζουν την έρευνα ανάμεσα στα κράτη της Ευρώπης. Το «N.A.T.O.» και η επιστημονική του ομάδα «N.A.T.O. - AGARD») συντονίζουν την έρευνα ανάμεσα στα κράτη της Ατλαντικής Συμμαχίας.

Σε αυτούς τους αριθμούς θα πρέπει να προστεθεί και ο αντίκτυπος του φαινομένου της θαλάσσιας ρύπανσης στα ύφαλα των πλοίων. Αυτού του τύπου η ρύπανση που προκαλείται από τη θαλάσσια χλωρίδα και πανίδα που προσκολλάται στα ύφαλα, εκτός από την αύξηση της διάβρωσης, προκαλεί επίσης μείωση της αρχικής ταχύτητας πλεύσης του πλοίου κατά 20-40% μέσα σε ένα χρόνο. Παρά τον καθαρισμό και τη βαφή των υφάλων, η ταχύτητα του σκάφους μειώνεται οριστικά κατά 7% έως 14% της αρχικής του ταχύτητας, επειδή η επεξεργασμένη επιφάνεια των ελασμάτων δεν επανέρχεται ολοκληρωτικά στην αρχική στιλπνότητα της. (Ξυφώλης, 2017)

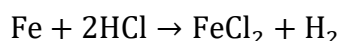
Επίσης οι επιπτώσεις διάβρωσης εμφανίζονται και στα καταστρώματα των πλοίων με το συνδυασμό θαλασσινού νερού και αέρα να καταστρέφει τα μέταλλα. Τέλος οι

σεντίνες είναι μία ακόμη περίπτωση όπου εμφανίζεται διάβρωση, καθώς εκεί υπάρχει μόνιμη υγρασία και φθορά του μετάλλου.

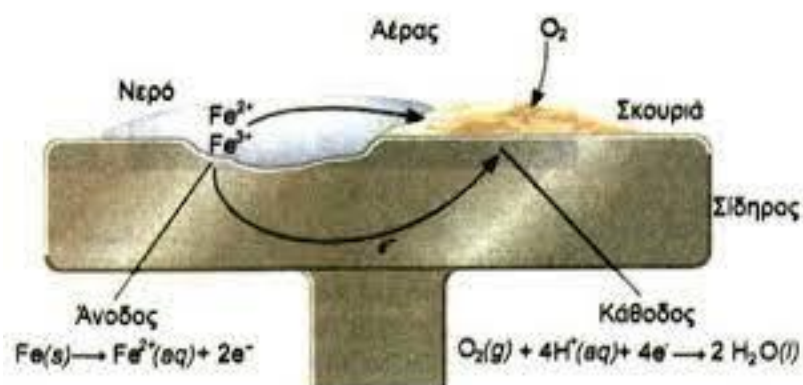
2.3 ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Διάβρωση είναι η αυθόρμητη, ή εκβιασμένη, ηλεκτροχημική, ή και χημική, μηχανική, ή βιολογικής φύσης φθορά της επιφάνειας του μετάλλου και του κράματος, η οποία είναι δυνατό να οδηγήσει σε απώλεια υλικού αναλόγως της σύστασής του. (Μαντά, 2012)

Ως χημική διάβρωση ορίζεται και η διάλυση των μετάλλων σε οξέα με έκλυση αερίου υδρογόνου και των ηλεκτρονίων τα οποία αποσπώνται από τη μεταλλική επιφάνεια και προσλαμβάνονται από τα άτομα υδρογόνου σύμφωνα με την αντίδραση (Σοκουζούδης, 2015)



Η απομάκρυνση των μεταλλικών ιόντων δημιουργεί απελευθέρωση των ηλεκτρονίων τα οποία μένουν σταθερά στη μεταλλική επιφάνεια εξαιτίας των ηλεκτροστατικών ελκτικών δυνάμεων. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται η ηλεκτροχημική ή ηλεκτροστατική διπλοστοιβάδα όπου γίνεται η μεταφορά ηλεκτρονίων μεταξύ δύο επιφανειών του μετάλλου ή κράματος (άνοδος – κάθοδος) (Εικ. 2.1). (Υφαντής, 2008)



Εικ. 2.1: Ηλεκτροχημικής φύσης διάβρωση [9]

Συχνά επίσης χρησιμοποιείται ο όρος μηχανική διάβρωση για να τονίσει την θραύση του μετάλλου λόγω της παρουσίας τάσεων θλίψης ή εφελκυσμού. Επίσης η φθορά

μιας μεταλλικής επιφάνειας εξαιτίας της μηχανικής δράσης, προκύπτει από την πρόσκρουση υγρού, την τριβή από σωματίδια, φυσαλίδες ή σταγονίδια αιωρούμενα σε ένα ταχέως κινούμενο υγρό ή αέριο. (Beacon, 2010)

2.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Η διάβρωση δεν εξελίσσεται με την ίδια ταχύτητα σε όλα τα μέταλλα. Ο ρυθμός διάβρωσης εξαρτάται από το είδος του περιβάλλοντος (αέρας, νερό, έδαφος κλπ.) και τις συνθήκες (πίεση, θερμοκρασία κλπ.) μέσα στο οποίο βρίσκεται το μέταλλο που υπόκειται σε διάβρωση. Οι παράγοντες που ευνοούν στην ταχύτερη εξέλιξη της διάβρωσης αλλά και η γνώση αυτών θα μπορεί να οδηγήσει στην αποφυγή και την σημαντική μείωση της. Οι σημαντικότεροι από αυτούς τους παράγοντες είναι οι εξής:

1. Η παρουσία υγρασίας. Όσο πιο ξηρή είναι η ατμόσφαιρα στην οποία εκτίθεται το μέταλλο ή το κράμα τόσο μικρότερη η εξέλιξη της. Αντίθετα, σε υγρά περιβάλλοντα η ταχύτητά της αυξάνει σημαντικά, και ιδιαίτερα για τον χάλυβα αυξάνει σημαντικά όταν το ποσοστό υγρασίας φθάσει στο 60%.

2. Η θερμοκρασία. Η ταχύτητα της διάβρωσης αυξάνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας, Συγκεκριμένα, η διάβρωση αυξάνεται στο διπλάσιο για κάθε άνοδο της θερμοκρασίας κατά 10°C. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της κινητικότητας των ατόμων και των μορίων του σώματος που συμμετέχει στην αντίδραση. Από την άλλη με την αύξηση της θερμοκρασίας μεταβάλλεται η περιεκτικότητα του διαλύματος και μειώνεται η περιεκτικότητα σε αέρια προκαλώντας μεταβολή στο ρυθμό της διάβρωσης. Συμπερασματικά, φαίνεται ότι η υψηλή θερμοκρασία επηρεάζει αρνητικά την αντοχή των χαλύβων στη διάβρωση. Τα χαμηλής περιεκτικότητας διαλύματα χλωριόντων είναι ικανά να προκαλέσουν διάβρωση όταν αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες. Συνήθως η διάβρωση παρατηρείται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 50°C, αν και μπορεί να συμβεί και σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος όταν πρόκειται για ωστενιτικούς χάλυβες τύπου 304 και 316. Σ' αυτές τις περιπτώσεις, η περιεκτικότητα σε νικέλιο και μολυβδαίνιο καθιστά την αντοχή των χαλύβων πιο υψηλή. Επίσης μεγαλύτερη αντοχή εμφανίζουν οι φερριτικοί και οι διφασικοί ανοξείδωτοι χάλυβες.

3. Η τριεπιφάνεια. Η ύπαρξη τριεπιφάνειας επιτείνει την διάβρωση. Αυτό παρατηρείται στην τριεπιφάνεια νερού-αέρα-μετάλλου κ.λ.π.

4. Το pH. Όσο μικρότερο είναι το pH του περιβάλλοντος τόσο ταχύτερα εξελίσσεται και η διάβρωση. Η ταχύτητα διάβρωσης του χάλυβα είναι μικρή σε ουδέτερο ή μεγαλύτερο pH, ενώ για τις χαμηλότερες τιμές η ταχύτητα της διάβρωσης γίνεται μεγαλύτερη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα όξινου περιβάλλοντος αποτελεί η όξινη βροχή, η οποία σε βιομηχανικές ζώνες, έχει τιμή pH γύρω στο 2,5 προκαλώντας σημαντική αύξηση της διάβρωσης σε μεταλλικές κατασκευές.

5. Οι μηχανικές τάσεις. Η ταχύτητα της διάβρωσης αυξάνεται γενικά με την παρουσία μηχανικών τάσεων, οι οποίες με τη σειρά τους μπορούν να προκαλέσουν τη θραύση των μεταλλικών υλικών και κατασκευών. Πιο συγκεκριμένα, η διάβρωση με μηχανική καταπόνηση οδηγεί σε ψαθυρή θραύση.

6. Οι μηχανικές ανωμαλίες στην επιφάνεια της μεταλλικής κατασκευής. Μεταλλικές κατασκευές που εμφανίζουν ανωμαλίες στην επιφάνεια τους, όπως εσοχές, προεξοχές, πόρους, ρωγμές (Εικ. 2.2) κλπ. υφίστανται διάβρωση σε πιο μεγάλο βαθμό και με μεγαλύτερη ευκολία σε σχέση με άλλα σημεία της επιφάνειας που είναι πιο ομαλά και λεία.

7. Τα διαφυγόντα ρεύματα. Η παρουσία διαφυγόντων ρευμάτων επιτείνει γενικά την διάβρωση. Σε αντίθεση με το εναλλασσόμενο ρεύμα, το συνεχές ρεύμα προκαλεί αύξηση του βαθμού της διάβρωσης. Συχνά τα προϊόντα της διάβρωσης είναι ημιαγωγοί, οι οποίοι προκαλούν μερική ανόρθωση του ρεύματος, γεγονός που έχει ως συνέπεια την άνοδο των επιπέδων της διάβρωσης. (Σοκουζούδης, 2015)



Εικ. 2.2: Ρωγμή προπέλας[10]

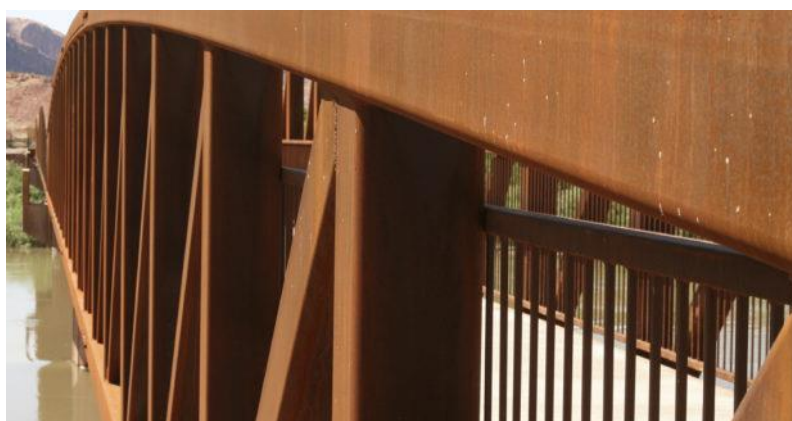
2.5 ΤΑ ΕΙΔΗ ΤΟΥ ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Όταν οι χάλυβες βρεθούν μέσα σε διαβρωτικό περιβάλλον, αργά ή γρήγορα θα υποστούν διάβρωση. Η ταχύτητα με την οποία θα πραγματοποιηθεί η διάβρωση εξαρτάται από το ίδιο το διαβρωτικό περιβάλλον ή από το διαβρωτικό μέσο. Σχετικά με το διαβρωτικό μέσο θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η θερμοκρασία και η πολυπλοκότητα του μέσου αυτού, αλλά και οι εναλλαγές ως προς το είδος και τη φύση του.

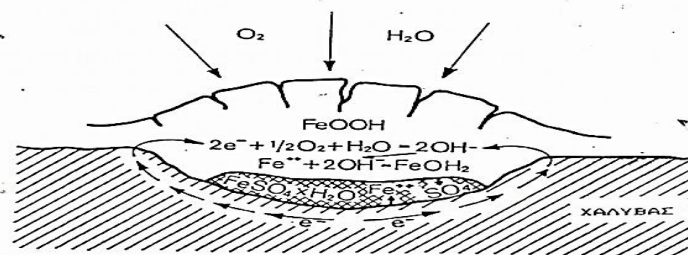
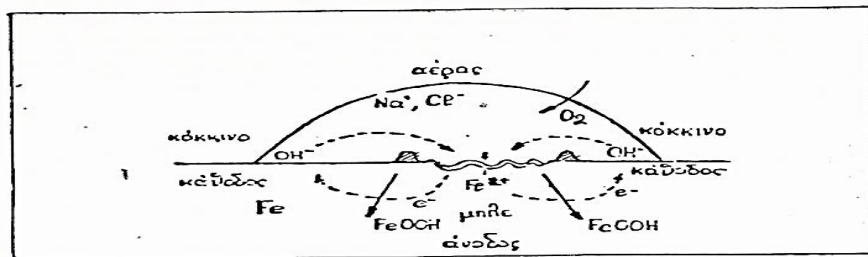
Τα κυριότερα περιβάλλοντα διάβρωσης είναι τα ακόλουθα:

1) Ατμοσφαιρικός αέρας: η διάβρωση οφείλεται κυρίως στο οξυγόνο και την υγρασία και μπορεί να ενισχυθεί ανάλογα με την περιοχή. Για παράδειγμα, σε βιομηχανικές περιοχές ή κοντά σε εξόδους καυσαερίων (καμινάδες, εξατμίσεις μεγάλων οχημάτων) το περιβάλλον είναι πλούσιο σε ρυπαντικά αέρια, όπως SO_2 , NO_x , H_2S , ενώ σε θαλάσσιες περιοχές το περιβάλλον είναι γεμάτο άλατα που ενισχύουν τη διαβρωτική ικανότητα.

Η διάβρωση του χάλυβα στην ατμόσφαιρα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία διάσπαρτων κιτρινωπών κηλίδων τοπικού ή και εκτεταμένου χαρακτήρα στην επιφάνειά του. Σε ότι έχει σχέση με την ατμοσφαιρική διάβρωση, θεμελιώδη σημασία έχει η επιφάνεια του μετάλλου. Η λεία επιφάνεια επιδρά θετικά στην αντοχή στη διάβρωση, ενώ πολύ σημαντική είναι η κλίση της κατασκευής, η οποία θα πρέπει να επιτρέπει την αποστράγγιση του νερού, (Εικ. 2.3, 2.4).



Εικ. 2.3: Χάλυβας σε γέφυρα που έχει υποστεί ατμοσφαιρική διάβρωση



Εικ. 2.4: Η διάβρωση του χάλυβα στην ατμόσφαιρα και η δημιουργία σκουριάς [11]

2) **Έδαφος:** λόγω της διαπερατότητάς του μπορεί να περιέχει πλήθος στοιχείων που ενισχύουν τη διαβρωτική του ικανότητα (πχ. άλατα και μικροοργανισμούς).

3) **Γλυκό νερό:** η διαβρωτική ικανότητα του γλυκού νερού οφείλεται στα διαλυμένα άλατα καθώς επηρεάζουν την ταχύτητα της διάβρωσης, στο οξυγόνο, στους μικροοργανισμούς και στα πάσης φύσεως σωματίδια που βρίσκονται μέσα του. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η διάβρωση του σιδήρου, της οποίας ο ρυθμός μειώνεται με την αύξηση της αλατότητας λόγω της ταυτόχρονης μείωσης του οξυγόνου. Ο ρυθμός διάβρωσης επιταχύνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας και επιβραδύνεται με τη μείωση του οξυγόνου. (Ζαχαρίου, 2009) (Μαυρουλέας, 2020)

4) **Θαλάσσιο νερό:** η διαβρωτική ικανότητα του θαλάσσιου νερού οφείλεται στη συγκέντρωση αλάτων, στο διαλυμένο οξυγόνο, στη θερμοκρασία, στην πίεση, στην ταχύτητα ροής του νερού, στο pH και στους μικροοργανισμούς, (Εικ. 2.5). Υλικά ανθεκτικά και κατάλληλα προς χρήση σε θαλάσσιο νερό είναι το τιτάνιο, ο ορείχαλκος, μερικοί μπρούτζοι, τα κράματα χαλκού-νικελίου και τα κράματα νικελίου-χρωμίου-μολυβδαινίου.



Εικ. 2.5: Διάβρωση από θαλάσσιο νερό[12]

5) Καυσαέρια και θερμά αέρια: η διαβρωτική ικανότητα των αερίων αυτών οφείλεται στην υψηλή τους θερμοκρασία, στην πίεση, στην ταχύτητα της ροής τους, καθώς και στα συστατικά τους.

6) Χημικό περιβάλλον: η διαβρωτική ικανότητα του χημικού περιβάλλοντος εξαρτάται από τις ουσίες (ανόργανες και οργανικές) τις οποίες περιέχει. Ο βαθμός της διάβρωσης εξαρτάται από τη χημική συγγένεια των ουσιών αυτών με τα μέταλλα με τα οποία έρχονται σε επαφή, όπως επίσης και από την θερμοκρασία, την πίεση και την ταχύτητα της ροής τους.

7) Πυρηνικό περιβάλλον: σε αυτή την περίπτωση, η διάβρωση συμβαίνει λόγω της παρουσίας ραδιενεργών ουσιών, οι οποίες εκπέμπουν ακτινοβολίες που επηρεάζουν τη χημική σύσταση, τη δομή και τις ηλεκτρικές ιδιότητες των μετάλλων, καθώς και τον μηχανισμό των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. (Σοκουζούδης, 2015)

Γενικότερα, όσον αφορά τα πλοία και τις πλωτές κατασκευές το πρόβλημα της διάβρωσης είναι μεγάλο, καθώς βρίσκονται μέσα σε πολύπλοκο και έντονα διαβρωτικό περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, ο αέρας περιέχει και μεταφέρει ποσότητες νερού στις μεταλλικές επιφάνειες του πλοίου με αποτέλεσμα να εκτίθεται συνεχώς μέσα σε υγρό περιβάλλον. Το νερό που μεταφέρει ο αέρας περιέχει αλάτι το οποίο επικάθεται στις επιφάνειες. Το ίδιο το θαλασσινό νερό συγκεντρώνει διαβρωτικά στοιχεία, και επιπλέον στο περιβάλλον υπάρχει υπεριώδης ακτινοβολία. Πάντως, η βασική αιτία της διάβρωσης είναι η παρουσία του οξυγόνου στο νερό με αποτέλεσμα η διάβρωση που υφίστανται για παράδειγμα τα ναύαγια να είναι αργή αφού στα μεγάλα βάθη των ωκεανών η περιεκτικότητα του οξυγόνου στο νερό είναι μικρή. Επίσης οι μικροοργανισμοί (φύκια, όστρακα) που προσκολλώνται στις

επιφάνειες όπως είναι τα ύφαλα των πλοίων δημιουργούν διάβρωση (Εικ. 2.6). (Ντούτσιας, 2011)



Εικ. 2.6: Διάβρωση στο θαλάσσιο περιβάλλον [13]

Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει τις κατηγορίες της διάβρωσης σε μια κλίμακα από το 0 έως το 4 με βάση τη διαβρωτικότητα του περιβάλλοντος. Σε αυτόν τον πίνακα οι κατηγορίες διάβρωσης 0 και 1 είναι οι λιγότερο επικίνδυνες. Η κατηγορία 2 μπορεί να αναφέρεται σε εσωτερικούς ή εξωτερικούς χώρους όπου τα οξείδια του θείου είναι σχετικά ασήμαντα σε σχέση με την ατμοσφαιρική ρύπανση. Από την άλλη, στην κατηγορία 3 τα ποσοστά των οξειδίων του θείου είναι αυξημένα. Το ίδιο ισχύει και για τα ποσοστά του αζώτου. Επίσης, κοντά σε παράκτιες περιοχές είναι αυξημένα τα ποσοστά των χλωριόντων και της υγρασίας. Τέλος στην κατηγορία 4 το περιβάλλον ποικίλει, οπότε προτείνεται διαφορετική αντιμετώπιση για κάθε περίπτωση.

Πίνακας 2.1: Περιπτώσεις διάβρωσης χάλυβα ανάλογα με το περιβάλλον

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟΤΗΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ
0	Καμία	Ξηροί εσωτερικοί χώροι με υγρασία <60%
1	Αμελητέα	Εσωτερικοί μη θερμαινόμενοι αεριζόμενοι χώροι
2	Μέτρια	Εσωτερικοί χώροι με κυμαινόμενη υγρασία
3	Μεγάλη	Πάνω από υδροφόρους ορίζοντες και δίπλα σε ακτές ή πυκνοκατοικημένες περιοχές
4	Πολύ μεγάλη	Μόνιμα υγρό περιβάλλον

Ο ρυθμός διάβρωσης εξαρτάται επίσης και από τις εποχές, καθώς τους θερινούς μήνες εμφανίζεται αυξημένος κατά 50% σε σχέση με τη χειμερινή περίοδο. Η μορφή και ο ρυθμός της διάβρωσης μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση μιας ναυπηγικής κατασκευής σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.2) εμφανίζεται ο ρυθμός της διάβρωσης σε πέντε διαφορετικές περιπτώσεις:

Πίνακας 2.2: Ο ρυθμός διάβρωσης ανάλογα με τις συνθήκες (Παντελής & Τσιούρβα, 2012)

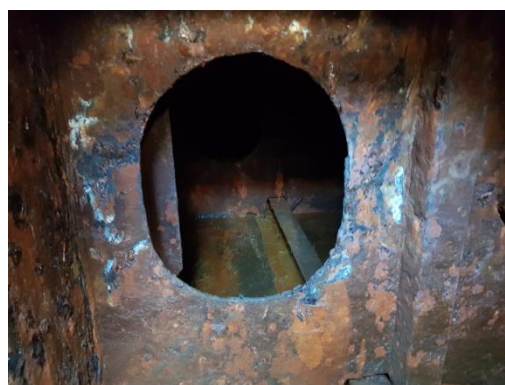
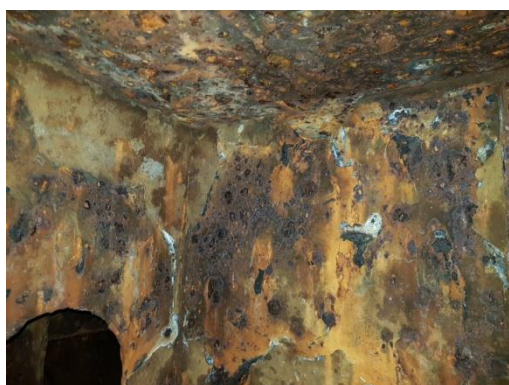
Κατηγορία	Ρυθμός διάβρωσης (σε mm/year)
Ατμοσφαιρική Ζώνη	0.128
Ζώνη Ψεκασμού	0.272
Ζώνη Παλίρροιας	0.083
Ζώνη Βύθισης	0.09
Υπό του θαλασσινού πυθμένα	0.075

Σε ότι αφορά τα πλοία, γενικά μπορούμε να πούμε ότι η διάβρωση συμβαίνει σχεδόν σε όλα τα μέρη ενός πλοίου, με διαφορετικούς ρυθμούς. Τα κύττη των πλοίων είναι ιδιαίτερα εκτεθειμένα στα διαβρωτικά περιβάλλοντα, με τα βυθισμένα ή εκτεθειμένα τμήματα, όπως οι δεξαμενές έρματος και οι σωληνώσεις να επηρεάζονται περισσότερο. Γενικά, τα μέρη του πλοίου που είναι πιο εκτεθειμένα στη διάβρωση είναι: (IACS, 2015)

- η εξωτερική επιφάνεια της γάστρας,
- το πηδάλιο,
- ο άξονας της προπέλας, (Εικ. 2.7)
- η τρόπιδα – καρίνα,
- οι δεξαμενές φορτίου,
- η δεξαμενή έρματος (Εικ. 2.8)
- οι αγωγοί που φέρουν το έρμα



Εικ. 2.7: Διάβρωση προπέλας [14]



Εικ. 2.8: Διάβρωση διπύθμενων

Όσον αφορά τις κατασκευές εξόρυξης υδρογονανθράκων, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι υπεράκτιες κατασκευές, οι οποίες αντιμετωπίζουν διαφόρων ειδών κινδύνους, όπως οι έντονοι κυματισμοί, οι δυναμικές φορτίσεις και η βιολογική ρύπανση. Η υψηλή συγκέντρωση χλωριούχου νατρίου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διάβρωση κραμάτων σιδήρου-χρωμίου και χαλύβων με μίγμα νικελίου-χρωμίου-μολυβδαινίου-βαναδίου, καθώς αυξάνει την επιδεκτικότητα της σπηλαιώδους διάβρωσης, καθώς προκαλεί αύξηση της υδροστατικής πίεσης. (Zhang, 2009) (Yang, 2010) (Liu, 2012)

Η αύξηση της υδροστατικής πίεσης επιταχύνει το ρυθμό της διάβρωσης στην επιφάνεια του χάλυβα, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για χάλυβες νικελίου-χρωμίου-μολυβδαινίου-βαναδίου. (Yang, 2010)

Βέβαια η θάλασσα αποτελεί ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο σύστημα ιδιαίτερα στα μεγάλα βάθη. Διάφοροι παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως όπως τα θαλάσσια ρεύματα, η αιωρούμενη λάσπη, η θαλάσσια

χλωρίδα, τα σουλφίδια και τα ανθρακικά άλατα, καθώς και η αποσύνθεση του οργανικού υλικού. Αυτοί οι παράγοντες πρέπει να εξετάζονται ως σύνολο κι όχι μόνο ξεχωριστά, λόγω των πολύπλοκων και συνεργατικών δράσεών τους, αλλά και γιατί ο τρόπος που επιδρά καθένας από αυτούς στο φαινόμενο της διάβρωσης δεν είναι πάντα διακριτός. Διάφορες έρευνες που αφορούν τη διάβρωση του μαλακού χάλυβα σε ρηχά και βαθιά νερά έχουν δείξει ένα ρυθμό διάβρωσης από 0.15-0.31 έως και 0.02-0.06 mm/year. (Sawant, 1993)

Μια άλλη έρευνα έδειξε ότι σε σιδηρούχα κράματα, εκτιθέμενα για 68 μέρες στο νερό, ο ρυθμός διάβρωσης ήταν γύρω στα 0.35 mm/ year στα ρηχά νερά, και 0.05 mm/ year στα βαθιά νερά, με το μέγιστο ρυθμό διάβρωσης να λαμβάνει χώρα σε βάθη των 500 μέτρων. Ωστόσο, η μεταβολή των τιμών του pH ανάλογα με το βάθος της θάλασσας δεν φάνηκε να επηρεάζει άμεσα τη διάβρωση των μετάλλων και των κραμάτων τους. (Traverso, 2008) (Little & Lee, 2007)

Τέλος, το διοξείδιο του άνθρακα φαίνεται ότι επηρεάζει σημαντικά το ρυθμό της διάβρωσης, καθώς επιδρά στο εάν θα αποθεθεί στις μεταλλικές επιφάνειες ένα ειδικά προστατευτικό ασβεστώδες στρώμα. (Venkatesan, 2002)

Γενικά, το θαλάσσιο νερό σε μεγάλα βάθη των ωκεανών έχει συνήθως χαμηλή περιεκτικότητα σε ανθρακικά ιόντα, γεγονός που συνεπάγεται τη μείωση της πιθανότητας σχηματισμού ασβεστώδους προστατευτικού στρώματος. (Shifler, 2005)

2.6 ΟΙ ΤΥΠΟΙ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

Οι διάφοροι τύποι διάβρωσης σχέση με τη μορφή που εμφανίζουν διακρίνονται ανάλογα με: (Μπατής, 1999) (Λεκάτου 2022)

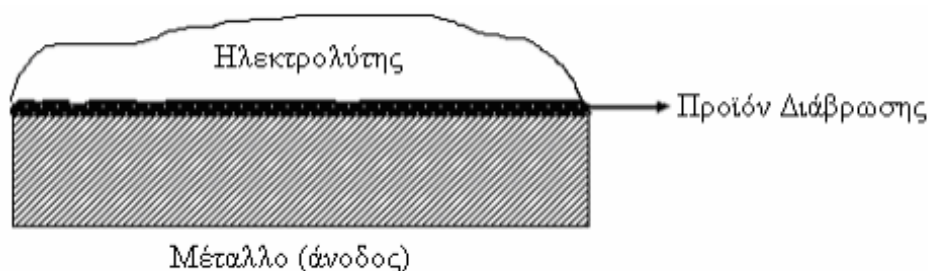
- *Το διαβρωτικό περιβάλλον*, το οποίο μπορεί να χαρακτηριστεί ως υγρό (θαλάσσιο ή αέριο με μεγάλο ποσοστό υγρασίας) ή ξηρό το οποίο περιλαμβάνει αντιδράσεις με αέρια υψηλής θερμοκρασίας.
- *Τον μηχανισμό διάβρωσης*, ο οποίος περιλαμβάνει ηλεκτροχημικές ή απευθείας χημικές αντιδράσεις.
- *Την εμφάνιση του διαβρωμένου μετάλλου*, αν αυτή γίνεται ομοιόμορφα σε ολόκληρη την επιφάνεια ή είναι τοπικού χαρακτήρα και επηρεάζει μικρές

περιοχές. Η διάκριση αυτή γίνεται είτε οπτικά με γυμνό μάτι είτε με τη χρήση μικροσκοπίου ή γενικά μεγεθυντικού μέσου.

Παρόλο που δεν υπάρχει ενιαίο σύστημα κατάταξής τους, είναι δυνατή η κατάταξη της διάβρωσης σε δύο τύπους με βάση την αιτία και με βάση τον τρόπο της. Με βάση την αιτία που προκαλεί τη διάβρωση, διακρίνονται η ηλεκτροχημική, μηχανική και βιολογική διάβρωση, ενώ ανάλογα με τον τρόπο εκδήλωσης της διάβρωσης, αναφέρονται η ομοιόμορφη, σπηλαιώδης, περικρυσταλλική και επιλεκτική διάβρωση. Επίσης, στην κατηγορία αυτή μπορούμε να αναφέρουμε και τη διάβρωση που γίνεται με βελονισμούς, καθώς και τη διάβρωση υπό μηχανική τάση. Παρακάτω αναλύονται οι πιο κοινοί τύποι διάβρωσης, οι οποίοι θεωρητικά είναι διαφορετικοί μεταξύ τους, πρακτικά όμως μπορούν να συνδυάζονται ή και να ταυτίζονται σε ορισμένες περιπτώσεις.

Ομοιόμορφη διάβρωση

Αποτελεί το πιο κοινό είδος διάβρωσης (Εικ. 2.9), το οποίο καταστρέφει ομοιόμορφα το μέταλλο μέσω ηλεκτροχημικής διαδικασίας δημιουργώντας έτσι ένα ομοιόμορφο στρώμα ως προϊόν που είτε παραμένει στην διαβρωμένη επιφάνεια είτε μεταφέρεται. Η διαδικασία αυτή είναι το αποτέλεσμα της δράσης όξινου ή θερμού αλκαλικού διαλύματος πάνω στο μέταλλο ή της οξειδωσης που οφείλεται σε έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες (ξηρή ατμόσφαιρα). Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα κυρίως σε θαλάσσιο ή ατμοσφαιρικό περιβάλλον. (Μαργαρίτης και Χαλίτι, 2018)



Εικ. 2.9: Επιφάνεια μετάλλου με ομοιόμορφη διάβρωση [15]

Ηλεκτροχημική ή γαλβανική διάβρωση

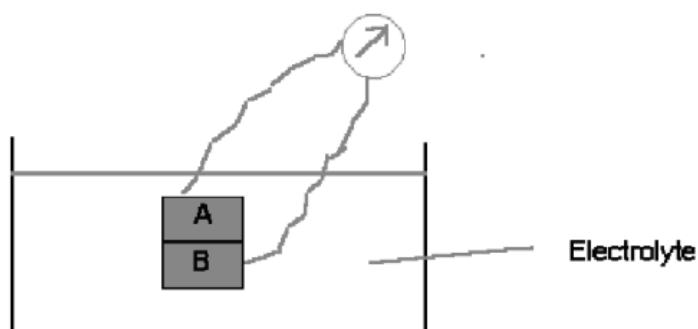
Όταν γίνει επαφή μεταξύ δύο μετάλλων (Εικ. 2.10) μέσω εμβάπτισης με ένα αγώγιμο υγρό (ηλεκτρολύτης), τότε το πιο ηλεκτροθετικό μέταλλο υφίσταται διάβρωση (άνοδος) ενώ το λιγότερο ηλεκτροθετικό (κάθοδος) παραμένει άθικτο. Η ηλεκροχημική διάβρωση συναντάται σε σημεία συνδέσεων των μετάλλων ή σε μέρη όπου μέταλλα ενώνονται με άλλα, όπως στις επαφές που δημιουργούνται ανάμεσα στις χαλύβδινες βίδες και τον ορείχαλκο σε θαλάσσιο περιβάλλον.

Η διάβρωση αυτή εξαρτάται από:

- ο τη διαφορά της δραστηρότητας των δύο μετάλλων,
- ο την αναλογία της επιφάνειας επαφής των δυο υλικών και
- ο την αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη.

Στην πρώτη περίπτωση όσο πιο γειτονικά είναι τα μέταλλα στη σειρά δραστηρότητας, τόσο μικρότερη είναι η έκταση του φαινομένου (βαθμός διάβρωσης). Στην δεύτερη περίπτωση όταν η επιφάνεια της ανόδου είναι μικρότερη από την κάθοδο, τόσο πιο έντονη θα είναι η διάβρωση.

Μια μέθοδος αντιμετώπισης της ηλεκτροχημικής διάβρωσης είναι η χρήση μονωτικών φλαντζών, που εγκυμονεί τον κίνδυνο πρόκλησης διάβρωσης με την παρουσία χλωριόντων. Εναλλακτικά, προτείνεται η σύνδεση ενός πιο δραστηκού (ανοδικού) μετάλλου, το οποίο θα υποστεί τη διάβρωση και θα προστατεύσει το υλικό με το οποίο θα συνδεθεί, ως εναλλακτική λύση κατά της ηλεκτροχημικής διάβρωσης σε περιβάλλον χλωριόντων. (Μαργαρίτης και Χαλίτι, 2018)



Εικ. 2.10: Γαλβανική διάβρωση μετάλλων [16]

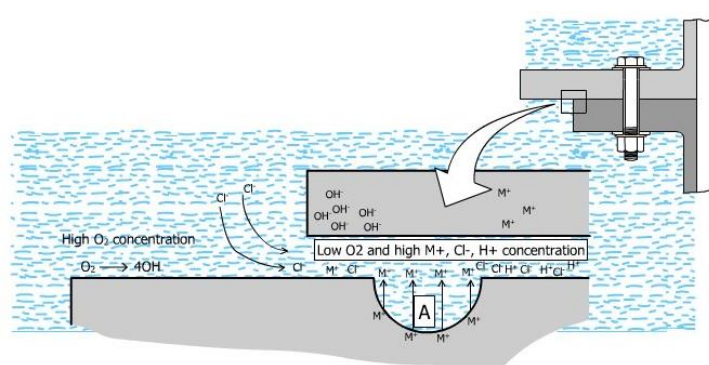
Διάβρωση χαραγών και σπηλαιώδης διάβρωση

Η διάβρωση χαραγών (Εικ. 2.11) έχει τον ίδιο μηχανισμό γένεσης με τη γαλβανική διάβρωση με τη διαφορά ότι η αιτία εμφάνισης αυτού του είδους διάβρωσης είναι μια σχισμή στη μεταλλική επιφάνεια. Το διάλυμα εισχωρεί σε αυτή τη σχισμή όπου και παραμένει (Εικ. 2.12) μέχρι που το οξυγόνο μειώνεται αρκετά και τότε ξεκινά η οξείδωση του μετάλλου και τα ηλεκτρόνια που διαφεύγουν οδηγούνται σε παράπλευρες περιοχές. Μέσα στην εσοχή αναπτύσσονται μεγάλες συγκεντρώσεις ιόντων υδρογόνου και χλωρίου με ιδιαίτερα διαβρωτικό χαρακτήρα. Η σχισμή ή οι σχισμές μπορεί να οφείλονται είτε σε προβλήματα κατά τον αρχικό σχεδιασμό του κατασκευαστικού στοιχείου είτε σε ατέλειες εξαιτίας της μεθόδου κατασκευής.

Για την αποφυγή της διάβρωσης αυτής χρησιμοποιείται συγκόλληση με τήξη, βίδωμα με αρμούς ή προτείνεται η χρήση φλαντζών, οι οποίες διασφαλίζουν την πλήρη αποστράγγιση. Επίσης, η χρήση οξυγονοκολλημένων επιστρωμάτων από αντιδιαβρωτικά κράματα και η αποφυγή επαφής του μετάλλου με πλαστικά, υφάσματα και ξένα σώματα συμβάλλουν στην αποτροπή της διάβρωσης αυτού του είδους. (Μαργαρίτης και Χαλίτι, 2018)



Εικ. 2.11: Σπηλαιώδης διάβρωση σε βίδα χρησιμοποιούμενη σε άξονα μετάδοσης



Εικ. 2.12: Αναπαράσταση σπηλαιώδους διάβρωσης [17]

Διάβρωση οπών

Η διάβρωση αυτού του είδους (Εικ. 2.13) παρουσιάζεται σε περιορισμένη έκταση στο μέταλλο και εξελίσσεται τοπικά σχηματίζοντας εσοχές και κρατήρες, και προκαλεί καταστροφή λόγω διάτρησης. Συνήθως συμβαίνει σε περιβάλλον με διαλύματα χλωριόντων προκαλώντας έτσι την καταστροφή του προστατευτικού στρώματος πάνω στην επιφάνεια του χάλυβα, οπότε σχηματίζονται μικροσκοπικές εσοχές, που στην συνέχεια γίνονται ρωγμές, οι οποίες μετά από κάποια σχετικά μικρή καταπόνηση, μπορούν να εξελιχθούν με μεγάλη ταχύτητα και να έχουν καταστρεπτικά αποτελέσματα. Παρατηρείται συχνά σε συγκολλήσεις αντικειμένων από ανοξείδωτο χάλυβα, όπου αναφέρονται προβλήματα διάβρωσης οπών.

Το φαινόμενο αυτό υπάρχει πιθανότητα να συμβεί ακόμα και σε μικρή θερμοκρασία, αλλά επηρεάζεται ιδιαίτερα από τη συγκέντρωση των χλωριόντων, το χαμηλό pH, την υψηλή θερμοκρασία και η ύπαρξη στάσιμου διαλύματος. Οι χάλυβες παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή σε αυτό το είδος διάβρωσης με την αύξηση της συγκέντρωσης του χρωμίου και του μολυβδαινίου.

Επιπλέον, η αύξηση της περιεκτικότητας του αζώτου λειτουργεί θετικά για τους οστενιτικούς και τους διφασικούς χάλυβες. Λείες επιφάνειες αποτρέπουν τη δημιουργία κοιλοτήτων, κι επίσης οι κατασκευές που επιτρέπουν την αποστράγγιση των υγρών καθώς αποτρέπουν με αυτόν τον τρόπο τη δημιουργία στάσιμων διαλυμάτων. (Τσάλτας, 2007)

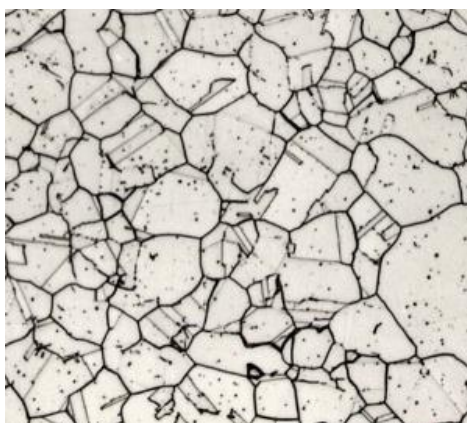


Εικ. 2.13: Διάβρωση με βελονισμούς σε χάλυβα [18]

Περικρυσταλλική διάβρωση

Αυτού του είδους η διάβρωση εμφανίζεται στα όρια των κόκκων του ανοξείδωτου χάλυβα λόγω θέρμανσης μεταξύ 550-850°C με αποτέλεσμα τη δημιουργία καρβιδίων του χρωμίου (Εικ. 2.14). Το καρβίδιο συνήθως προστίθεται στην θέση του οξειδίου του χρωμίου με ταυτόχρονη μείωση της διάχυσης στον ωστενίτη, καθιστώντας έτσι τα όρια μεταξύ κρυστάλλων ευάλωτα στη διάβρωση, με αποτέλεσμα ο χάλυβας να μην προστατεύεται.

Η περιεκτικότητα του χάλυβα σε άνθρακα παίζει καθοριστικό ρόλο στη περικρυσταλλική διάβρωση καθώς ανοξείδωτος χάλυβας με 0,06% με περιεκτικότητα σε άνθρακα μπορεί να δεχθεί περικρυσταλλική διάβρωση μέσα σε χρόνο 2 λεπτών στους 700°C, ενώ για περιεκτικότητες σε άνθρακα μικρότερες από 0,03% μειώνεται ο κίνδυνος της περικρυσταλλικής διάβρωσης. Περικρυσταλλική διάβρωση συμβαίνει με την συγκόλληση ανοξείδωτου χάλυβα λόγω της υπερθέρμανσης του μετάλλου. (Καβέτσος και Κολώτας, 2014)



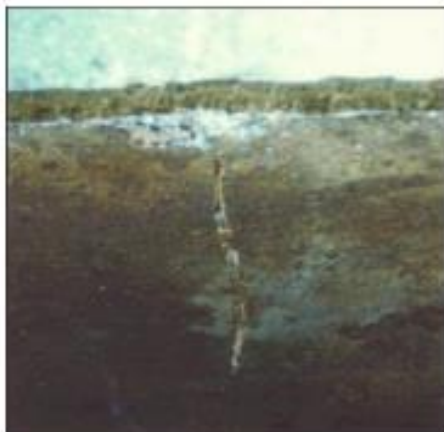
Εικ. 2.14: Περικρυσταλλική διάβρωση σε ανοξείδωτο χάλυβα [19]

Επιλεκτική διάβρωση (αποκραμάτωση)

Σ' αυτού του είδους τη διάβρωση ένα στοιχείο του κράματος απομακρύνεται επιλεκτικά λόγω των διεργασιών της διάβρωσης. Τα μεταλλικά στοιχεία που είναι λιγότερο ευγενή υπόκεινται στη διάβρωση ενώ τα υπόλοιπα διατηρούν τη μεταλλική τους φύση αλλά με μειωμένη τη μηχανική αντοχή τους.

Η αντίσταση στη διάβρωση είναι ανάλογη της διεργασίας σύνθεσης του κράματος και αυξάνεται με την ποσότητα του πιο ευγενούς συστατικού. Χαρακτηριστικό

παράδειγμα αποκραμάτωσης αποτελεί η αποψευδαργύρωση του ορείχαλκου (Εικ. 2.15), όπου παρατηρείται μειωμένη μηχανική αντοχή και αλλαγή του χρώματος του κράματος από κιτρινωπό σε κόκκινο χρώμα του χαλκού. (Καρύδης, 2002)



Εικ. 2.15: Αποψευδαργύρωση που οδηγεί σε ρωγμή [20]

Διάβρωση φθοράς λόγω ροής

Η διάβρωση φθοράς είναι συνδυασμός χημικής προσβολής και μηχανικής απόξεσης λόγω της ροής του διαβρωτικού μέσου. Σχεδόν όλα τα μέταλλα παρουσιάζουν ευαισθησία σ' αυτού του είδους τη διάβρωση. Για κράματα μετάλλων που παθητικοποιούνται με προστατευτικά επιστρώματα υπάρχει ο κίνδυνος φθοράς τους λόγω απόξεσης με αποτέλεσμα μέρος της επιφάνειας να μένει εκτεθειμένη στο διαβρωτικό περιβάλλον. Το φαινόμενο οδηγεί στη δημιουργία αυλακώσεων και κυματώσεων με χαρακτηριστικά τα σημάδια της ροής του ρευστού.

Η φύση του ρευστού και η ταχύτητα του εντείνουν τη διάβρωση, καθώς επίσης η παρουσία φυσαλίδων και αιωρούμενων σωματιδίων δημιουργούν εσοχές, σπήλαια και κρατήρες και έτσι καταστρέφουν το κράμα. Η διάβρωση αυτή συναντάται στη ναυτική τεχνολογία, όπως σε προπέλες, λεπίδες τουρμπινών, φτερωτές αντλιών πλοίων (Εικ. 2.16) καθώς επίσης και σε σημεία σωληνώσεων που παρατηρείται αλλαγή μεγέθους και διεύθυνσης της ροής του ρευστού.



Εικ. 2.16: Διάβρωση φθοράς λόγω ροής σε προπέλα πλοίου [21]

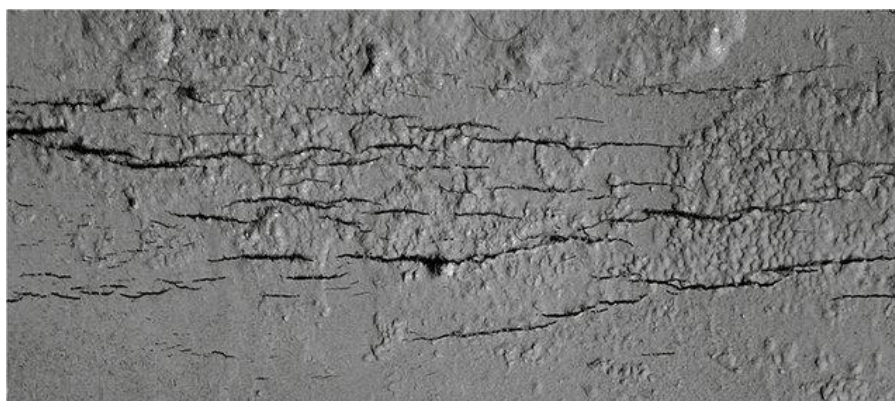
Αυτού του είδους η διάβρωση (Εικ. 2.17) συμβαίνει όταν ο ανοξείδωτος χάλυβας καταπονείται μηχανικά (δηλαδή υφίσταται τάσεις) σε διαβρωτικό περιβάλλον, όπως σε χλωριούχα διαλύματα. Αναλόγως το είδος των τάσεων διακρίνονται σε:

1. Μηχανική δράση υγρού πάνω στο μέταλλο, όπου διακρίνονται οι υποκατηγορίες της διάβρωσης ρευστού και της σπηλαιώδους διάβρωσης. Στην πρώτη περίπτωση η φθορά γίνεται λόγω σχετικής κίνησης του διαβρωτικού υγρού με την μεταλλική επιφάνεια, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η διάβρωση γίνεται λόγω παρουσίας φυσαλίδων στο υγρό, οι οποίες προσκρούουν πάνω στην μεταλλική επιφάνεια με μεγάλη πίεση.
2. Μηχανική δράση στερεού σώματος στο μέταλλο. Σε αυτή την περίπτωση η διάβρωση οφείλεται στην τριβή που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια μεταξύ των δυο σωμάτων λόγω ολίσθησης (Nimmro & Hinds, 2003). Αυτή η μορφή διάβρωσης προκαλείται από κάποιο φορτίο και παρουσία επαναλαμβανόμενης σχετικής επιφανειακής κίνησης ή δόνησης με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας του επιφανειακού στρώματος, τη δημιουργία αυξημένης τραχύτητας και μικροκοιλωμάτων που μειώνουν την αντοχή σε κόπωση. Η διάβρωση αυτή προκαλεί μηχανική φθορά και μεταφορά υλικού στην επιφάνεια, και ακολουθείται συχνά από οξείδωση τόσο των μεταλλικών υπολειμμάτων όσο και των πρόσφατα εκτεθειμένων μεταλλικών επιφανειών.
3. Μηχανικές δυνάμεις μέσα στο μέταλλο, όπου διακρίνονται οι υποκατηγορίες: της διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση, της βλάβης από υδρογόνο και της διάβρωσης κόπωσης. Η πρώτη περίπτωση είναι ένας συνδυασμός τοπικής προσβολής και εφελκυστικών τάσεων. Η δεύτερη οφείλεται στην προσρόφηση υδρογόνου από το μέταλλο. Η τρίτη περίπτωση είναι

συνδυασμός τοπικής διαβρωτικής προσβολής με εναλλασσόμενες κυκλικές τάσεις.

Η εργοδιάβρωση μπορεί επίσης να προκύψει λόγω εναπομενουσών τάσεων από τις διάφορες κατεργασίες στις οποίες υποβάλλεται το μέταλλο. Για να αποφευχθεί ή έστω να εξασθενίσει το φαινόμενο αυτό οι χάλυβες υποβάλλονται σε ανόπτηση και έτσι ανακτούν την αντοχή τους έναντι της διάβρωσης. (Kim, 2008)

Τέλος, οι δομικές ατέλειες στο κρυσταλλικό πλέγμα αποτελούν άλλον έναν παράγοντα που επηρεάζει την εργοδιάβρωση. Καθώς διαχέονται προς την μεταλλική επιφάνεια, καταστρέφουν τοπικά το προστατευτικό οξείδιο του χρωμίου δημιουργώντας ρωγμές (Εικ 2.18). Οι ωστενιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες με υψηλή περιεκτικότητα σε μολυβδαίνιο (>6%) και νικέλιο, είναι ανθεκτικοί στη διάβρωση αυτού του τύπου.



Εικ. 2.17: Αποικία ρωγμών από μηχανική διάβρωση στην εξωτερική επιφάνεια σωλήνα αερίου υψηλής πίεσης [22]



Εικ. 2.18: Αποικία ρωγμών από μηχανική διάβρωση στην εξωτερική επιφάνεια σωλήνα από ανοξειδωτο χάλυβα [23]

Βιολογική διάβρωση ή μικροβιολογικά επηρεασμένη διάβρωση

Η διάβρωση αυτού του είδους οφείλεται στην παρουσία διαφόρων μικροοργανισμών (βακτήρια, μύκητες κλπ.), οι οποίοι αναπτύσσονται κυρίως στο νερό ή σε υγρό περιβάλλον. Πρόκειται για οργανισμούς οξειδωτικούς / αναγωγικούς που συσχετίζονται με τη διάβρωση του σιδήρου και του ανοξειδώτου χάλυβα. Αυτού του είδους η διάβρωση παρατηρείται συνήθως σε δεξαμενές νερού και σε σωληνώσεις (Εικ. 2.19). Προκαλεί σοβαρές ενεργειακές απώλειες και δημιουργεί μεγάλα προβλήματα σε ανθρακούχους χάλυβες, σε ανοξειδώτους χάλυβες τύπου 300, στο χαλκό, στο χυτοσίδηρο και το αλουμίνιο. Επίσης, έχει σοβαρές επιπτώσεις σε κατασκευές από τσιμέντο και χάλυβα, δημιουργώντας αποθέσεις που προκαλούν μείωση της θερμικής αγωγιμότητας. Οι οργανισμοί παράγουν διαβρωτικές ουσίες που είτε επιδρούν στις ανοδικές και καθοδικές δράσεις, είτε προσβάλλουν προστατευτικά επιστρώματα ή αναστολείς.



Εικ. 2.19: Βακτηριακή διάβρωση σε χαλύβδινη επιφάνεια εκτεθειμένη σε θαλάσσιο περιβάλλον [24]

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.3) αναφέρονται όλοι οι τύποι διάβρωσης καθώς και μία μικρή περιγραφή αυτών.

Πίνακας 2.3: Συνοπτική παρουσίαση των τύπων διάβρωσης (Chigondo, 2016)

Type of corrosion	Description
Uniform corrosion	Deteriorates the whole surface of the metal and makes the surface thin.
Galvanic corrosion	Occurs with an electrolyte with metals having different values of electrical potentials.
Pitting corrosion	Occurs because of random attacks on particular parts of the metal's surface to form pits. The pit acts as the anode, while the undamaged part of the metal is the cathode.
Stress corrosion cracking	A complex form of corrosion which arises due to stress and corrosive environment.
Corrosion fatigue	A combination of cyclic stress and corrosion.
Intergranular corrosion	Corrosion occurs on or near the grain boundaries of a metal.
Crevice corrosion	Concentration cell corrosion due to the trapping of corrosive liquid between the gaps of the metal.
Filiform corrosion	Concentration cell corrosion on metallic surfaces coated with a thin organic film.
Erosion corrosion	Flow-assisted corrosion which is due to the movement of corrosive liquids on metal surface.
Fretting corrosion	A form of erosion-corrosion which shows the combined effect of corrosion and fretting of metal.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΧΑΛΥΒΑ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ & ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ. ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ ΦΙΛΙΚΟΙ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η προστασία των κραμάτων από τη διάβρωση είναι υψίστης σημασίας. Οι βασικοί λόγοι που χρειάζεται να γίνει πρόληψη διάβρωσης είναι οικονομικοί και περιβαλλοντικοί, αφού, όπως έχει αναφερθεί, το κόστος της συντήρησης ή και της αντικατάστασης των διαβρωθέντων υλικών είναι αρκετά υψηλό. Ζωτικής σημασίας είναι και η διατήρηση των φυσικών πόρων, της ενέργειας και των υλικών. Η λήψη μέτρων προστασίας και πρόληψης της διάβρωσης συμφέρει περισσότερο σε σχέση με την συντήρηση ή ακόμη και στην αντικατάσταση των αντικειμένων. Η προστασία μιας κατασκευής από τη διάβρωση ξεκινά από τον σχεδιασμό της, κατά τον οποίο γίνεται προσπάθεια να ελαχιστοποιηθούν όλοι οι παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν και να επιταχύνουν τη διάβρωση (Γαλανού, 2009) (Pantazopoulou et al. 2022). Στη συνέχεια, πρέπει να γίνεται σωστή επιλογή των υλικών, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητές τους και το διαβρωτικό περιβάλλον στο οποίο εκτίθενται. Επίσης, απαραίτητα μέτρα είναι τα παρακάτω: η επίβλεψη των κατασκευών, ο συστηματικός έλεγχος και η συντήρηση τους κατά τη λειτουργία της εγκατάστασης, καθώς και η παρακολούθηση της απόκρισης των μεθόδων προστασίας. Η τελευταία περίπτωση χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, διότι η λανθασμένη επιλογή μεθόδου προστασίας σε μια ορισμένη περίπτωση διάβρωσης μπορεί να οδηγήσει σε εντονότερη διάβρωση αντί να προστατεύσει την κατασκευή. Τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες παραγωγής, προστασίας και συντήρησης των χαλύβων με μεθόδους και υλικά κατάλληλα για κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι προστασίας αφορούν επιστρώσεις στα μέταλλα με τη χρήση οργανικών επιστρώσεων, με την χρήση της καθοδικής προστασίας και με τη χρήση οργανικών ή ανόργανων αναστολέων. Γενικά, η συμπεριφορά ενός χάλυβα στη διάβρωση και ο τομέας της εφαρμογής του καθορίζουν και τον τρόπο προστασίας του. Η βέλτιστη μέθοδος προστασίας καθορίζεται επίσης από το κόστος και την απόδοση της μεθόδου ή του υλικού σε σχέση με τη διάβρωση. Το κόστος των υλικών ποικίλει και γενικά περιλαμβάνει το κόστος της παραγωγής, του σχεδιασμού και της κατασκευής (υλικά, επίστρωμα, στεγανωτικές ουσίες, αναστολείς, καθοδική προστασία). Επίσης, δεν πρέπει να παραβλέπονται το κόστος της εργασίας, του εξοπλισμού και της αντικατάστασης ή

της διαχείρισης του υλικού αυτού. Είναι σημαντικό να τονιστεί και η δράση που έχουν τα υλικά προς το περιβάλλον όταν αυτά φθαρούν ή λήξει ο χρόνος ζωής τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το χρώμιο και οι ενώσεις του στους χάλυβες, οι οποίες, παρόλο που έχουν αντιδιαβρωτικό χαρακτήρα, έχουν επίσης αρνητική επίδραση τόσο στο περιβάλλον, όσο και στον άνθρωπο λόγω της μεγάλης τους τοξικότητας. (Γαλανού, 2009)

3.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Η κατάλληλη μέθοδος προστασίας του χάλυβα από τη διάβρωση θα πρέπει επιλέγεται σε σχέση με το είδος διάβρωσης, καθώς και τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον διάβρωσης. Όσον αφορά στο περιβάλλον πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στις εναλλαγές του, στην παρουσία διαλυμένου οξυγόνου (σε υγρό περιβάλλον) και στη ρύθμιση του pH.

Το βασικό κριτήριο, που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι το δυναμικό της διάβρωσης, εξαιτίας της δημιουργίας γαλβανικών στοιχείων ανάμεσα στις δυο μεταλλικές επιφάνειες. Επίσης, ιδιαίτερη σημασία έχουν το διαβρωτικό περιβάλλον και η ταχύτητα της διάβρωσης, η οποία επηρεάζεται από την ένταση του ρεύματος της διάβρωσης. Συνεπώς, βασικοί στόχοι κατά τη λήψη μέτρων προστασίας από τη διάβρωση πρέπει να είναι η μείωση του δυναμικού της διάβρωσης και η ελάττωση της έντασης του ρεύματος διάβρωσης. Οι βασικές μέθοδοι για την προστασία από τη διάβρωση είναι (Kraus, 2006):

- **Μείωση του δυναμικού της διάβρωσης.**

Η κατηγορία περιλαμβάνει τις άμεσες και τις έμμεσες μεθόδους.

α) Άμεσες μέθοδοι: οι μέθοδοι αυτοί έχουν σκοπό τη μείωση του δυναμικού της διάβρωσης των μετάλλων με αποτέλεσμα αυτά να εμφανίζουν μικρότερη προδιάθεση στη διάβρωση.

Οι κυριότερες άμεσες μέθοδοι είναι οι παρακάτω: (Τσουλάκος, 2013)

I) Μέθοδος θυσιαζόμενων ηλεκτροδίων (ανόδων):

Τα ανόδια είναι πλακίδια από μέταλλο πιο ανοδικό από αυτό που επιθυμούμε να προστατεύσουμε, τα οποία τοποθετούνται στην επιφάνεια της κατασκευής. Το μέταλλο που χρησιμοποιείται είναι το μαγνήσιο, ο ψευδάργυρος ή το αλουμίνιο,

καθώς είναι λιγότερο ευγενή σε σχέση με το χάλυβα. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται γαλβανικό στοιχείο μεταξύ του θυσιαζόμενου μετάλλου και του χάλυβα, με άμεση συνέπεια την οξείδωση του ανοδικότερου μετάλλου. Συνεπώς, για όσο διάστημα διαρκεί η σύνδεση με το ανοδικό μέταλλο, ο χάλυβας είναι προστατευμένος. Για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη προστασία απαιτείται πολύ καλός καθαρισμός της χαλύβδινης επιφάνειας, ούτως ώστε να υπάρχει τέλεια επαφή του ανοδίου και να μην παρεμβάλλεται κάποιο ξένο σώμα. Κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής αποτελεί η αδυναμία μηδενισμού του δυναμικού της διάβρωσης.

II) Καθοδική προστασία με εξωτερική τάση:

Σύμφωνα με τη αυτή τη μέθοδο, ο αρνητικός πόλος μιας εξωτερικής τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος συνδέεται με μια πηγή κατάλληλα μονωμένου αγωγού και ο θετικός πόλος συνδέεται μέσω ηλεκτροδίου, τοποθετημένο στο διαβρωτικό περιβάλλον. Εάν η μέθοδος αυτή εφαρμοστεί υπό λανθασμένες συνθήκες, τότε ενδέχεται να επιταχύνει τη διαδικασία της διάβρωσης. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη μέθοδος είναι αποτελεσματικότερη, ειδικά αν συνδυαστεί με αντιδιαβρωτικά χρώματα.

β) Έμμεσες μέθοδοι: μέσω αυτών των μεθόδων μπορεί να επιτευχθεί προστασία από την επιφάνεια σχηματίζοντας επιστρώσεις στο μέταλλο, που έχουν διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες. Στις επιστρώσεις αυτές η προδιάθεση στη διάβρωση είναι μικρή, καθώς το δυναμικό της διάβρωσης είναι χαμηλό. Οι μέθοδοι αυτές καθυστερούν τη διάβρωση, αλλά μπορούν να παρουσιάσουν σοβαρά μειονεκτήματα όπως η εμφάνιση διάβρωσης λόγω ατελειών ή λόγω ρήξης του προστατευτικού στρώματος. Οι κυριότερες έμμεσες μέθοδοι είναι οι παρακάτω:

I) Εναζώτωση, φωσφάτωση, ενανθράκωση, εμποτισμοί:

Οι μέθοδοι αυτές πρέπει να εφαρμόζονται με μεγάλη προσοχή για να δίνουν ένα ομοιόμορφο προστατευτικό στρώμα. Σε σημεία ακάλυπτα δημιουργούνται γαλβανικά στοιχεία τα οποία επιταχύνουν τη διάβρωση.

II) Επιμεταλλώσεις:

Πρόκειται για μεθόδους προστασίας σύμφωνα με τις οποίες η επιφάνεια του μετάλλου επικαλύπτεται από ένα άλλο μέταλλο λιγότερο επιρρεπές στη διάβρωση με αποτέλεσμα τη μείωση του δυναμικού της διάβρωσης του βασικού μετάλλου. Η

επιμεταλλώση μπορεί να πραγματοποιηθεί με εμβάπτιση τετηγμένου μέταλλο, ψεκασμό λιωμένου μετάλλου, με θερμική διάχυση, ηλεκτρολυτική απόθεση από διάλυμα ή τετηγμένου άλατος και μεθόδους σκόνης μεταλλουργίας. Για βέλτιστη προστασία απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η καλή γνώση της υφής του στρώματος εναπόθεσης. Τα σημαντικότερα μέταλλα που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής: Zn, Cd, Al, Ni, Cu, Pb και Sn. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος σε αυτόν τον τομέα αφορά τη χρήση ψευδαργύρου που δρα ως θυσιαζόμενη κάθοδος με μεγάλο χρόνο ζωής. Η προστασία με κάδμιο εφαρμόζεται λιγότερο. Αντίθετα το αλουμίνιο, όπως και το νικέλιο, παραμένει παθητικοποιημένο στις περισσότερες ατμόσφαιρες, αλλά η παθητικότητα του υποβαθμίζεται από την υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων. Συχνή είναι και η χρήση του κασσίτερου για προστασία, ενώ ο μόλυβδος δεν χρησιμοποιείται παρά μόνο σε μικρά αντικείμενα.

III) Επικαλυμμένος Χάλυβας με Fe_3O_4 και κραμάτων αλουμινίου με $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$:

Αυτή η μέθοδος παρέχει καλή πρόσφυση, υψηλή μηχανική αντοχή, υψηλή σκληρότητα και χωρίς πόρους.

IV) Ανοδική προστασία:

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο η κατασκευή φορτίζεται θετικά μέσα σε διαλύματα κατάλληλα επιλεγμένων οξέων με αποτέλεσμα να δημιουργούνται οξειδία του μετάλλου που προστατεύουν την κατασκευή. Η μέθοδος απαιτεί τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας (τάση DC ή ρεύμα), και εμφανίζει εφαρμογή στα μέταλλα που δέχονται παθητικοποίηση, όπως τα Fe, Cr, Ti, Ni και τα κράματα τους.

- **Μείωση του ρεύματος της διάβρωσης:**

Σύμφωνα με αυτή την μέθοδο, ελαττώνεται η ένταση του ρεύματος της διάβρωσης και κατ' επέκταση προκαλείται ελάττωση του δυναμικού της διάβρωσης με έμμεσο τρόπο, εξαιτίας της χρήσης ουσιών που εμφανίζουν αυξημένη ηλεκτρική αντίσταση. Βασική προϋπόθεση αποτελεί η προσρόφηση των ουσιών αυτών στην επιφάνεια που επιθυμούμε να προστατευτεί. Για το λόγο αυτό η επιφάνεια πρέπει να είναι τραχιά. Επίσης, σημαντική προϋπόθεση αποτελεί ο καθαρισμός της επιφάνειας από οξειδία ή άλλες ουσίες που μπορούν να γίνουν αιτίες για την εμφάνιση γαλβανικών στοιχείων.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται με τους παρακάτω τρόπους: (Τσουλάκος, 2013)

α) Επικάλυψη με αντιδιαβρωτικά χρώματα που περιέχουν ουσίες με μόρια μεγάλης αντίστασης, σκόνες μετάλλων ή οξειδία:

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, για να γίνει η επίστρωση, αρχικά η επιφάνεια του μετάλλου πρέπει να καθαριστεί από διάφορα οξειδία και άλλες ακαθαρσίες. Παραδείγματα αντιδιαβρωτικών χρωμάτων που χρησιμοποιούνται συχνά είναι όσα χρησιμοποιούν πιγμέντα, που περιέχουν κατάλληλα μέταλλα ή οξειδία αυτών (όπως Zn, Al, Mg για την περίπτωση του χάλυβα), καθώς επίσης χλωριωμένο καουτσούκ και διάφορες πολυμερείς ουσίες που παράγονται από εποξειδία, πολυουρεθάνες, πολυεστέρες, ρητίνες μελαμίνης φορμαλδεΰδης, πολυακρυλικά και φαινολικά πολυμερή (Εικ. 3.1). Ο κύριος σκοπός των αντιδιαβρωτικών επιστρώσεων είναι η προστασία των μετάλλων από τη θαλάσσια διάβρωση. Για να είναι αποτελεσματικά σε περιβάλλον αλάτων, θα πρέπει να παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στη μεταφορά ιόντων. Το μεγάλο πάχος τους, η απουσία πόρων, η καλή συνάφεια, η σκληρότητα, η συνοχή, η αντίσταση στο νερό, η χημική αντίσταση σε αλκαλικά διαλύματα και η χαμηλή απορρόφηση υγρασίας είναι μερικές από τις ιδιότητες που πρέπει να έχει ένα αντιδιαβρωτικό χρώμα για να εξασφαλίζει την καλύτερη προστασία του μετάλλου από τη διάβρωση.



Εικ. 3.1: Σκόνη ψευδαργύρου [25].

β) Χρήση επιβραδυντών ή αναστολέων της διάβρωσης:

Οι ουσίες αυτές προστίθενται στο διαβρωτικό περιβάλλον και αναστέλλουν τις ανοδικές ή καθοδικές δράσεις στην επιφάνεια του μετάλλου με τους εξής τρόπους:

- Με τη δημιουργία παθητικού οξυγονούχου στρώματος.
- Με ρόφηση ουσιών (κυρίως οργανικές μεγαλομοριακές ενώσεις) στα ενεργά κέντρα των επιφανειών.
- Με καθυστέρηση έκλυσης H_2 , η οποία οδηγεί σε ψαθυρή θραύση, με την προσθήκη ιόντων As ή Sb.
- Με απομάκρυνση του O_2 , με SO_2 (θειώδες οξύ) ή με υδραζίνη.

Χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις όπου η μεταλλική επιφάνεια βρίσκεται σε άμεση επαφή με το διαβρωτικό περιβάλλον. Μία τέτοια περίπτωση είναι το θαλάσσιο περιβάλλον.

γ) Επίστρωση με διάφορες ουσίες που δρουν ως φραγμός:

Το μέταλλο επικαλύπτεται με ουσίες που δρουν ως φραγμός μεταξύ αυτού και του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Οι επικαλυπτικές ουσίες είναι ανοδικά οξείδια, κεραμικές επικαλύψεις και εμαγιέ. (Τσουλάκος, 2013)

3.3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Η σωστή προετοιμασία της μεταλλικής επιφάνειας είναι πολύ σημαντική γιατί με αυτό τον τρόπο μπορούμε να επιτύχουμε την ορθή εφαρμογή της κατάλληλης αντιδιαβρωτικής προστασίας και κατά συνέπεια μεγάλη διάρκεια ζωής στην επίστρωση και στην προστατευόμενη επιφάνεια. Αντίθετα, εάν υπάρχουν ακαθαρσίες επάνω στην μεταλλική κατασκευή, είναι δυνατό να οδηγήσουν στον σχηματισμό των γαλβανικών στοιχείων, που με τη σειρά του μπορεί να προκαλέσει διάβρωση με βελονισμούς και να οδηγήσει στην ρήξη και στην καταστροφή της κατασκευής. Μια σωστή προετοιμασία της μεταλλικής επιφάνειας εξασφαλίζεται με τον καλό καθαρισμό και να δημιουργηθούν οι κατάλληλες συνθήκες για να δημιουργηθεί μια ισχυρή πρόσφυση ανάμεσα στην επίστρωση και στο μέταλλο. Ως ακαθαρσίες μπορούμε να θεωρήσουμε τα διάφορα συστατικά τα οποία παραμένουν πάνω στην μεταλλική επιφάνεια, ακόμα και μετά την διαδικασία του καθαρισμού και μπορούν

να επιδράσουν αρνητικά στην κατάσταση που θα έχει το μέταλλο και η επίστρωση. (Huang & Zhang, 2018)

Μπορούμε να τις διακρίνουμε σε:

1. Σε ακαθαρσίες οι οποίες δεν είναι διαλυτές στο νερό, όπως είναι οξείδια, θειούχα άλατα, τα λιπαρά οξέα και τα έλαια.
2. Σε ακαθαρσίες οι οποίες μπορούν να διαλυθούν στο νερό, όπως είναι τα θειικά άλατα, τα χλωριούχα και τα λοιπά.

Οι μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται για να προετοιμάσουν μια μεταλλική κατασκευή για να μπορέσουμε να εφαρμόσουμε την πολυμερή προστασία, περιλαμβάνουν:

- Την απολίπανση.
- Τον καθαρισμό με υδροβολή.
- Τον καθαρισμό με φλόγα.
- Τον καθαρισμό με ψηγματοβολή.
- Τον καθαρισμό με εμβάπτιση σε οξέα.

Στις πλωτές κατασκευές οι διάφορες ακαθαρσίες μπορούν να περιλάβουν χλωριούχα άλατα, μια μικρής κλίμακας σκουριάς, αλλά είναι δυνατό να υπάρχουν και τμήματα διαφόρων επιστρώσεων οι οποίες εφαρμόστηκαν κατά το παρελθόν. Για να γίνει αφαίρεση των διαφόρων ακαθαρσιών η πιο κατάλληλη μέθοδος είναι η υδροβολή με εφαρμογή πίεσης 3500 psi. Υπάρχει επίσης, η μέθοδος της αμμοβολής αλλά σε αυτή την περίπτωση απαιτείται περιορισμός στον χώρο για να μην διασπείρονται στον γύρο χώρο ανεπιθύμητα ψήγματα υλικών και επιβαρύνεται το περιβάλλον. Μια ακόμα πιο σύγχρονη μέθοδος καθαρισμού είναι η υδροβολή με υψηλή πίεση από 35.000 μέχρι 40.000 psi, η οποία καθαρίζει την κατασκευή και ταυτόχρονα την αφήνει στεγνή. (Σαριδάκης, 2011)

3.4 ΑΝΤΙΔΙΑΒΡΩΤΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΙΣ

Η ευρύτατα χρησιμοποιούμενη μέθοδος για να την προστασία των κατασκευών είναι η εφαρμογή κατάλληλης επίστρωσης σε αυτές για να εμποδίζεται η διαβρωτική δράση από το περιβάλλον. Η φιλοσοφία αυτής της μεθόδου είναι ότι δημιουργεί ένα λεπτό φιλμ το οποίο και διαχωρίζει το μέταλλο που χρήζει προστασίας από το περιβάλλον.

Ανάλογα με το είδος της επίστρωσης που χρησιμοποιείται, η προστασία μπορεί να την επιτευχθεί είτε λόγω της αυξημένης ηλεκτρικής αντίστασης που μπορεί να διαθέτει το υλικό της επίστρωσης είτε διαφορετικά λόγω της μεταβολής που μπορεί να προκαλέσει στο δυναμικό του μετάλλου. Η προστατευτική δράση μπορεί να την επιτευχθεί με βάση το πάχος και τις ιδιότητες που εμφανίζει το υλικό της επίστρωσης. Τέτοιες ιδιότητες είναι η διαπερατότητα, η πρόσφυση και η αντοχή.

Στις ναυπηγικές κατασκευές, δηλαδή είτε σε πλοία, είτε σε πλωτές δεξαμενές, είτε σε υπεράκτιες κατασκευές η εφαρμογή των μεθόδων αυτών πρέπει να επιλέγεται με ιδιαίτερη προσοχή.

Οι οργανικές επιστρώσεις που χρησιμοποιούνται αποτελούνται από ομογενή μείγματα με διάφορα συστατικά τα οποία θα εμφανίσουν μια μεγάλη ποικιλία χημικών, μηχανικών, φυσικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων. Για να μπορούν να ασκήσουν την προστατευτική τους δράση θα πρέπει να δημιουργούν στην επιφάνεια του μετάλλου έναν υμένα με ισχυρή πρόσφυση.

Οι εφαρμογές των επιστρώσεων σε ένα πλοίο χρησιμοποιούνται στα ακόλουθα:

- Την γάστρα
- τις δεξαμενές του έρματος
- τις υπερκατασκευές και τα έξαλα
- τις δεξαμενές φορτίου και οι χώροι αυτού (Βλάχος, 2005) (Βλάχος, 2007)

Οι επιστρώσεις επίσης ταξινομούνται ως εξής:

1. Στις σκληρές επιστρώσεις. Κατατάσσονται σε αυτές όσες επιστρώσεις μπορούν να αποκτήσουν την μορφή που θα έχουν τελικά με την χρήση χημικής διαδικασίας. Οι σκληρές επιστρώσεις μπορεί να είναι οργανικές ή να είναι ανόργανες. Στην κατηγορία αυτή θα συμπεριλάβουμε όλα τα συμβατικά χρώματα.

2. Στις ημίσκληρες επιστρώσεις. Σε αυτές περιλαμβάνονται οι επιστρώσεις που όταν θα στεγνώσουν μπορούν να παραμένουν ευέλικτες αλλά να είναι και σκληρές ώστε αν δεχθούν πιέσεις να μην είναι σε θέση να υποστούν ζημιές και να μην επηρεάζονται όταν πλένονται.
3. Στις μαλακές επιστρώσεις. Είναι αυτές, οι οποίες δεν στεγνώνουν και παραμένουν μαλακές. (ISO 12944-9:2018)

Οι οργανικές επιστρώσεις διακρίνονται σε χρώματα, λάκες και βερνίκια. Τα χρώματα αποτελούν τις πιο κοινές επιστρώσεις στη ναυπηγική. Αποτελούνται από μια διασπορά ενός λεπτόκοκκου υλικού (pigment) σε ένα διάλυμα ενός συνδετικού μέσου (binder). Το συνδετικό μέσο είναι οργανικής φύσης και είναι ο βασικός παράγοντας που καθορίζει τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του χρώματος.

3.5 ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΑ ΧΑΛΥΒΔΙΝΑ ΜΕΡΗ ΠΛΟΙΟΥ

Στο παρελθόν ως επιστρώματα για την προστασία των δεξαμενών έρματος χρησιμοποιούνταν προϊόντα πίσσας, καυτή ανθρακόπισσα, λίπος προβάτων, ξηρά φυτικά έλαια, κ.λπ. Τα τελευταία χρόνια ακολούθησε η χρήση καθαρότερων εποξικών προϊόντων. Ο κύριος λόγος, εκτός από τον έλεγχο της διάβρωσης, είναι πλέον και η ικανοποίηση των απαιτήσεων των διαφόρων κανονισμών. Η πρώτη εικόνα (Εικ. 3.2) παρουσιάζει μια πρόσφατα επικαλυμμένη δεξαμενή, προτού χρησιμοποιηθεί, ενώ η δεύτερη εικόνα (Εικ. 3.3) μια δεξαμενή μετά από 5 χρόνια λειτουργίας. (Ιωσηφίδου, 2009)



Εικ. 3.2: Δεξαμενή πλοίου μετά την εφαρμογή επίστρωσης[26]



Εικ. 3.3: Δεξαμενή πλοίου μετά από χρήση 5 χρόνων[27]

Το κατάστρωμα και η υπερκατασκευή του πλοίου επίσης χρειάζεται επίστρωση. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να γίνει συνδυασμός της αντιδιαβρωτικής προστασίας, της αντιολισθητικής ιδιότητας, την αντοχή σε καιρικές συνθήκες, της ακτινοβολίας. Επιπλέον η επικάλυψη των δεξαμενών είναι απαραίτητη όχι μόνο για την διάβρωση αλλά και για την προστασία του φορτίου. Ακόμη η προστασία της έλικας και του πηδαλίου είναι σημαντική για την απόδοση του πλοίου με την χρήση αντιρρυπαντικών προϊόντων. Κατά προσέγγιση η προστατευμένη έλικα μπορεί να προσδώσει αύξηση ταχύτητας 5-8%, και μειωμένη κατανάλωση στο καύσιμο. Κάτι αντίστοιχο ισχύει και για την γάστρα, όπου σε αυτή την περίπτωση πρέπει η προστασία από τη διάβρωση και η προστασία από μικροοργανισμούς (φύκια, όστρακα). Ο συνδυασμός και των δύο είναι δύσκολος λόγω του ότι τα αντιρρυπαντικά χρώματα διαθέτουν τοξικά πρόσθετα (π.χ. ενώσεις χαλκού) τα οποία να επιταχύνουν τη διάβρωση με το χάλυβα (Εικ. 3.4). Έτσι πρώτα γίνεται η εφαρμογή του αντιδιαβρωτικού υφαλοχρώματος.



Εικ. 3.4: Γάστρα πλοίου που καλύφθηκε από μικροοργανισμούς[28]

3.6 ΟΙ ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

Οι αναστολείς της διάβρωσης του χάλυβα είναι ουσίες ή μείγματα που χρησιμοποιούνται για να ελαττώσουν την ταχύτητα διάβρωσης του μετάλλου όταν προστίθενται στο διαβρωτικό περιβάλλον σε σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις. Σκοπός της χρήσης τους είναι η ελάττωση της ταχύτητας διάβρωσης για όσο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα είναι δυνατόν και ο περιορισμός των αρνητικών συνεπειών της διάβρωσης στις κατασκευές και τις ιδιότητες αυτών. (Δουμένης, 2019)

Οι αναστολείς διάβρωσης χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για να αποτρέψουν ή να μειώσουν τους ρυθμούς διάβρωσης των μεταλλικών υλικών όταν εκτίθενται σε διαβρωτικό περιβάλλον. Οι αναστολείς προσροφώνται στις επιφάνειες των μετάλλων, δημιουργώντας ένα προστατευτικό λεπτό στρώμα, που επιδρά στις καθοδικές και ανοδικές αντιδράσεις και προκαλεί μείωση στην οξειδωση και κατά συνέπεια στη διάβρωση. (Chigondo, 2016)

Ο ρυθμός διάβρωσης των χαλύβων σε ουδέτερα διαλύματα NaCl επηρεάζεται από δυο βασικούς μηχανισμούς: του σχηματισμού και της συσσώρευσης μιας παθητικοποιημένης στρώσης οξειδίου του μετάλλου και της μερικής καταστροφής αυτού του στρώματος λόγω διάτρησης.

Αν η επιφάνεια του μετάλλου καλύπτεται από βαφή ή άλλο μη αγώγιμο υλικό οι ρυθμοί οξειδωσης και αναγωγής μειώνονται δραστικά και η διάβρωση επιβραδύνεται. Οι αναστολείς διάβρωσης δρουν παρεμβαίνοντας στην καθοδική αντίδραση, στην ανοδική ή και στις δύο. Πολλές από αυτές τις ουσίες είναι οργανικές. Δημιουργούν αδιαπέραστη μεμβράνη στην επιφάνεια του μετάλλου ή παρεμβαίνουν στην αντίδραση οξειδωσης ή αναγωγής. Αμίνες υψηλού μοριακού βάρους επιβραδύνουν την έκλυση υδρογόνου μειώνοντας έτσι το ρυθμό διάβρωσης. Είναι προφανές ότι το μέταλλο και ο ηλεκτρολύτης πρέπει να διαθέτουν καλή αγωγιμότητα για να συμβεί διάβρωση. Έχει παρατηρηθεί ότι αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης του ηλεκτρολύτη συνεπάγεται μείωση της διάβρωσης. Το καθαρό νερό είναι πολύ λιγότερο διαβρωτικό από το ακάθαρτο ή το φυσικό νερό. Η χαμηλή διαβρωτικότητα του νερού υψηλής καθαρότητας οφείλεται στην υψηλή ηλεκτρική του αντίσταση. (Παλαιοκόστα, 2018)

Ο μηχανισμός της δράσης των αναστολέων είναι σύνθετος, λόγω των διαφορετικών συστατικών τους. Μπορεί να περιλαμβάνουν την απορρόφηση με τη μορφή ενός

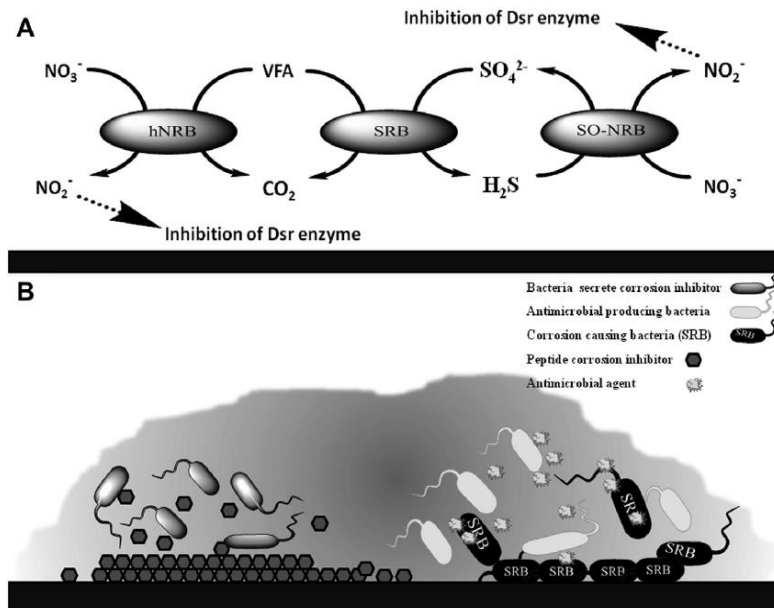
λεπτού υμένα στη μεταλλική επιφάνεια είτε τον σχηματισμό ενός παθητικού λεπτού φιλμ στη μεταλλική επιφάνεια και την τροποποίηση των χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος έτσι ώστε να δημιουργούν μια προστατευτική επίστρωση στην επιφάνεια.

Επίσης, μπορούν να λειτουργούν με τέτοιο τρόπο ώστε να απομακρύνουν ή να εξουδετερώνουν κάποιο στοιχείο που είναι ιδιαίτερα δραστικό και προκαλεί ή διευκολύνει την εξέλιξη της διάβρωσης. Ωστόσο, συχνά τίθεται το πρόβλημα που σχετίζεται με την αναγκαιότητα της χρήσης τους σε μεγάλη συγκέντρωση, οπότε ορισμένες φορές είναι ιδιαίτερα τοξικοί. Η επιλογή του αναστολέα διάβρωσης ανάλογα με τη φύση και τη δράση του εξαρτάται από το μεταλλικό υλικό που πρόκειται να προστατευτεί και το διαβρωτικό μέσο που πρόκειται να εξουδετερωθεί, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει οξυγόνο, χλώριο, υδρόθειο, διοξείδιο του άνθρακα, κτλ.

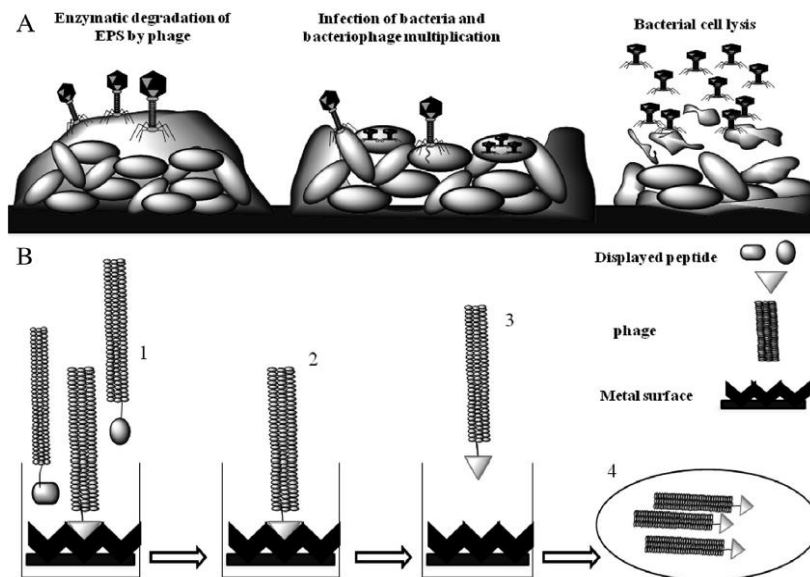
Η αποτελεσματικότητα της δράσης του αναστολέα εξαρτάται από το βαθμό της ανοδικής ή καθοδικής πόλωσης, τον τρόπο μεταφοράς των ιόντων κατά μήκος της μεταλλικής επιφάνειας, το επίπεδο αντίστασης της μεταλλικής επιφάνειας, το pH και τη θερμοκρασία στην οποία χρησιμοποιείται ο αναστολέας (Εικ. 3.5). (Zarasv & Rai, 2014)

Για την αναστολή της διάβρωσης σε χαλύβδινες επιφάνειες σε θαλάσσιο περιβάλλον συστήνεται να πραγματοποιηθούν οι ακόλουθες διαδικασίες:

- α. Εξάλειψη σημείων ανάπτυξης τάσης (απομάκρυνση οξειδίων με ψηγματοβολή).
- β. Χρησιμοποίηση θαλάσσιου επικαλυπτικού υψηλής στεγανότητας.
- γ. Χρησιμοποίηση επικαλυπτικού με αντιδιαβρωτικές χρωστικές.
- δ. Εφαρμογή καθοδικής προστασίας (ρεύμα ή ηλεκτρόδια). (Ιωσηφίδου, 2009)



Εικ. 3.5: Σχηματική απεικόνιση μηχανισμών αναστολής διάβρωσης από βακτήρια, *A*) Αποκλεισμός βακτηριδίων που προκαλούν διάβρωση (SRB) από ετερότροφα βακτήρια αναγωγής νιτρικών (hNRB) ή/και θειο-οξειδωτικά βακτήρια αναγωγής νιτρικών (NR-SOB), *B*) Αναστολή διάβρωσης από βακτήρια με την παραγωγή ενός μέσου το οποίο σκοτώνει τα SRB και τη δημιουργία ενός αναστολέα διάβρωσης [29]



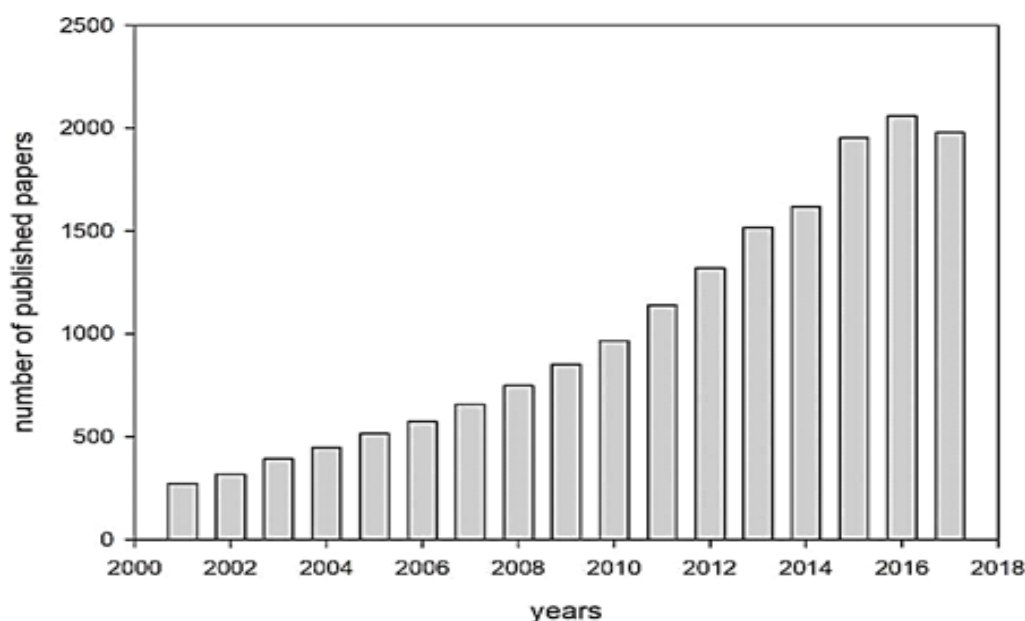
Εικ. 3.6: Σχηματική αναπαράσταση μηχανισμού ενός αναστολέα διάβρωσης από βακτήρια, *A*) Διάλυση του βακτηριακού κυττάρου, *B*) Επίστρωση της μεταλλικής επιφάνειας με πεπτίδια ενός αναστολέα διάβρωσης επιλεγμένα με τη μέθοδο εμφάνισης βακτηριοφάγου [30]

3.7 ΤΑ ΕΙΔΗ ΤΩΝ ΑΝΑΣΤΟΛΕΩΝ

Οι αναστολείς διάβρωσης ανάλογα με την σύστασή τους διακρίνονται στους οργανικούς και στους ανόργανους:

- **Οι οργανικοί αναστολείς** που περιέχουν ηλεκτραρνητικές ομάδες και π-ηλεκτρόνια (π-electrons) συζευγμένα με διπλούς ή τριπλούς δεσμούς και παρουσιάζουν ανασταλτική ιδιότητα. (Chigondo, 2016)

Προστατεύουν το μέταλλο με την δημιουργία ενός υδρόφοβου στρώματος στην επιφάνεια. Η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από την αύξηση του μεγέθους και του μοριακού τους βάρους καθώς την ασυμμετρία τους. Οι πιο συνηθισμένες ενεργές ενώσεις περιέχουν άζωτο, νιτρώδη και αμίνες. Χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία λόγω της αποτελεσματικότητάς τους σε μεγάλα εύρη θερμοκρασιών, τη συμβατότητά τους με τα προστατευόμενα υλικά, τη μεγάλη τους διαλυτότητα και σχετικά χαμηλή τους τοξικότητα. Αυτή η ιδιότητα έχει μεγάλη σημασία για τους ερευνητές, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται από τον διαρκώς αυξανόμενο αριθμό των σχετικών δημοσιεύσεων (Εικ. 3.7).

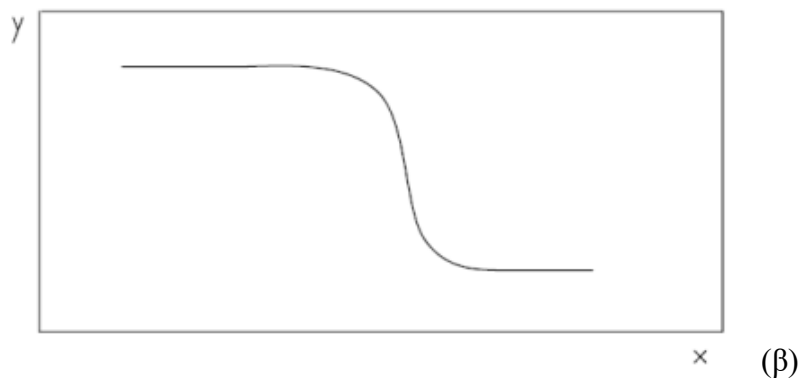
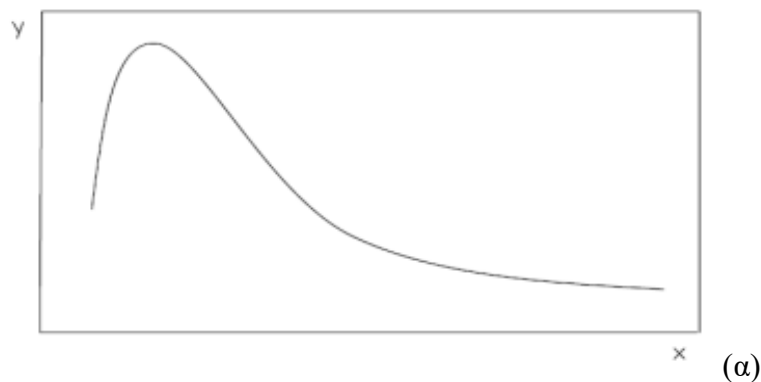


Εικ.3.7: Ο αριθμός των δημοσιεύσεων για τους οργανικούς αναστολείς διάβρωσης ανά χρόνο δημοσίευσης (Brycki, 2017)

- **Οι ανόργανοι αναστολείς** είναι άλατα μετάλλων, όπως χρωμικά άλατα, άλατα ψευδαργύρου, σύμπλοκα μολυβδενίου, φωσφορικά άλατα, νιτρικά άλατα, σύμπλοκα θεικών αλάτων, τα οποία προστίθενται στο διαβρωτικό περιβάλλον σε μικρές ποσότητες για να μειώσουν τις αντιδράσεις μεταξύ του περιβάλλοντος και του μετάλλου που πρόκειται να προστατευθεί. (Καβέτσος & Κολώτας, 2014)

Οι αναστολείς διακρίνονται σε:

- **ανοδικούς**, οι οποίοι δημιουργούν μια λεπτή μεμβράνη στα ανοδικά μέρη του μετάλλου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή του δυναμικού και τη μείωση της διάβρωσης. Όταν η συγκέντρωση του αναστολέα είναι σε χαμηλά επίπεδα, η διάβρωση αυξάνεται εκθετικά (Εικ. 3.8α) και όταν φτάσει στο μέγιστο αρχίζει να μειώνεται φτάνοντας στο σημείο ισορροπίας, το οποίο εξαρτάται από τον τύπο του αναστολέα και τις ιδιότητες του. Τέτοιες ενώσεις είναι για παράδειγμα τα ορθοφωσφορικά και πολυφωσφορικά άλατα, καθώς και οι ενώσεις του χρωμίου.



Εικ.3.8: (α) Διάγραμμα ανοδικού αναστολέα, όπου (χ) είναι η συγκέντρωση αναστολέα και (γ) ο ρυθμός διάβρωσης [31], (β) Διάγραμμα καθοδικού αναστολέα, όπου (χ) η συγκέντρωση αναστολέα και (γ) ο ρυθμός διάβρωσης [32]

- **καθοδικούς**, που είναι λιγότερο αποτελεσματικοί από τους ανοδικούς και δημιουργούν μία ορατή λεπτή επιφάνεια στα καθοδικά σημεία του μετάλλου, εμποδίζοντας την προσέγγιση του διαλυμένου οξυγόνου. Όταν η συγκέντρωση του καθοδικού αναστολέα είναι μηδενική τότε το μέταλλο είναι απροστάτευτο, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα (Εικ.3.8β). Όταν η συγκέντρωση αυξάνεται, τότε τα καθοδικά σημεία αδρανούν, αλλά από ένα σημείο και μετά το καθοδικό δυναμικό δεν μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις των ανοδικών σημείων. Ενώσεις που χρησιμοποιούνται συχνά είναι το ανθρακικό και φωσφορικό ασβέστιο, το υδροξείδιο του ψευδαργύρου κλπ.

Ένα σύγχρονο παράδειγμα ανόργανου αναστολέα διάβρωσης αποτελούν τα υπέρ-υδροφοβικά μικρο-νανοδομημένα φιλμ του νικελίου σε διάλυμα 3.5% χλωριούχου νατρίου για την προστασία χάλυβα, τα οποία βελτιώνουν σημαντικά την αντοχή στη διάβρωση μέσω ηλεκτροαπόθεσης με την παρουσία μολυβδαινικού νατρίου. (Nezhad, 2020)

Μεταξύ άλλων αναφέρονται οι **αλκαλικοί αναστολείς**, οι οποίοι επηρεάζουν μέταλλα που σχηματίζουν αμφοτερικά οξείδια και επηρεάζονται από αλκαλικά διαλύματα. Πολλές ενώσεις χρησιμοποιούνται ως αναστολείς διάβρωσης αυτού του είδους είναι: θειουρία, φαινόλες, ναφθόλη, β-δικετόνη.

Οι **ουδέτεροι αναστολείς** αλληλεπιδρούν με την μεταλλική επιφάνεια, η οποία είναι επικαλυμμένη με οξείδιο και προστατεύουν τις επιφάνειες προλαμβάνοντας την μείωση του οξυγόνου στις καθοδικές θέσεις.

Οι **χημικοί παθητικοποιητές** είναι ουσίες με υψηλό δυναμικό οξειδοαναγωγής και προκαλούν μείωση του ρυθμού διάβρωσης. Μερικά παραδείγματα αυτών είναι τα νιτρώδη, τα χρωμικά άλατα, ο μολυβδαινικός ψευδάργυρος.

Οι **αναστολείς προσρόφησης** είναι οργανικές ενώσεις που προσφέρουν προστασία σε καθοδικές και σε ανοδικές θέσεις της επιφάνειας του μετάλλου. Δημιουργώντας μια λεπτή μεμβράνη προκαλούν χημική προσρόφηση που είναι πιο αργή από την φυσική. Επίσης παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αυξάνεται και η αναστολή διάβρωσης. Δρουν ανοδικά είτε καθοδικά. Παραδείγματα τέτοιων αναστολέων είναι τα άλατα ψευδαργύρου και ασβεστίου. (Miracle, 2015)

Τέλος αναφέρονται οι **αναστολείς καθίζησης**, οι **συνεργικοί αναστολείς** και οι **πτητικοί αναστολείς**.(Singh, 2019)

3.8 ΕΙΔΙΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΝΑΣΤΟΛΕΩΝ

Ένα ιδιαίτερο είδος αναστολέων διάβρωσης αποτελούν οι **μεικτοί**. Πρόκειται για αναστολείς που δρουν σε ανοδικά και καθοδικά σημεία μειώνοντας τον ρυθμό διάβρωσης. Επίσης δεν υπάρχει αλλαγή στο δυναμικό της επιφάνειας, δημιουργώντας μία προστατευτική μεμβράνη μέσω προσρόφησης πάνω από την επιφάνεια του μετάλλου (χάλυβα). Ειδικές κατηγορίες μικτών αναστολέων διάβρωσης αποτελούν: (Ζαχαροπούλου, 2014)

- **οι αμινούχες ενώσεις**
- **οι πράσινοι αναστολείς**

Παρακάτω περιγράφεται η δράση των αναστολέων αυτών:

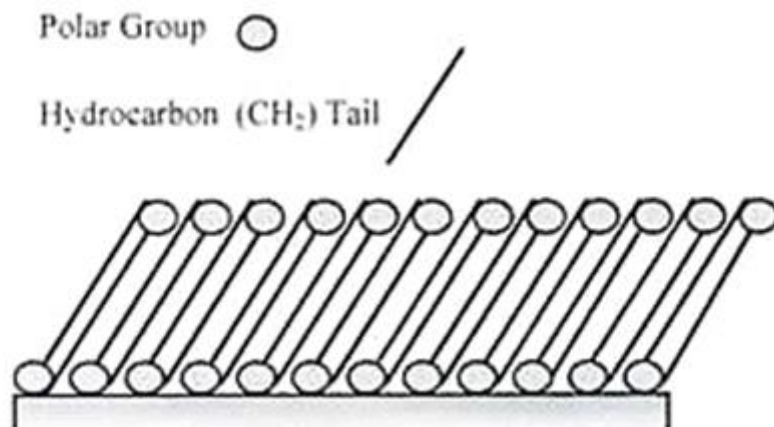
1) Οι αμινούχες ενώσεις: προστατεύουν τόσο τις ανοδικές, όσο και καθοδικές περιοχές του υποστρώματος του μετάλλου. Οι ιδιότητες των αμινούχων ενώσεων, που τις καθιστούν εξαιρετικά αποτελεσματικές ως αναστολείς διάβρωσης είναι οι παρακάτω:

α) Η πολικότητα: Οι αμίνες ανήκουν στην κατηγορία των πολικών ενώσεων. Η αμινομάδα NH_2 διαθέτει ένα ηλεκτροαρνητικό άτομο αζώτου, του οποίου η λειτουργία συμβάλλει στη διπολική ροπή του μορίου.

β) Η διαλυτότητά τους σε υδατικό περιβάλλον: λόγω του δεσμού υδρογόνου που σχηματίζουν οι αμίνες τείνουν να είναι εύκολα διαλυτές στο υδατικό περιβάλλον. Η ύπαρξη ενός οξέος προκαλεί διαλυτότητα και αύξηση της συγκέντρωσης των αλάτων αμίνης, που είναι ενώσεις ιοντικές, στερεές και διαλύονται στο νερό.

γ) Η βασικότητα: οι αμίνες είναι ισχυρότερες βάσεις από την αμμωνία. Όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα των ηλεκτρονίων γύρω από το άτομο του αζώτου, τόσο πιο βασικό γίνεται αυτό. (Ντάφλου, 2012) (Σπηλιόπουλος, 2015)

Οι αμινούχες ενώσεις κατά την εφαρμογή τους δημιουργούν ένα στρώμα φραγμό που προστατεύει την επιφάνεια του μετάλλου εξαιτίας της ύπαρξης ενός υδρόφοβου και ενός υδρόφιλου τμήματος στα μόρια τους, τα οποία τοποθετούνται παράλληλα μεταξύ τους και κάθετα στην επιφάνεια (Εικ. 3.9).



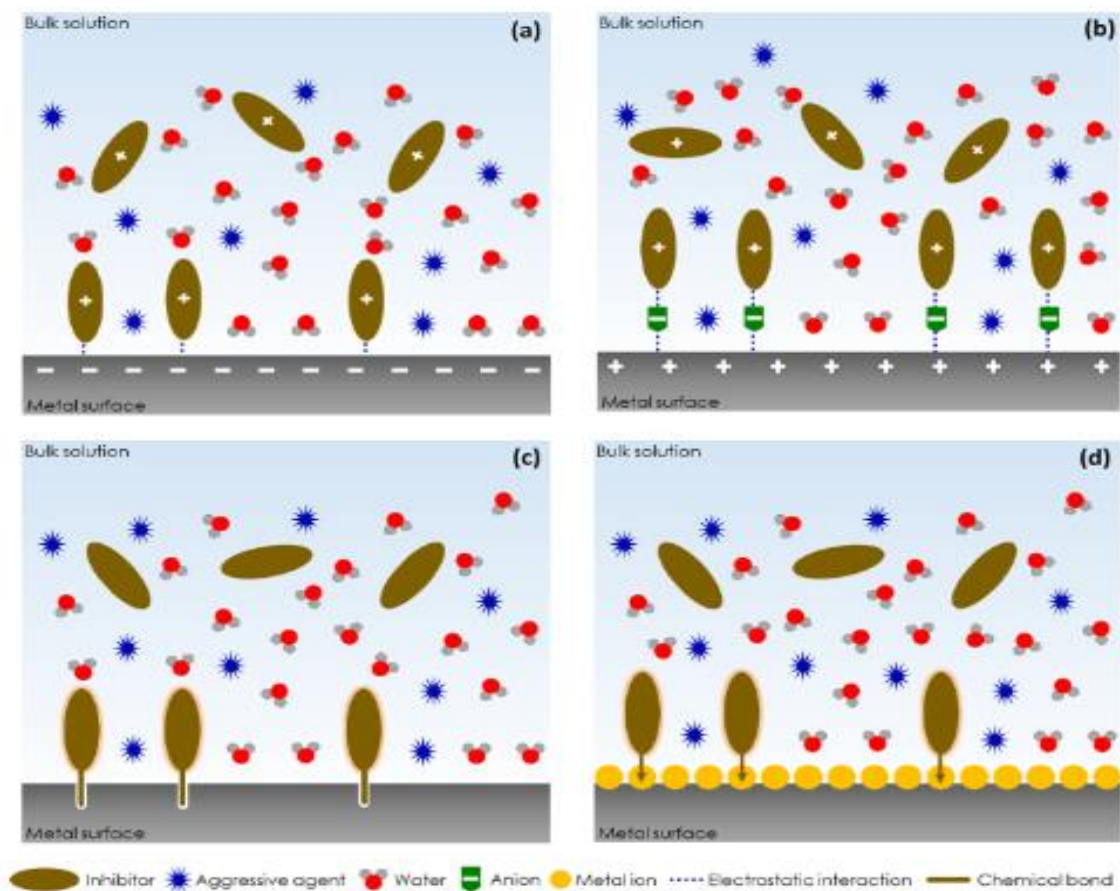
Εικ. 3.9: Σχηματισμός προστατευτικού στρώματος από μόρια αμινών που προσανατολίζονται κατάλληλα στην επιφάνεια του μετάλλου

Μία ιδιαίτερη κατηγορία ενώσεων που έχουν ως βάση τους την αμίνη είναι οι αμινοαλκοόλες. Μελέτες που έχουν γίνει για τις αμινοαλκοόλες (AMA) έδειξαν ότι καλύπτουν πλήρως τις ανοδικές και καθοδικές θέσεις του μετάλλου, σχηματίζοντας ένα προστατευτικό φιλμ με αποτέλεσμα την απομάκρυνση των χλωριόντων και των άλλων ιόντων από την επιφάνεια του μετάλλου. (Wombacher, 2004)

Πειραματικές μελέτες που περιλάμβαναν μείγμα νιτρωδών και αμινοαλκοόλης σε ανοξείδωτο χάλυβα τύπου 304 με τη χρήση ηλεκτροχημικών μεθόδων έδειξαν μείωση της διάβρωσης κατά 2.5 φορές σε pH 12.67 και 5.4 φορές σε pH 9.37 όταν εξετάστηκαν για χρονικό διάστημα 72 ωρών βύθισης σε διάλυμα 3% NaCl. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο συνδυασμό της δράσης του νιτρώδους στα ιόντα του σιδήρου με το σχηματισμό του προστατευτικού στρώματος που οφείλεται στις ιδιότητες της υδροξυαλκανολαμίνης. (Jamil, 2005)

Η ανασταλτική τους δράση είναι παρόμοια με αυτή των οργανικών ενώσεων με έμμεση ή άμεση προσρόφηση στην μεταλλική επιφάνεια, καθώς αναστέλλουν τους διαβρωτικούς παράγοντες (Εικ.3.10). Υπάρχουν δύο τρόποι προσρόφησης: όταν ο ουδέτερος αναστολέας μπορεί να προσροφηθεί στην επιφάνεια με χημική προσρόφηση ή όταν ο φορτισμένος αναστολέας αντιδρά με ηλεκτροστατικές δυνάμεις με την φορτισμένη επιφάνεια. Σε αυτή την περίπτωση, αν η μεταλλική επιφάνεια είναι αρνητικά φορτισμένη τα αμινοξέα θα προσροφηθούν αμέσως στην επιφάνεια του μετάλλου (Εικ 3.10α). Υπάρχει η περίπτωση η προσρόφηση να γίνει έμμεσα μέσω ηλεκτροστατικής αλληλεπίδρασης, με τα ανιόντα να προσκολλώνται στην θετικά φορτισμένη επιφάνεια (Εικ 3.10β). Σημειώνεται ότι τα αμινοξέα και τα

άτομα του μετάλλου δρουν ως δότης και δέκτης ηλεκτρονίων αντίστοιχα. Οι αλληλεπιδράσεις περιλαμβάνουν ηλεκτρόνια ετεροατόμων (O, N, S), π ηλεκτρόνια των αμινοξέων και δτροχιακών των ατόμων της επιφάνειας του μετάλλου (Εικ 3.10γ). Τέλος η ανασταλτική δράση των αμινοξέων οφείλεται στο σχηματισμό αδιάλυτου συμπλόκου μεταξύ των ιόντων των μετάλλων και των αμινοξέων με λειτουργικές ομάδες (Εικ 3.10δ). Τέτοιο παράδειγμα είναι η κυστεΐνη στον χαλκό, όπου τα μόρια του αναστολέα σχηματίζουν σύμπλοκο μεταξύ Cu(I) και μερκαπτοομάδας (-SH).

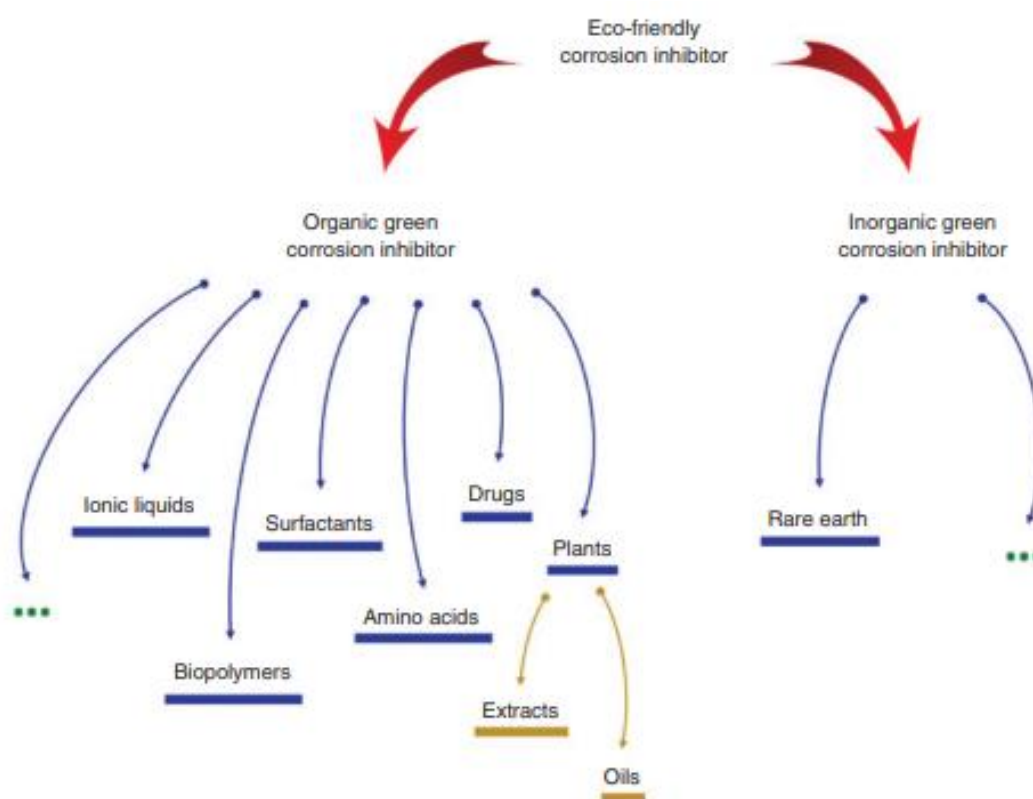


Εικ. 3.10: Αλληλεπίδραση αμινοξέων με μεταλλική επιφάνεια [33]

2) Οι πράσινοι αναστολείς:

Αποτελούν μια ειδική κατηγορία αναστολέων, που παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια λόγω της αυξημένης ανησυχίας της ανθρωπότητας για την προστασία του περιβάλλοντος και τις συνεχείς αλλαγές που συντελούνται στη νομοθεσία όσον αφορά την τοξικότητα των χρησιμοποιούμενων αναστολέων.

Πιο συγκεκριμένα, οι κίνδυνοι που προέκυψαν λόγω της τοξικότητας των κοινών αναστολέων οδήγησαν στη χρήση των νέων, πράσινων αναστολέων διάβρωσης. Οι περισσότεροι από αυτούς προέρχονται από φυσικά προϊόντα, περιέχουν φιλικές ουσίες ως προς το περιβάλλον, και είναι ακίνδυνες στη χρήση, καθώς δεν περιέχουν βαρέα μέταλλα ή άλλες τοξικές ουσίες. Οι πράσινοι αναστολείς χρησιμοποιούνται σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις για την προστασία της επιφάνειας του μετάλλου ή του κράματος. Εκεί απορροφώνται δημιουργώντας ένα προστατευτικό στρώμα φραγμό, επηρεάζοντας τις ανοδικές ή και καθοδικές δράσεις, οπότε καθυστερούν την οξείδωση και μειώνουν τη διάβρωση. Στην (Εικ. 3.11) παρουσιάζεται ένα διάγραμμα φιλικών αναστολέων διάβρωσης προς το περιβάλλον .



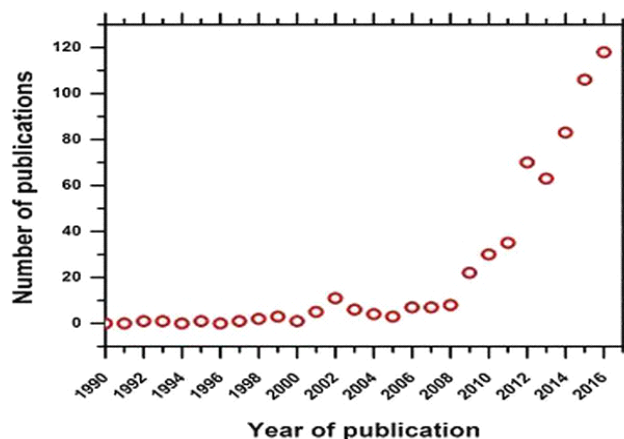
Εικ. 3.11: Πηγές πράσινων αναστολέων [34]

Τα φυτικά εκχυλίσματα αντικαθιστούν τους συνθετικούς ανόργανους και οργανικούς αναστολείς, είναι βιοδιασπώμενοι και δεν περιέχουν βαρέα μέταλλα ή τοξικές ενώσεις. Οι φυσικές πηγές για την παραγωγή των πράσινων αναστολέων διάβρωσης περιλαμβάνουν βότανα, φύλλα, αλεύρι, έλαια, ρίζες, καπνό, μέλι, νικοτίνη, καφεΐνη κ.ά. (Chigondo, 2016) (Basu, 2012)



Εικ. 3.12: Παραδείγματα κοινών φυσικών πηγών για την παραγωγή πράσινων αναστολέων [35]

Το ενδιαφέρον για την παραγωγή και τη χρήση των πράσινων αναστολέων διάβρωσης παρουσιάζει ανοδικές τάσεις τις τελευταίες δεκαετίες, γεγονός το οποίο φαίνεται από τον διαρκώς αυξανόμενο αριθμό των σχετικών δημοσιεύσεων (Εικ. 3.13).



Εικ.3.13: Ο διαρκώς αυξανόμενος αριθμός των δημοσιευμένων εργασιών σχετικά με την παραγωγή και τη χρήση των πράσινων αναστολέων διάβρωσης.(Shehata, Korshed and Attia, 2018)

Πίνακας 3.1: Πράσινοι αναστολείς διάβρωσης χάλυβα (Chigondo, 2016)

Plant extracted	Material solution	Effect of temperature on % inhibition efficiency	Effect of concentration on % inhibition efficiency	Methods	Adsorption isotherm	Reference
Molasses	HCl	Done at constant temperature	Increase	Potentiodynamic polarization, dynamic electrochemical impedance spectroscopy, and gasometry	—	[29]
<i>Pterolobium hexapetalum</i> and <i>Celosia argentea</i>	Industrial water	Decrease	Increase	Weight loss and electrochemical impedance spectroscopy	Langmuir	[25]
<i>Pentaclethra macrophylla</i> Bentham	HCl	Decrease	Increase	Weight loss and electrochemical impedance spectroscopy	Langmuir and Temkin	[30]
<i>Phyllanthus fraternus</i>	H ₂ SO ₄	Decrease	Increase	Weight loss, gasometric techniques, and electrochemical impedance spectroscopy	—	[31]
<i>Antigonon leptopus</i>	H ₂ SO ₄	Increase then decrease	Increase	Weight loss	—	[32]
<i>Nypa fruticans</i> Wurm	H ₂ SO ₄	Increase	Increase	Weight loss	—	[33]
<i>Atiba rosaeodora</i>	HCl	Done at constant temperature	Increase	Potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy	Langmuir	[34]
<i>Caesalpinia pulcherrima</i>	H ₂ SO ₄	Increase then decrease	Decrease	Weight loss, potentiodynamic polarization, and electrochemical impedance spectroscopy	—	[26]
<i>Adenopus breviflorus</i>	HCl	Decrease	Increase	Weight loss	Langmuir	[35]
<i>Anacardium occidentale</i>	H ₂ SO ₄	Done at constant temperature	Increase	Gravimetric analysis	Langmuir	[36]
<i>Amaranthus cordatus</i>	H ₂ SO ₄	Done at constant temperature	Increase	Weight loss	—	[37]
<i>Rotula aquatica</i>	H ₂ SO ₄	Decrease	Increase	Weight loss, gasometric techniques, and electrochemical impedance spectroscopy	—	[38]
<i>Polyalthia longifolia</i>	H ₂ SO ₄	Increase	Increase	Weight loss	Langmuir, Temkin, and Freundlich	[27]
Coconut coir	H ₂ SO ₄	Decrease	Increase	Weight loss, gasometric techniques, electrochemical impedance spectroscopy, and potentiodynamic polarization	Temkin and Freundlich	[39]
<i>Juniperus</i>	H ₂ SO ₄	Decrease	Increase	Weight loss, gasometric techniques, electrochemical impedance spectroscopy, and potentiodynamic polarization	Temkin	[40]
<i>Cucurbita maxima</i>	HCl	Increase	Increase	Weight loss	Langmuir and Temkin	[28]
<i>Hyptis suaveolens</i>	H ₂ SO ₄	Decrease	Increase	Weight loss, potentiodynamic polarization, and electrochemical impedance spectroscopy	Langmuir	[41]
<i>Aloe barbadensis</i>	HNO ₃	Increase	Increase	Gravimetric analysis	—	[23]
<i>C. Papaya</i>	HCl	Done at constant temperature	Decrease	Weight loss	—	[42]

Plant extracted	Material solution	Effect of temperature on % inhibition efficiency	Effect of concentration on % inhibition efficiency	Methods	Adsorption isotherm	Reference
<i>Citrus aurantifolia</i>	H ₂ SO ₄	Decrease	Increase	Weight loss	Langmuir and Freundlich	[43]
<i>Terminalia chebula</i>	HCl	Done at constant temperature	Increase	Gravimetric analysis, potentiodynamic polarization, and electrochemical impedance spectroscopy	Langmuir	[44]
<i>Hibiscus sabdariffa</i>	H ₂ SO ₄ and HCl	Done at constant temperature	Increase	Weight loss	Langmuir	[45]
Turmeric and ginger rhizomes	HCl	No trend	Increase	Weight loss and potentiodynamic polarization	Langmuir	[46]
Watermelon rind	H ₂ SO ₄ and HCl	Done at constant temperature	Increase	potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy	Temkin	[47]
<i>Piper nigrum</i>	H ₂ SO ₄	Decrease	Increase	Weight loss and gravimetric and thermometric analysis	—	[48]
African Perquetina	H ₂ SO ₄	Decrease	Increase	Weight loss and gravimetric, gasometric, and thermometric analysis	Langmuir	[49]
<i>Musa paradisiaca</i>	HCl	Done at constant temperature	Increase	Weight loss, electrochemical impedance spectroscopy, and Tafel polarization	Langmuir	[50]
<i>Nicotiana tabacum</i>	H ₂ SO ₄	Decrease	Increase	Weight loss	Langmuir	[51]
Pectin	HCl	Increase	Increase	Weight loss, potentiodynamic polarization, and electrochemical impedance spectroscopy	Langmuir	[3]
<i>Hunteria umbellata</i>	H ₂ SO ₄ and HCl	Decrease	Increase	Weight loss	Langmuir	[2]
<i>Vernonia amygdalina</i>	H ₂ SO ₄	Decrease	Increase	Weight loss, gasometry, and thermometric measurements	Langmuir	[52]
Neem	Salt water	Done at constant temperature	Increase	Weight loss	—	[24]
African breadfruit	H ₂ SO ₄	Increase	Increase	Weight loss	Freundlich	[53]
<i>Ligularia fischeri</i>	HCl	Decrease	Increase	Weight loss, potentiodynamic polarization, Tafel polarization, and electrochemical impedance spectroscopy	Langmuir	[54]
<i>Phyllanthus amarus</i>	HCl	Decrease	Increase	Weight loss, potentiodynamic polarization, and electrochemical impedance spectroscopy	Langmuir	[55]
<i>Elaeis guineensis</i>	HCl	Decrease	Increase	Weight loss, potentiodynamic polarization, and electrochemical impedance spectroscopy	Langmuir	[56]
<i>Aloe vera</i>	HCl	Decrease	Increase	Weight loss and electrochemical impedance	Langmuir	[57]

Η προστασία από την διάβρωση του μετάλλου γίνεται κυρίως με τα φυσικά εκχυλίσματα. Τα περισσότερα από αυτά έχουν μια απόδοση της τάξεως του 60% στην αναστολή της διάβρωσης, ενώ ορισμένα από αυτά μπορούν αποδώσουν σε ένα ποσοστό έως και 90%. Οι παράγοντες που έχουν ιδιαίτερη σημασία για την αποτελεσματικότητα των φυσικών εκχυλισμάτων είναι η συγκέντρωση, η θερμοκρασία, το μέσον εκχύλισης και ο χρόνος εμβάπτισης.

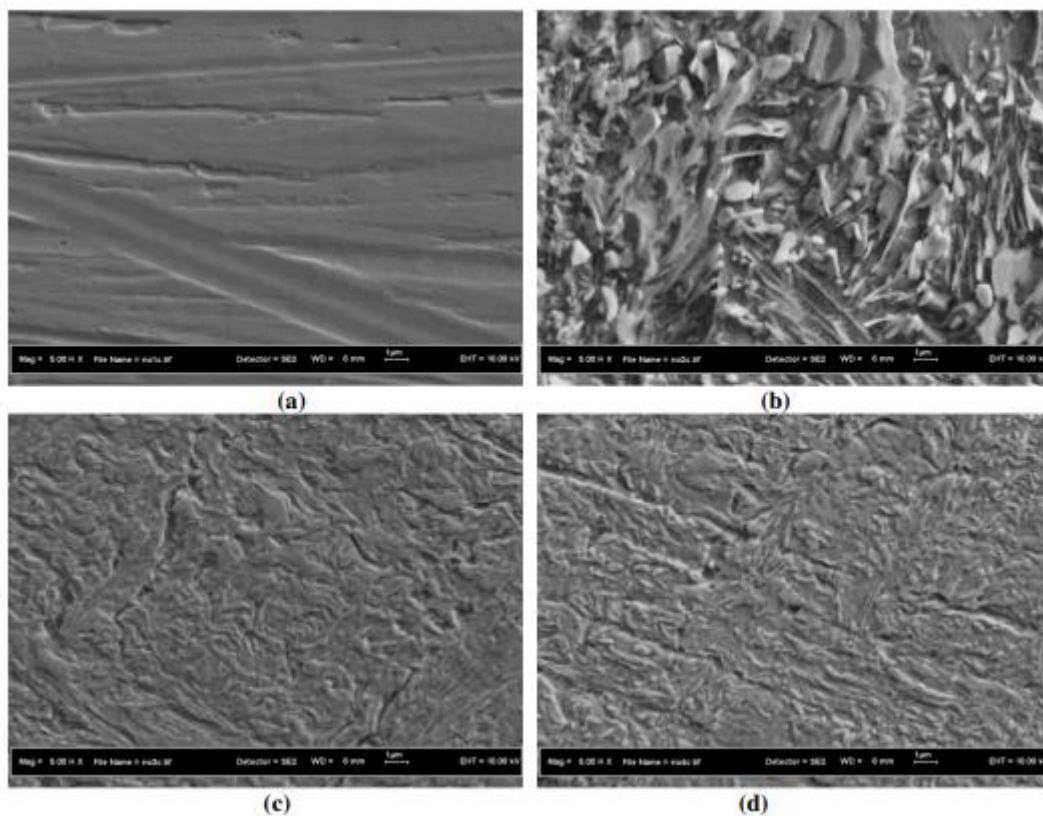
Γενικά, τα φυσικά εκχυλίσματα είναι γνωστά και για τις αντιοξειδωτικές, αντιμικροβιακές και αντιφλεγμονώδεις τους ιδιότητες. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τα εκχυλίσματα φυτών, φρούτων, σπόρων, ανθέων και φύλλων περιέχουν ενεργές ενώσεις, οι οποίες μπορούν να είναι αποτελεσματικές για την αναστολή της διάβρωσης ακόμη και μέσα σε επιθετικά διαβρωτικά μέσα. Επιπλέον, αυτές οι ενώσεις είναι φθηνές, ευρέως διαθέσιμες και εύκολα ανανεώσιμες.

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα από φύλλα, σπόρους κλπ., που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία όσον αφορά τη χρήση και την αποτελεσματικότητα τους ως αναστολείς διάβρωσης (Εικ. 3.14-3.21, Πίνακας 3.2). (Miralrio & Vazquez, 2020)

Τα εκχυλίσματα φύλλων χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή ουσιών με αντιδιαβρωτικές ιδιότητες και θεωρούνται σύνθετες φυσικές ενώσεις, οι οποίες επηρεάζουν το ρυθμό της διάβρωσης με την προσρόφιση των ενεργών συστατικών τους στις μεταλλικές επιφάνειες μέσω της τροποποίησης του βαθμού των ανοδικών ή/και των καθοδικών αντιδράσεων. Επιπλέον, καθώς επηρεάζουν το βαθμό διάχυσης των επιθετικών ιόντων πάνω στη μεταλλική επιφάνεια αυξάνουν την ηλεκτρική αντίσταση, σχηματίζοντας έτσι έναν προστατευτικό υμένα (φιλμ) πάνω σε αυτή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εκχυλίσματος αποτελεί το εκχύλισμα από τα πράσινα φύλλα του φυτού *Eucalyptus*, το οποίο χρησιμοποιείται για την αναστολή διάβρωσης μαλακού χάλυβα σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος συγκέντρωσης 1M με απόδοση περίπου 88% (Dehghani, 2019). Από τα ίδια φύλλα παράχθηκε έλαιο που δοκιμάστηκε για την προστασία χάλυβα σε υδροχλωρικό οξύ 1M κι έδειξε απόδοση περίπου 72%. Με την αύξηση της συγκέντρωσης του ελαίου στα 3mL/L (Bouyanzer, 2006) και την άνοδο της θερμοκρασίας υπήρξε περαιτέρω αύξηση της απόδοσης αναστολής. Ένα άλλο παράγωγο που δρα ως αναστολέας διάβρωσης προέρχεται από τα φύλλα του φυτού *Euphorbia Heterophylla* (Miracle, 2015). Το εκχύλισμα αυτό

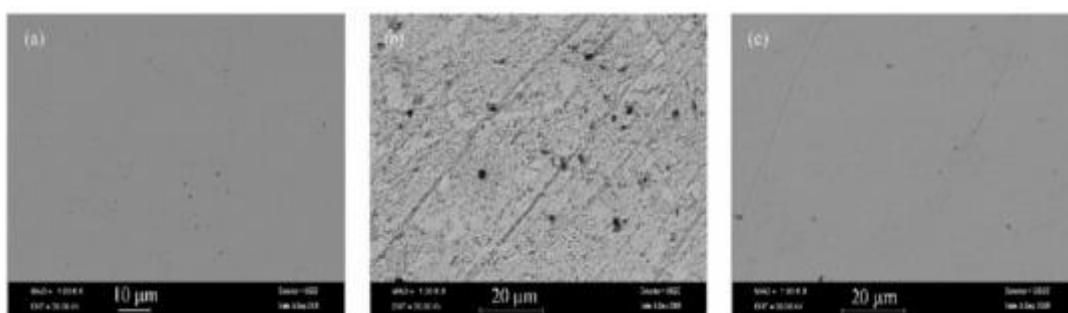
παράγεται με τη μέθοδο της διάλυσης ύστερα από τη χρήση αιθανόλης σε ποσότητα 16mL σε συγκέντρωση 0.5M υδροχλωρικού οξέος. Η μέγιστη απόδοση του εκχυλίσματος αυτού στη διάβρωση μπορεί να φτάσει κοντά στο 90%. Το εκχύλισμα από φύλλα του φυτού *Pterocarpussanta linoides* για την προστασία χάλυβα σε 1 mol/dm³ διαλύματος υδροχλωρικού οξέος έχει δείξει μια απόδοση της τάξεως του 90% και άνω για θερμοκρασίες 333.15K. Επίσης, το εκχύλισμα φύλλων του φυτού *Tamarindus Indica* αναμεμειγμένο με νιτρικό ψευδάργυρο έχει παρουσιάσει μια απόδοση της τάξεως του 96% στην προστασία του χάλυβα μετά από 24 ώρη βύθιση στο εξεταζόμενο διάλυμα. Ακόμη, το εκχύλισμα των φύλλων του φυτού *Paraver Somniferum* μπορεί να δράσει ως ένας μεικτού τύπου αναστολέας διάβρωσης. Το εκχύλισμα αυτό έχει δοκιμαστεί στον τύπο AISI 304 χάλυβα σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος 0.2M. Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την αποτελεσματικότητα αυτού του εκχυλίσματος. Η βέλτιστη δράση του συγκεκριμένου εκχυλίσματος βρίσκεται σε συγκέντρωση κοντά στα 500 ppm. Σε αυτά τα επίπεδα η απόδοση της αναστολής διάβρωσης πλησιάζει το 88%. Επιπλέον, το εκχύλισμα του άνθους *Tithonia Diversifolia* ως αναστολέας διάβρωσης μαλακού χάλυβα σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος 1M έχει παρουσιάσει μια μέγιστη απόδοση της τάξης του 94.66% σε θερμοκρασία 325K. (Okai, 2021)

Η αποτελεσματικότητα της δράσης του εν λόγω εκχυλίσματος μειώνεται αισθητά στις υψηλότερες θερμοκρασίες. Ένα ακόμη εκχύλισμα που έχει δοκιμαστεί είναι αυτό που παράγεται από ρίζα gingerol. Το εκχύλισμα αυτό περιλαμβάνει κυρίως τις ακόλουθες οργανικές ενώσεις: gingerol, gingerberry, b-bisabolene, farnesene, shogaolκαιb-sesquiphellandrene. Οι δοκιμές αυτού του εκχυλίσματος έδειξαν μια απόδοση στην αναστολή διάβρωσης περίπου 92.5% όταν η συγκέντρωση είναι 100 ppm, και παραπάνω από 94% σε συγκέντρωση 200ppm στους 298.15 K. Το φυτό του κουρκουμά και των ριζών τζίντζερ βρίσκεται σε τροπικές χώρες. Οι ρίζες του κουρκουμά διαθέτουν πτητικά και μη συστατικά. Όσον αφορά τα μη πτητικά συστατικά αποτελούνται από ενώσεις φαινόλης, όπως είναι η κουρκουμίνη, οι οποίες προσροφώνται στην μεταλλική επιφάνεια. (Fakih, 2015)



Εικ. 3.14: α) Εικόνα από χάλυβα, β) Χάλυβας μετά από εμβάπτιση σε 1M HCl για 2 ώρες, γ) Χάλυβας μετά από εμβάπτιση σε 1M HCl με τζίντζερ για 2 ώρες, δ) Χάλυβας μετά από εμβάπτιση σε 1M HCl με κουρκουμά για 2 ώρες.[36]

Τέλος, ως αναστολείς διάβρωσης σε όξινα μέσα έχουν χρησιμοποιηθεί και οι σπόροι της σόγιας, καθώς είναι πλούσιοι σε πρωτεΐνες.



Εικ. 3.15: Χάλυβας α) μετά από λείανση, β) μετά από εμβάπτιση σε $1.0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{HCl}$, γ) μετά από εμβάπτιση σε $1.0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{HCl} + 0.04\% \text{ Na-CMC}$ (μικτός αναστολέας που σχηματίζει ένα πυκνό προστατευτικό στρώμα)[37]

Πίνακας 3.2: Ρυθμός διάβρωσης και αποτελεσματικότητα αναστολής διάβρωσης με βάση μετρήσεις απώλειας βάρους (Praveen and Venkatesha,2009)

Concentration of metal (M)	η (%)	corrosion rate(mmY ⁻¹)
For 1 M HCl		
Blank		18
0.02	52.4	8.5
0.04	61.9	6.5
0.06	76.04	3.96
0.08	81.9	3.01
0.5 M H₂SO₄		
Blank		21
0.02	46.4	10.8
0.04	55.4	8.82
0.06	64.7	6.23
0.08	77.4	4.87



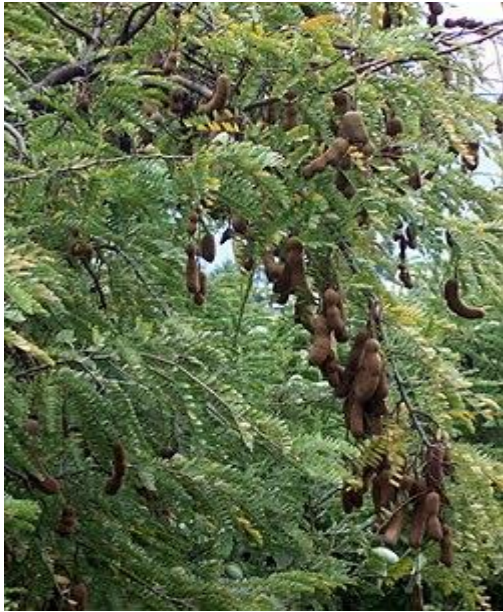
Εικ. 3.16: Το πράσινο φύλλο Eucalyptus



Εικ. 3.17: Το φυτό Euphorbia Heterophylla



Εικ. 3.18: Το φυτό Pterocarpus Santalinus



Εικ. 3.19: Το φυτό Tamarindus Indica



Εικ. 3.20: Το φυτό Papaver Somniferum



Εικ. 3.21: Το φυτό Tithonia Diversifolia

Εκτός από τους οργανικούς φυσικούς αναστολείς διάβρωσης σημαντική είναι και η συνεισφορά των ανόργανων αναστολέων όταν προστεθούν σε ίχνη στο διαβρωτικό μέσο. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το χρώμιο, το οποίο έχει μεν μεγάλη απόδοση στην αναστολή της διάβρωσης, αλλά έχει και μεγάλη τοξικότητα. Πρόσφατα, μελετώνται άλλοι αναστολείς προς αντικατάσταση του χρωμίου και συγκεκριμένα, προτείνονται τα άλατα λανθανίδων, τα οποία έχουν εξαιρετικές ιδιότητες και θεωρούνται φιλικά προς το περιβάλλον (Kesavan, 2012). Τα άλατα αυτά περιλαμβάνουν το $CeCl_3$, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί ως αναστολέας διάβρωσης των κραμάτων του αλουμινίου και του χάλυβα σε αεριζόμενο διάλυμα

χλωριούχου νατρίου. Άλλο άλας είναι το $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί ως αναστολέας διάβρωσης μεταλλικού δείγματος σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου, καθώς και τα $\text{La}(\text{NO}_3)_3$, $\text{Sm}(\text{NO}_3)_3$, LaCl_3 , και SmCl_3 , τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση της διάβρωσης του χάλυβα τύπου AISI 434 SS σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου. Τέλος, τα $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ και $\text{Sm}(\text{NO}_3)_3$ δρουν ως μεικτού τύπου αναστολείς.

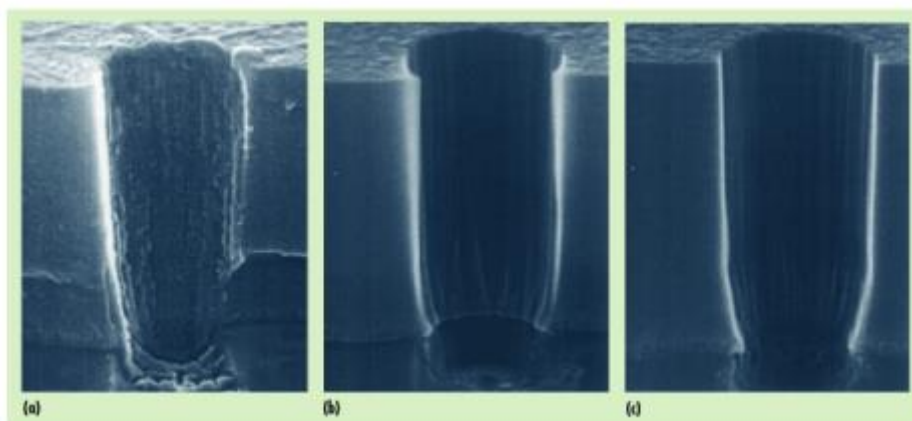
Όλες οι παραπάνω φυσικές ενώσεις είναι αποτελεσματικές και αποδοτικές ως πράσινοι αναστολείς της διάβρωσης των μετάλλων και των κραμάτων τους λόγω της βιοαποικοδομησιμότητας τους, της εύκολης διαθεσιμότητας τους, της βιωσιμότητας τους και της μη τοξικής τους φύσης. (Παναγόπουλος, 2004) (Pantazopoulou et al., 2022)

3.9 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΑΝΑΣΤΟΛΕΩΝ

Η επιλογή των αναστολέων ξεκινάει βάσει των φυσικών ιδιοτήτων τους:

- Ο αναστολέας πρέπει να είναι στερεό ή υγρό.
- Είναι σημαντικά τα σημεία τήξης και πήξης.
- Πρέπει να είναι συμβατός με άλλες ουσίες του συστήματος.
- Απαιτούνται συγκεκριμένες τιμές διαλυτότητας.

Η δυσκολία στην αξιολόγηση αναστολέων διάβρωσης έγκειται στο σχεδιασμό πειραμάτων που προσομοιώνουν τις πραγματικές συνθήκες του συστήματος. Οι μεταβλητές που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η θερμοκρασία, η πίεση, η ταχύτητα και οι ιδιότητες των μετάλλων. Οι καλύτεροι έλεγχοι πρέπει να γίνονται στις δυσμενέστερες δυνατές συνθήκες για το σύστημα. Τα δείγματα που χρησιμοποιούνται για την δοκιμή πρέπει να είναι ίδια με τα δείγματα που θα χρειαστεί να προστατευθούν αργότερα. Ακόμη και οι μικρότερες διαφορές στις ιδιότητες του μετάλλου, όπως το μέγεθος των κόκκων, ο προσανατολισμός, οι δυνάμεις εναπόθεσης και η κατάσταση της επιφάνειας είναι δυνατό να προκαλέσουν διαφορές στην απόδοση του αναστολέα. Συνήθως χρειάζεται καθαρισμός της επιφάνειας για την αφαίρεση του επιφανειακού λίπους (Εικ. 3.22).



Εικ. 3.22: Εικόνα ενός μετάλλου σε τρία διαφορετικά στάδια καθαρισμού [38]

Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των αναστολέων διάβρωσης διεξάγονται συγκεκριμένοι εργαστηριακοί έλεγχοι, όπως οι παρακάτω: (Fajardo, 2018)

- I. **Μετρήσεις απώλειας μάζας (Weight Loss Measurement WLM):** Για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί έλεγχος της απώλειας βάρους πρέπει τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται ως δείγματα να καθαρίζονται, να γυαλίζονται με λειαντικό χαρτί, να πλένονται με διαλύτες, όπως ακετόνη, αιθανόλη και απεσταγμένο νερό και τέλος να στεγνώνουν. Στην συνέχεια γίνεται η αρχική ζύγιση των δοκιμίων σε ψηφιακούς ζυγούς ακριβείας. Έπειτα από μια συγκεκριμένη περίοδο τα δοκίμια που έχουν υποστεί διάβρωση καθαρίζονται και ζυγίζονται ξανά, έτσι ώστε να γίνει ο έλεγχος. Το ποσοστό απόδοσης του αναστολέα όπως και ο ρυθμός διάβρωσης αξιολογούνται με βάση τις δυο εξισώσεις:

$$CR = \frac{w_1 - w_2}{A \cdot t} \quad \& \quad n\% = \frac{w_1 - w_2}{w_1} * 100\%$$

CR = ρυθμός διάβρωσης ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)

w_1 & w_2 = απώλεια βάρους (g) μεταλλικών δοκιμίων παρουσία αναστολέων

A = εμβαδόν επιφάνειας δοκιμίου (cm^2)

t = χρόνος βύθισης (h)

Αυτή η μέθοδος είναι η θεμελιώδης μέθοδος μέτρησης της απόδοσης φιλικών αναστολέων διάβρωσης σε διάφορα προγράμματα και είναι η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στο πειραματικό μέρος αυτής της εργασίας.

II. **Μέθοδος γραμμικής αντίστασης πόλωσης (Linear Polarization Resistance LPR):** αποτελεί ακόμη μια μέθοδο ελέγχου διάβρωσης, η οποία αφορά την διάταξη της ισορροπίας της διάβρωσης στις χαλύβδινες επιφάνειες (Εικ. 3.23). Η μέθοδος είναι γρήγορη και αναπτύχθηκε με βάση την θεωρία του Stern Geary με το ρεύμα διάβρωσης να δίνεται από τον τύπο:

$$I_{\text{corr}} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c)} \frac{1}{R_{\text{ct}}} = \frac{B}{R_{\text{ct}}}$$

Όπου β_a , β_c = Σταθερές Tafel, B = Σταθερά Stern Geary, R_{ct} = Αντίσταση μεταφοράς φορτίου

Για να βρεθεί η αντίσταση πόλωσης R_p της μεταλλικής επιφάνειας πολώνεται με μία μικρή υπέρταση ΔE η οποία κυμαίνεται από 10-30mV σε σχέση με το δυναμικό ισορροπίας. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται ότι για την ενεργό διάβρωση η μετατόπιση του δυναμικού είναι εντός της γραμμικής περιοχής Stern Geary. Το ρεύμα που προκύπτει ελέγχεται σε μία συγκεκριμένη περίοδο των 30 δευτερολέπτων έως 5 λεπτών. Η αντίσταση R_p υπολογίζεται με την διαίρεση της υπέρτασης προς το επαγόμενο ρεύμα. Επίσης μετρώντας το ρεύμα διάβρωσης I_{corr} σε συχνά χρονικά διαστήματα είναι δυνατός ο υπολογισμός της απώλειας της συνολικής μάζας. (Law, 2004), (Sadowski, 2010)

Η αντίσταση πόλωσης (R_p) δίνεται από την σχέση:

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

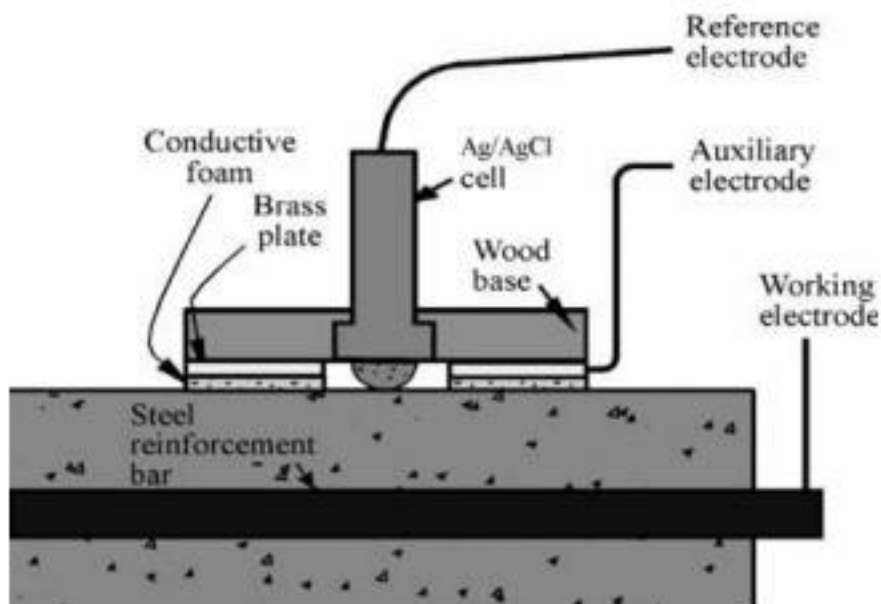
ΔE = υπέρταση,

ΔI = ρεύμα

Η αντίσταση μεταφοράς φορτίου (R_{ct}) δίνεται από την σχέση:

$$R_{\text{ct}} = R_p - R_s$$

R_s = αντίσταση διαλύματος



Εικ 3.23: Τεχνική γραμμικής πόλωσης [42]

III. Ποτενσιοδυναμικές καμπύλες πόλωσης (Potentiodynamic Polarization PDP):

Ακόμη μία μέθοδος για την μέτρηση του ρυθμού διάβρωσης, της απόδοσης των φιλικών αναστολέων διάβρωσης και του μηχανισμού της προστασίας από τη διάβρωση μέσω ηλεκτροχημικών μετρήσεων. Συνήθως γίνεται χρήση τριών ηλεκτροδίων στο ηλεκτροχημικό στοιχείο (ηλεκτρόδιο πλατίνας, ράβδος γραφίτη (graphite rod) και ηλεκτρόδιο Ag / AgCl ως ηλεκτρόδιο αναφοράς), τα οποία βυθίζονται σε διάλυμα του οποίου είναι γνωστή η συγκέντρωση και ο όγκος. Η τάση του συστήματος μετριέται και ελέγχεται από το ηλεκτρόδιο αναφοράς, ενώ το ρεύμα από το αντίθετο. Όταν το σύστημα ισορροπήσει, πραγματοποιείται σάρωση PDP και παρουσιάζεται ένα διάγραμμα Tafel όπως στην (Εικ. 3.24) και με τις αντίστοιχες εξισώσεις:

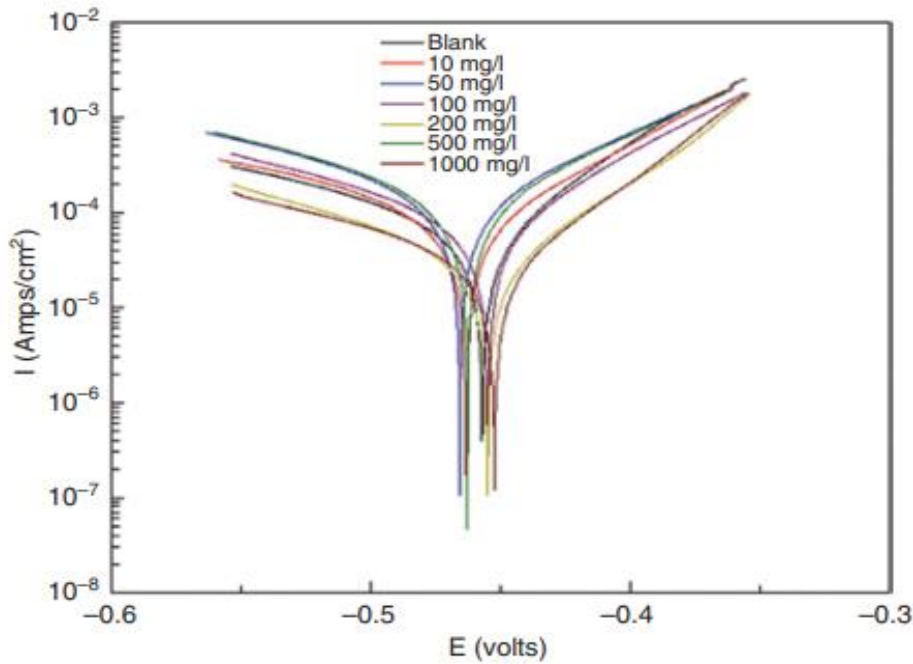
$$CR = \frac{i_{corr} \cdot \kappa \cdot EW}{d} \left(\frac{mm}{y} \right) \quad \& \quad n\% = \frac{i_{corr}^0 - i_{corr}^1}{i_{corr}^0} \cdot 100\%$$

EW = ισοδύναμο βάρος (g)

i_{corr}^0 & i_{corr}^1 = πυκνότητα ρεύματος χωρίς και με αναστολέα διάβρωσης ($\mu A/cm^2$)

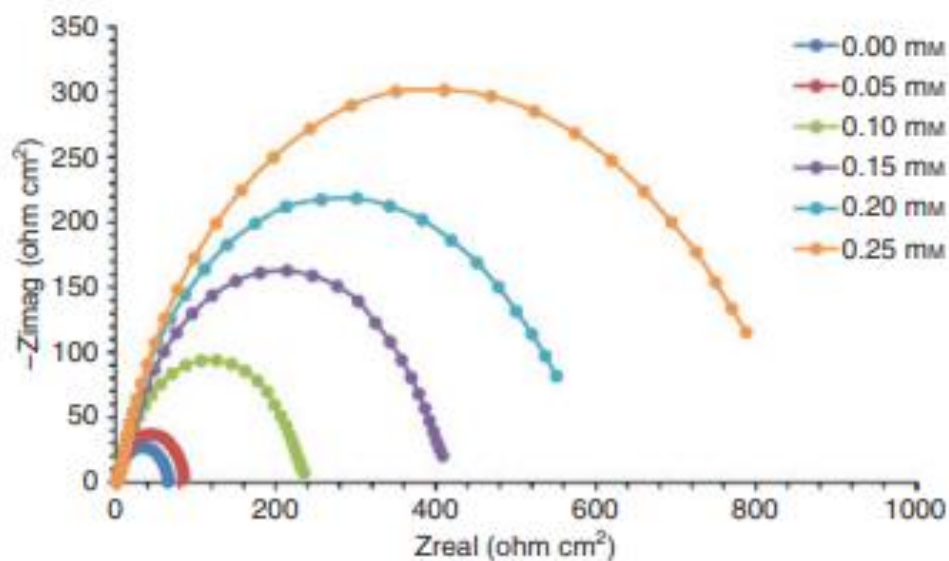
d = πυκνότητα (g/cm^3)

κ = συντελεστής μετατροπής ($mm \cdot \mu A^{-1} \cdot cm^{-1} \cdot y^{-1}$)

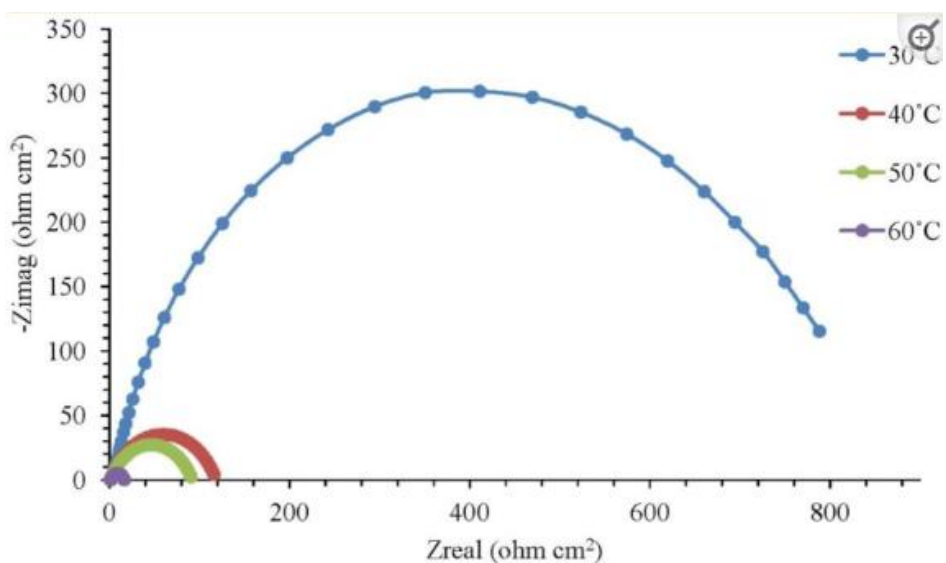


Εικ 3.24: Καμπύλη πόλωσης για διάβρωση χάλυβα σε 1M HCl με εκχυλίσματα λωτού [41]

IV. **Φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης (εμπέδησης) (Electrochemical Impedance Spectroscopy EIS):** Η μέθοδος αυτή αφορά επιτόπιες ηλεκτροχημικές αλλαγές με φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν στην διεπιφάνεια του μετάλλου- ηλεκτρολύτη με σκοπό να ληφθούν ορισμένες πληροφορίες από διαγράμματα αντίστασης, όπως η κινητική των ηλεκτροδίων, οι ιδιότητες της επιφάνειας του δοκιμίου και ο μηχανισμός της διάβρωσης. Χρησιμοποιούνται τρία ηλεκτρόδια με διακύμανση τάσης 100kHz έως 10mHz. Οι παράμετροι EIS λαμβάνονται με την χρήση ενός κατάλληλου γραφήματος (Nyquist plot). Στην (Εικ 3.25) παρουσιάζεται μία τέτοια καμπύλη (Nyquist) για την εξέταση χάλυβα σε 1M H₂SO₄ σε 30°C σε διάφορες συγκεντρώσεις αναστολέα διάβρωσης. Ενώ η (Εικ. 3.26) παρουσιάζει καμπύλες (Nyquist) για χάλυβα σε 0,1 M H₂SO₄ που περιέχει 0,25mM αναστολέα διάβρωσης σε διαφορετικές θερμοκρασίες.



Εικ 3.25: Γράφημα Nyquist για χάλυβα σε 1M H₂SO₄ για διάφορες συγκεντρώσεις αναστολέα στους 30°C[39]



Εικ 3.26: Γράφημα Nyquist για χάλυβα σε 1M H₂SO₄ με 0.25mM αναστολέα διάβρωσης σε διαφορετικές θερμοκρασίες[40]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στην συγκεκριμένη εργασία έγινε μελέτη της διάβρωσης δοκιμίων από χάλυβα με την διαδικασία της εμβάπτισης και της παραμονής τους για ορισμένο χρόνο σε διαλύματα χλωριούχου νατρίου με ή χωρίς την παρουσία φυσικών οργανικών ουσιών. Χρησιμοποιήθηκαν εκχυλίσματα από φύλλα φυτών ή διαλύματα φυτικών χρωστικών από είδη που φύονται στην Ελλάδα, και τα οποία μελετήθηκαν για τη δράση τους ως αναστολείς της διάβρωσης των δοκιμίων.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Τεχνολογίας Ναυπηγικών Υλικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών και στο Διατμηματικό Ερευνητικό Εργαστήριο Τεχνολογίας Προηγμένων Υλικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η συμπεριφορά των δοκιμίων χάλυβα στο διαβρωτικό περιβάλλον χλωριόδοντων. Τα δοκίμια εμβαπτίστηκαν σε δοχεία που περιείχαν διαλύματα χλωριούχου νατρίου 3.5% w/w με ή χωρίς την προσθήκη εκχυλισμάτων φυτικών ουσιών που μελετήθηκαν ως αναστολείς της διάβρωσης.

4.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

4.1.1 ΔΟΚΙΜΙΑ

Για την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν 48 δοκίμια από τεμάχια χάλυβα, που κόπηκαν σε τετράγωνο σχήμα με διαστάσεις 5cm x 5cm και πάχος 5 mm.

4.1.2 ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ

Χλωριούχο νάτριο (NaCl)

Το χλωριούχο νάτριο(NaCl) είναι το άλας, που είναι υπεύθυνο για την αλατότητα του θαλασσινού νερού. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για τα πειράματα της εργασίας και μάλιστα, σε συγκέντρωση 3,5% κ.β. που θεωρείται ισοδύναμη με αυτή του θαλασσινού νερού. Στόχος της εργασίας ήταν η μελέτη της επίδρασης ορισμένων φυσικών ουσιών ως αναστολέων διάβρωσης των χαλύβδινων επιφανειών όταν εκτεθούν σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου.



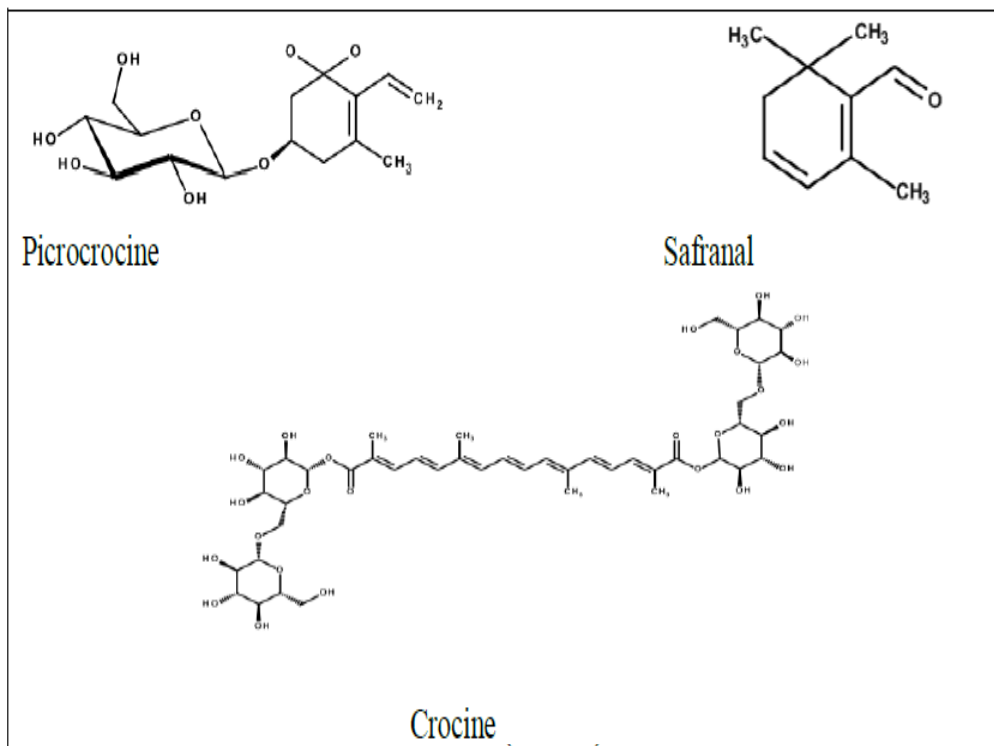
Εικ. 4.1: Διάλυμα αναφοράς (3,5% κ. β. NaCl)

Κροκίνη

Ο Κρόκος, που είναι γνωστός επίσης με τις ονομασίες ζαφορά και σαφράν, παραλαμβάνεται από τους στήμονες ενός φυτού (*Crocus sativus*, *Crocine*), που φύεται στην ομώνυμη περιοχή της Κοζάνης. Αποτελεί ένα από τα πιο εκλεκτά και ιδιαίτερα φυτά που απαντάται μόνο σε λίγες περιοχές του πλανήτη και χρησιμοποιείται για τις πολύτιμες ιδιότητες του από τα προϊστορικά χρόνια. Εκτός από τη μεγάλη χρωστική του ικανότητα, διαθέτει ξεχωριστές ιδιότητες, που σχετίζονται με τα υψηλά επίπεδα ορισμένων αντιοξειδωτικών ουσιών και για το λόγο αυτό αξιοποιείται στη βιομηχανία τροφίμων, φαρμάκων, κτλ. Περιέχει συστατικά όπως:

- κροκίνη
- πικροκροκίνη
- σαφραναλίνη
- καμπερόλη
- κροκετίνη.

Αυτά τα αντιοξειδωτικά βοηθούν στην καταπολέμηση του οξειδωτικού στρες και των ελεύθερων ριζών στο ανθρώπινο σώμα. Καθώς το οξειδωτικό στρες και οι ελεύθερες ρίζες είναι η αιτία για την ανάπτυξη πολλών προβλημάτων υγείας, συμπεριλαμβανομένου του καρκίνου και των καρδιακών παθήσεων, αντιοξειδωτικά όπως αυτά μπορεί να βοηθήσουν στην προστασία της υγείας και της ευεξίας ενός ατόμου.



Εικ. 4.2: Οι χημικοί τύποι των κυριότερων ενώσεων που περιέχονται στο φυτό Κρόκος

Τα παραπάνω συστατικά παίζουν σημαντικό ρόλο και στη διάβρωση, λειτουργώντας ως φυσικοί αναστολείς, μειώνοντας το ρυθμό των οξειδωτικών δράσεων, όπως αναφέρεται σε πρόσφατες δημοσιεύσεις. Η Κροκίνη σχηματίζει ένα πορτοκαλί διάλυμα με προστατευτική αντιοξειδωτική δράση. (Pantazoroulou et al., 2022)



Εικ. 4.3: Στήμονες από το άνθος του φυτού Κρόκος Κοζάνης



Εικ. 4.4: Παρασκευή διαλύματος χλωριούχου νατρίου με την παρουσία Κρόκου Κοζάνης

Φύλλα πράσινου Τσαγιού

Το Τσάι είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα ροφήματα στον κόσμο και υπάρχει σε πολλές ποικιλίες. Περιέχει σε ποσοστό περίπου 3% το αλκαλοειδές καφεΐνη. Και επιπλέον συστατικά είναι οι πουρίνες θεοφυλλίνη και θεοβρωμίνη που είναι παράγωγα της ξανθίνης. Ακόμα περιέχει πολυφαινόλες, ταννίνες και κατεχίνες στις οποίες αποδίδεται η αντιοξειδωτική δράση του.

Το ελληνικό Τσάι του βουνού συναντάται στην Μεσόγειο. Βρίσκεται στις κορυφές των βουνών με ύψος μεγαλύτερο των 900 μέτρων. Η γεύση του συνδυάζει την μέντα, με τα εσπεριδοειδή και το χαμομήλι. Οι βιολογικές δράσεις του Τσαγιού ήταν γνωστές από την αρχαιότητα, και για το λόγο αυτό το πράσινο τσάι χρησιμοποιήθηκε στην ιατρική ως αντιφλεγμονώδες, με αντιμικροβιακές και βακτηριοκτόνες ιδιότητες.

Στην Ελλάδα το Τσάι του βουνού καταναλώνεται κυρίως τον χειμώνα για την καταπολέμηση του κρυολογήματος και της γρίπης. Στην περίπτωση που ένα άτομο αρρωστήσει, το τσάι μπορεί να το βοηθήσει να αντιμετωπίσει τον πυρετό και να περιορίσει τη φλεγμονή. Επίσης βοηθάει στη δυσπεψία, ενισχύει το ανοσοποιητικό σύστημα και βοηθάει στην καταπολέμηση του άγχους.



Εικ.4.5: Φύλλα του φυτού πράσινο Τσάι του βουνού



Εικ. 4.6: Χρήση εκχυλίσματος Τσαγιού για την παρασκευή διαλύματος

Χένα

Η Χένα είναι ένα φυτικό προϊόν με προέλευση από Αφρική και Ασία. Παραλαμβάνεται από το ομώνυμο φυτό που έχει τη μορφή μεγάλου θάμνου ή μικρού δέντρου που αναπτύσσεται σε ζεστά και υγρά κλίματα. Από αυτό το φυτό, συλλέγονται μόνο τα φύλλα, μετά την αποξήρανση των οποίων δημιουργείται η σκόνη που χρησιμοποιείται ως χρωστική ύλη.

Υπάρχουν δύο βασικές ποιότητες Χένας οι οποίες εξαρτώνται από την περιεκτικότητα της ουσίας lawsonia στα φύλλα του φυτού. Όταν η περιεκτικότητα είναι από 1 έως 4% τότε συλλέγονται τα φύλλα, αποξηραίνονται, τρίβονται σε σκόνη και προωθούνται στην αγορά.

Στην αρχαιότητα υπήρχε μεγάλη καλλιέργεια σε πολλά είδη Χένας στην Αίγυπτο. Πολλά από αυτά τα είδη χρησιμοποιούνταν στην ιατρική σαν αντιμυκητιακά, αντιβακτηριακά και καθαρτικά τον 9^ο και 10^ο αιώνα. Η Χένα διαθέτει αντιμικροβιακές ουσίες όπως ανθρακινόνη και χρυσοφανικό οξύ που είναι αποτελεσματικοί αναστολείς.



Εικ. 4.7: Είδος Χένας που φέεται στη Μαλαισία



Εικ.4.8: Διάλυμα χλωριούχου νατρίου μετά την προσθήκη Χένας

Με τα παραπάνω υλικά, παρασκευάστηκε αρχικά διάλυμα χλωριούχου νατρίου 3,5% κ.β. που χρησιμοποιήθηκε ως διάλυμα αναφοράς, και στη συνέχεια σε ξεχωριστά δοχεία, προστέθηκαν στο διάλυμα αναφοράς εκχύλισμα από πράσινο Τσάι (25,0 g/L), Κρόκος Κοζάνης και Χένα (0,25 g/L σκόνης από τα δυο τελευταία). Τα διαλύματα διατηρήθηκαν σε σταθερή θερμοκρασία δωματίου.

A	Διάλυμα αναφοράς
B	Διάλυμα αναφοράς + Πράσινο Τσάι
Γ	Διάλυμα αναφοράς +Χένα
Δ	Διάλυμα αναφοράς +Κροκίκη

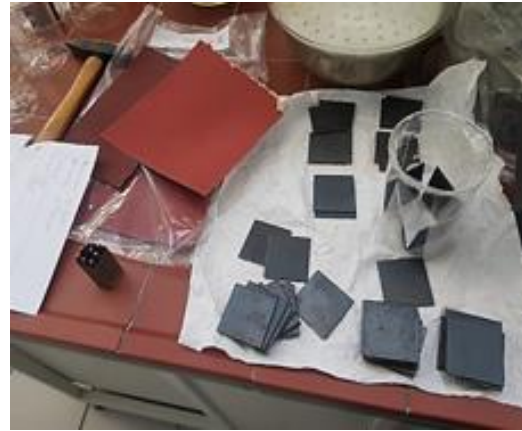
4.1.3 ΟΡΓΑΝΑ – ΣΥΣΚΕΥΕΣ

Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν:

- Ζυγός ακριβείας
- Στιλνόμετρο (Lovibond TG 60 Gloss Meter) που λειτουργεί με τη μέθοδο προσδιορισμού της στιλνότητας των επιστρώσεων χρησιμοποιώντας τρεις γεωμετρίες των 20°, 60° ή 85°. ISO:2813
- Οπτικό μικροσκόπιο Labor - LuxMI συνδεδεμένο με φωτογραφική μηχανή Moticam-S1. Επίσης χρησιμοποιήθηκε αντικειμενικός φακός X10 με τον οποίο επιτυγχάνεται μεγέθυνση κατά 100 φορές.

4.1.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Τα δοκίμια χάλυβα καθαρίστηκαν σε μηχανουργείο για να αφαιρεθούν τυχόν ακαθαρσίες και ξένες προσμίξεις και έγινε η αρίθμηση τους.



Εικ. 4.9: Δοκίμια χάλυβα, επιλογή και αρίθμηση



Εικ. 4.10: Καθαρισμός δοκιμίων χάλυβα



Εικ. 4.11: Δοκίμια χάλυβα μετά τη μηχανική λείανση

Μετά τον καθαρισμό και πριν την εμφάνιση των δοκιμών έγινε ζύγιση σε ζυγό ακριβείας και τηρήθηκε αρχείο για την παρακολούθηση της μεταβολής της μάζας τους για ορισμένο χρονικό διάστημα.

Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε γυάλινα δοχεία κατά ομάδες ανάλογα με τον αναστολέα. Όλα τα δοχεία καλύφθηκαν με πλαστική μεμβράνη για να αποφευχθούν προβλήματα εξάτμισης ή επιμόλυνσης των διαλυμάτων από το περιβάλλον του εργαστηρίου. Η στάθμη του υγρού ελεγχόταν σταθερά και όταν μειωνόταν κάτω από τη γραμμή αναφοράς, γινόταν αναπλήρωση του. Προκειμένου να μπορεί να έχει εγκυρότητα το πείραμα, και να εξαχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα, έγινε προσπάθεια να διατηρηθούν όλες οι παράμετροι σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια του.

Στη συνέχεια, ανά εβδομάδα τα δοκίμια εξάγονταν από τα διαλύματα και ξεπλένονταν με νερό δικτύου και καθαρίζονταν ελαφρά με ένα σφουγγάρι από την μαλακή πλευρά, ακολουθούσε ξέπλυμα με απιονισμένο νερό και τα δοκίμια στεγνωναν με ρεύμα αέρα. Ακολουθούσε η ζύγιση και η καταγραφή της μάζας τους. Η διάρκεια του πειράματος ήταν 8 εβδομάδες.



Εικ.4.12: Η διάταξη των δοχείων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα

4.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.2.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΜΑΖΑΣ

Με βάση τις πειραματικές μετρήσεις από τα πειράματα απώλειας μάζας κατασκευάστηκαν οι πίνακες τιμών που εμφανίζονται παρακάτω (Πίνακες 4.1- 4.4) και με βάση αυτούς τα παρακάτω διαγράμματα (Εικόνες 4.13-4.16):

Πίνακας 4.1: Απώλεια μάζας δοκιμίων γάλυβα στο Διάλυμα Α				
Χρόνος (Εβδομάδες)	$\Delta m1(g)$	$\Delta m2(g)$	$\Delta m3(g)$	M.O.(Δm)
0	0	0	0	0
1	0.76	0.997	1.037	0.931
2	0.772	1.008	1.051	0.943
3	0.807	1.046	1.086	0.979
4	0.834	1.076	1.11	1.006
5	0.863	1.106	1.14	1.036
6	0.886	1.127	1.164	1.059
7	0.911	1.155	1.192	1.086
8	0.951	1.188	1.236	1.125

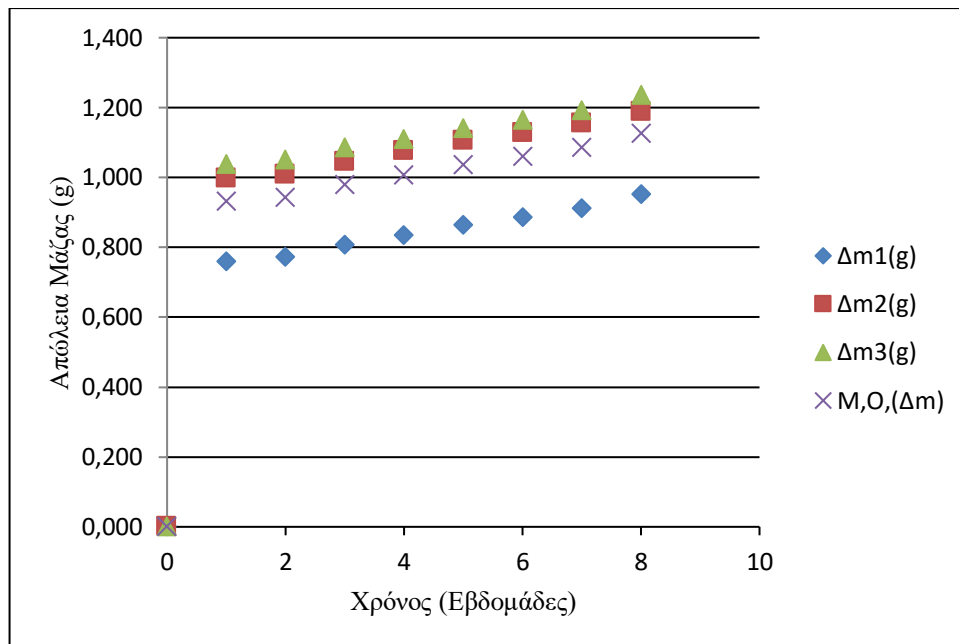
Πίνακας 4.2: Απώλεια μάζας δοκιμίων γάλυβα στο Διάλυμα Β				
Χρόνος (Εβδομάδες)	$\Delta m1(g)$	$\Delta m2(g)$	$\Delta m3(g)$	M.O.(Δm)
0	0	0	0	0
1	0.222	0.251	0.287	0.253
2	0.291	0.316	0.355	0.320
3	0.366	0.372	0.382	0.373
4	0.392	0.394	0.419	0.401
5	0.42	0.422	0.436	0.426
6	0.437	0.441	0.463	0.447
7	0.469	0.479	0.483	0.477
8	0.491	0.505	0.51	0.502

Πίνακας 4.3: Απώλεια μάζας δοκιμίων χάλυβα στο Διάλυμα Γ

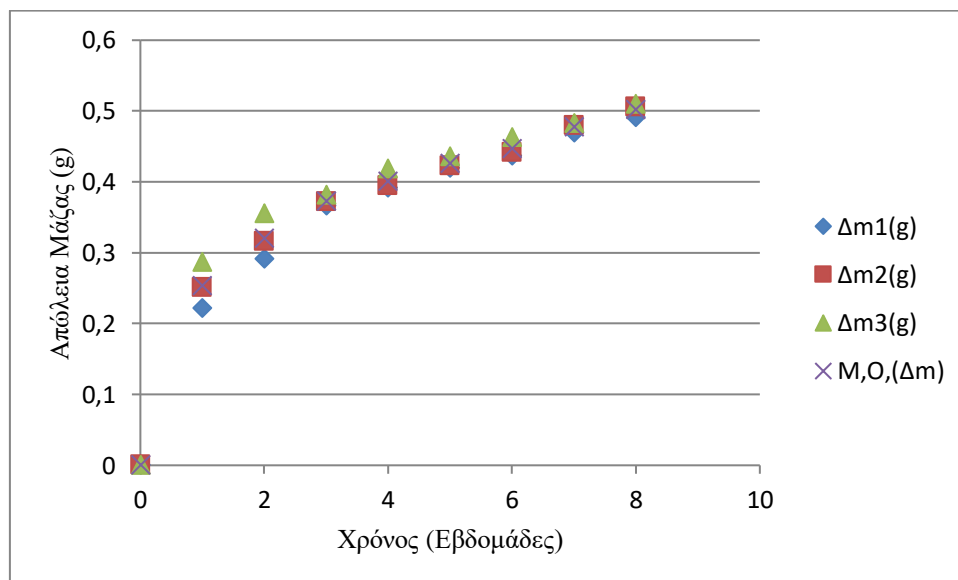
Χρόνος (Εβδομάδες)	$\Delta m_1(g)$	$\Delta m_2(g)$	$\Delta m_3(g)$	M.O.(Δm)
0	0	0	0	0
1	0.027	0.033	0.05	0.0366
2	0.051	0.057	0.076	0.061
3	0.077	0.079	0.095	0.083
4	0.104	0.106	0.114	0.108
5	0.133	0.138	0.141	0.137
6	0.153	0.162	0.167	0.160
7	0.174	0.188	0.201	0.187
8	0.205	0.228	0.288	0.240

Πίνακας 4.4: Απώλεια μάζας δοκιμίων χάλυβα στο Διάλυμα Δ

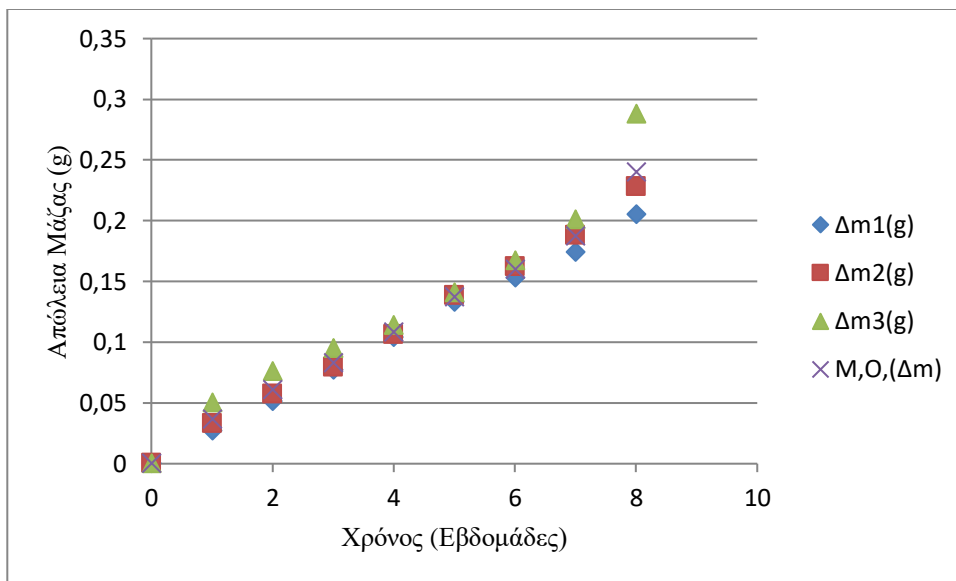
Χρόνος (Εβδομάδες)	$\Delta m_1(g)$	$\Delta m_2(g)$	$\Delta m_3(g)$	M.O.(Δm)
0	0	0	0	0
1	0.025	0.023	0.028	0.025
2	0.035	0.04	0.05	0.041
3	0.069	0.075	0.081	0.075
4	0.093	0.099	0.104	0.098
5	0.12	0.127	0.14	0.129
6	0.141	0.147	0.156	0.148
7	0.172	0.177	0.194	0.181
8	0.2	0.222	0.246	0.222



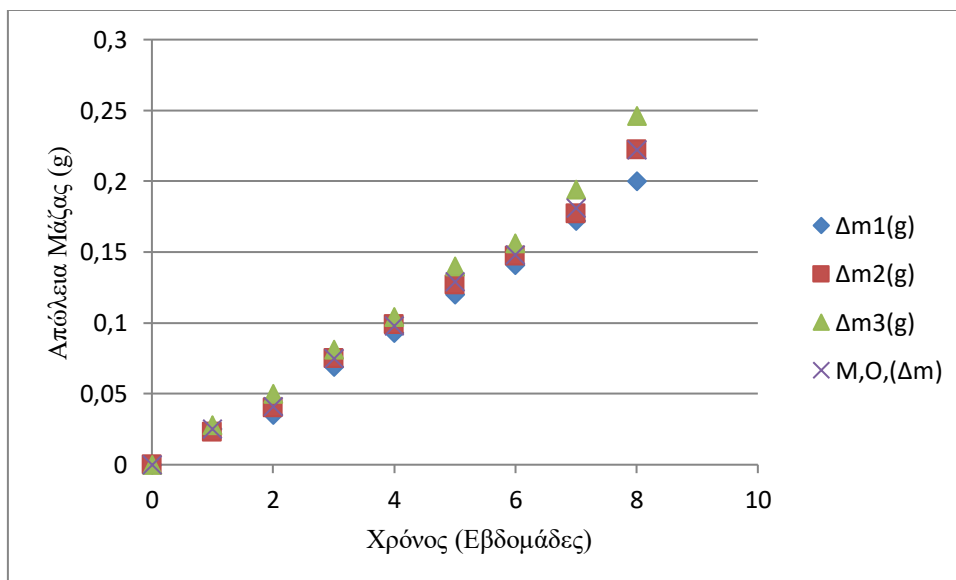
Εικ 4.13: Μεταβολή της απώλειας μάζας των δοκιμίων χάλυβα σε συνάρτηση με το χρόνο δοκιμασίας διάβρωσης στο διάλυμα Α. Εμφανίζονται οι τρεις διαφορετικές μετρήσεις καθώς και ο Μ.Ο. αυτών.



Εικ. 4.14: Μεταβολή της απώλειας μάζας των δοκιμίων χάλυβα σε συνάρτηση με το χρόνο δοκιμασίας διάβρωσης στο διάλυμα Β. Εμφανίζονται οι τρεις διαφορετικές μετρήσεις καθώς και ο Μ.Ο. αυτών.



Εικ. 4.15: Μεταβολή της απώλειας μάζας των δοκιμίων χάλυβα σε συνάρτηση με το χρόνο δοκιμασίας διάβρωσης στο διάλυμα Γ. Εμφανίζονται οι τρεις διαφορετικές μετρήσεις καθώς και ο Μ.Ο. αυτών.



Εικ. 4.16: Μεταβολή της απώλειας μάζας των δοκιμίων χάλυβα σε συνάρτηση με το χρόνο δοκιμασίας διάβρωσης στο διάλυμα Δ. Εμφανίζονται οι τρεις διαφορετικές μετρήσεις καθώς και ο Μ.Ο. αυτών.

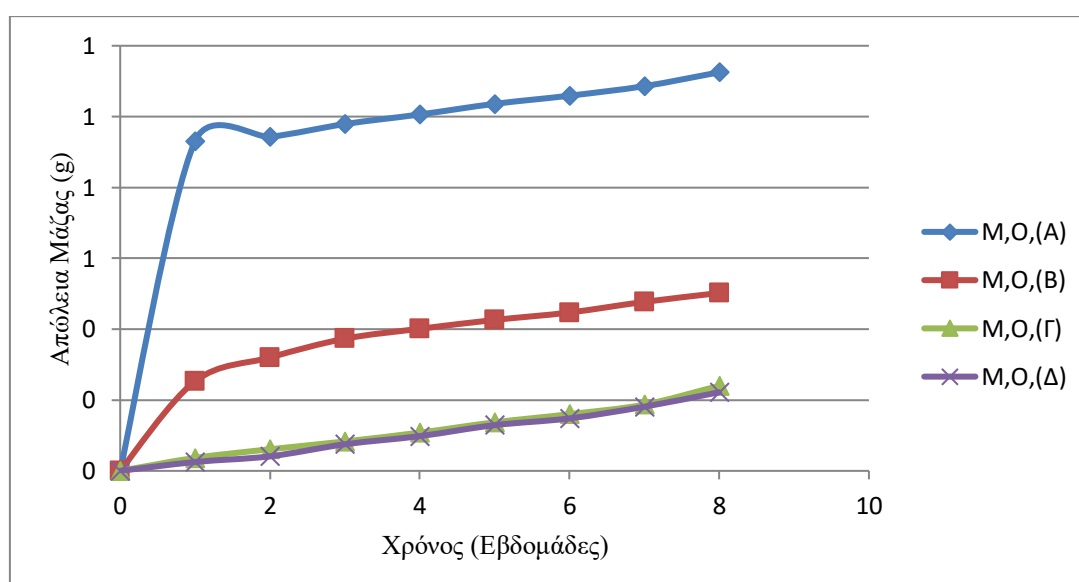
Ακολουθούν οι μαθηματικές παράμετροι που προέκυψαν από την προσομοίωση των τιμών των Μέσων Όρων (Μ.Ο.) των πειραματικών μετρήσεων απώλειας βάρους δοκιμίων με τη χρήση διαφορετικών μαθηματικών μοντέλων: γραμμικό μοντέλο ($y = A + B_1x$), παραβολικό μοντέλο ($y = A + B_1x + B_2x^2$) και εκθετικό μοντέλο ($y = A + B_1e^{-\frac{x}{B_2}}$)

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς, κατασκευάζεται συνοπτικός Πίνακας τιμών (Πίνακας 4.5), που βοηθά για να γίνει η σύγκριση της αποτελεσματικότητας των ουσιών που μελετήθηκαν ως αναστολείς της διάβρωσης των δοκιμίων του χάλυβα στην εργασία.

Πίνακας 4.5: Συγκεντρωτικός Πίνακας Μαθηματικών Παραμέτρων					
Διάλυμα	Μοντέλο	Παράμετροι			R ²
Διάλυμα Α		A	B1	B2	
	Γραμμικό	0.087	0.557		0.479
	Παραβολικό	0.026	0.302	0.306	0.710
	Εκθετικό	1.125	-1.111	0.73634	0.934
Διάλυμα Β					
	Γραμμικό	0.049	0.156		0.782
	Παραβολικό	-0.009	0.124	0.069	0.921
	Εκθετικό	0.502	-0.473	2.217	0.970
Διάλυμα Γ					
	Γραμμικό	0.027	0.001		0.988
	Παραβολικό	0.002	0.022	0.007	0.991
	Εκθετικό	0.240	-0.253	4.982	0.920
Διάλυμα Δ					
	Γραμμικό	0.027	-0.006		0.992
	Παραβολικό	0.0	0.020	0.001	0.996
	Εκθετικό	0.222	-0.242	4,879	0.912

Από την μελέτη του Πίνακα 4.5 και συγκεκριμένα με βάση το συντελεστή συσχέτισης (R^2) φαίνεται ότι το εκθετικό μοντέλο εκφράζει καλύτερα το φαινόμενο της διάβρωσης στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται το διάλυμα αναφοράς (Α) και το διάλυμα (Β), ενώ το παραβολικό μοντέλο είναι πιο κατάλληλο για την περιγραφή των αποτελεσμάτων των δοκιμών που έδωσαν τα διαλύματα (Γ) και (Δ). Τα αποτελέσματα αυτά ενδέχεται να σχετίζονται με το μηχανισμό με τον οποίο πραγματοποιείται το φαινόμενο της διάβρωσης, αντικείμενο που θα μπορούσε να αποτελέσει το θέμα μελλοντικής ερευνητικής εργασίας.

Στη συνέχεια, από τις τιμές των Μ.Ο. που αναφέρονται στους Πίνακες τιμών 4.1-4.4 κατασκευάστηκε συνοπτικό διάγραμμα (Εικ. 4.17) για την συγκριτική μελέτη της επίδρασης των αναστολέων στο διάλυμα αναφοράς.

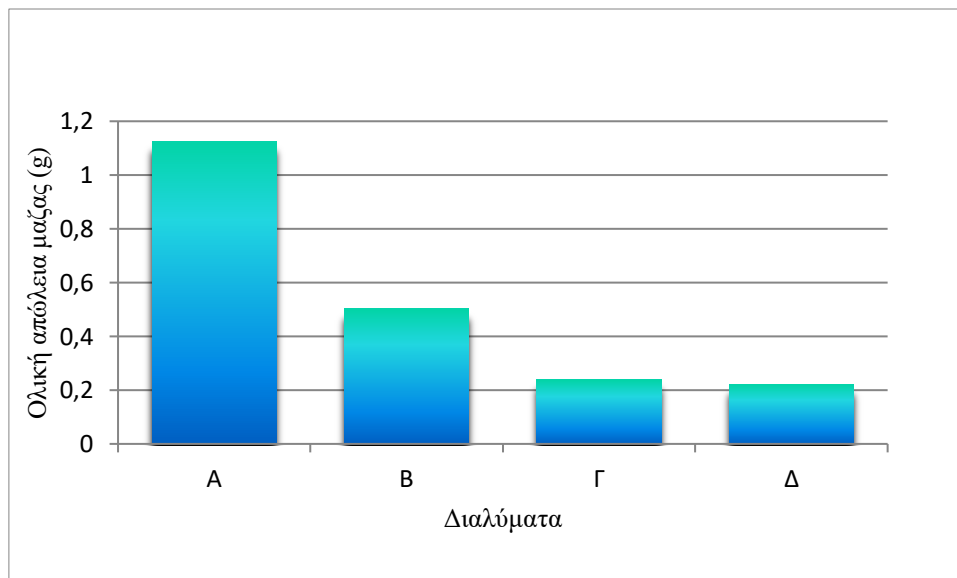


Εικ. 4.17: Μεταβολή της απώλειας μάζας των δοκιμίων χάλυβα σε συνάρτηση με το χρόνο δοκιμασίας διάβρωσης στα διαλύματα Α, Β, Γ, Δ. Εμφανίζονται οι τρεις διαφορετικοί ΜΟ αυτών.

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε ο Πίνακας 4.6 στον οποίο καταγράφηκε η συνολική απώλεια μάζας των δοκιμίων στα διαλύματα Α, Β, Γ, Δ μετά την εμβάπτιση στο διαβρωτικό περιβάλλον για 8 εβδομάδες. Από τις τιμές του Πίνακα κατασκευάστηκε διάγραμμα (Εικ. 4.18).

Πίνακας 4.6: Συνολική απώλεια μάζας των δοκιμίων χάλυβα στα διαλύματα Α, Β, Γ, Δ μετά από 8 εβδομάδες

Διαλύματα	Ολική απώλεια μάζας (g)
A	1.125
B	0.502
Γ	0.240
Δ	0.222



Εικ. 4.18: Απεικόνιση της συνολικής απώλειας μάζας των δοκιμίων χάλυβα στα διαλύματα Α, Β, Γ και Δ κατά τη δοκιμασία διάβρωσης για χρόνο 8 εβδομάδων.

Ακολουθήσε ο υπολογισμός του ρυθμού διάβρωσης των δοκιμίων με βάση τη μαθηματική σχέση:

$$v_{corr} = \frac{\Delta m (g)}{S (cm^2) * t (h)}$$

Όπου S η επιφάνεια των δοκιμίων $5cm \times 5cm \times 2 \psiεις = 50cm^2$) και t ο χρόνος δοκιμασίας (8 εβδομάδες \times 7 ημέρες \times 24 ώρες = 1344 h).

Επομένως για το διάλυμα Α ισχύει ότι:

$$v_{corr} = \frac{\Delta m(g)}{S(cm^2) \cdot t(h)} \Leftrightarrow v_{corr} = \frac{1.125}{50 \cdot 1344} \Leftrightarrow v_{corr} = 1.67 \cdot 10^{-6} \frac{g}{cm^2 \cdot h} = 0.40 \frac{g}{m^2 \cdot day}$$

Για το διάλυμα Β ισχύει ότι:

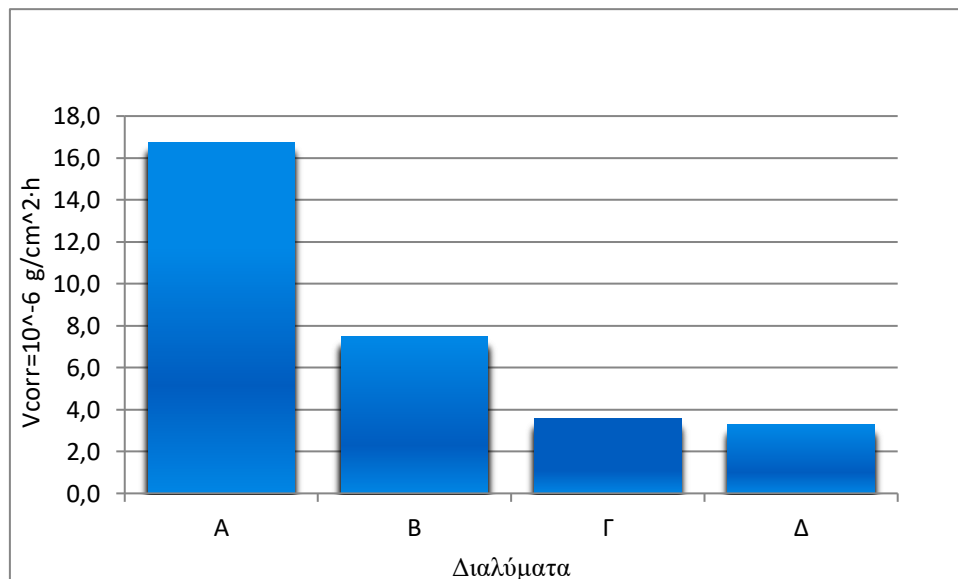
$$v_{corr} = \frac{\Delta m(g)}{S(cm^2) \cdot t(h)} \Leftrightarrow v_{corr} = \frac{0.502}{50 \cdot 1344} \Leftrightarrow v_{corr} = 7.47 \cdot 10^{-6} \frac{g}{cm^2 \cdot h} \\ = 1.79 \frac{g}{m^2 \cdot day}$$

Για το διάλυμα Γ ισχύει ότι:

$$v_{corr} = \frac{\Delta m(g)}{S(cm^2) \cdot t(h)} \Leftrightarrow v_{corr} = \frac{0.24}{50 \cdot 1344} \Leftrightarrow v_{corr} = 3.57 \cdot 10^{-6} \frac{g}{cm^2 \cdot h} \\ = 0.85 \frac{g}{m^2 \cdot day}$$

Για το διάλυμα Δ ισχύει ότι:

$$v_{corr} = \frac{\Delta m(g)}{S(cm^2) \cdot t(h)} \Leftrightarrow v_{corr} = \frac{0.222}{50 \cdot 1344} \Leftrightarrow v_{corr} = 3.3 \cdot 10^{-6} \frac{g}{cm^2 \cdot h} \\ = 0.79 \frac{g}{m^2 \cdot day}$$



Εικ. 4.19: Ρυθμός διάβρωσης των δοκιμών χάλυβα στα διαλύματα Α, Β, Γ, Δ κατά τη δοκιμασία διάβρωσης για χρόνο 8 εβδομάδων.

Τέλος, υπολογίστηκε η αποτελεσματικότητα του αναστολέα κατά της διάβρωσης του κάθε δοκιμίου. Ο υπολογισμός % επίδρασης του αναστολέα διάβρωσης εκφράζεται με βάση τη σχέση:

$$n\% = \frac{\Delta m_{unin} - \Delta m}{\Delta m_{unin}} \times 100$$

Όπου ως Δm_{unin} συμβολίζεται η απώλεια μάζας χωρίς αναστολέα και με Δm η απώλεια μάζας με αναστολέα. Επομένως για το διάλυμα Β ισχύει ότι:

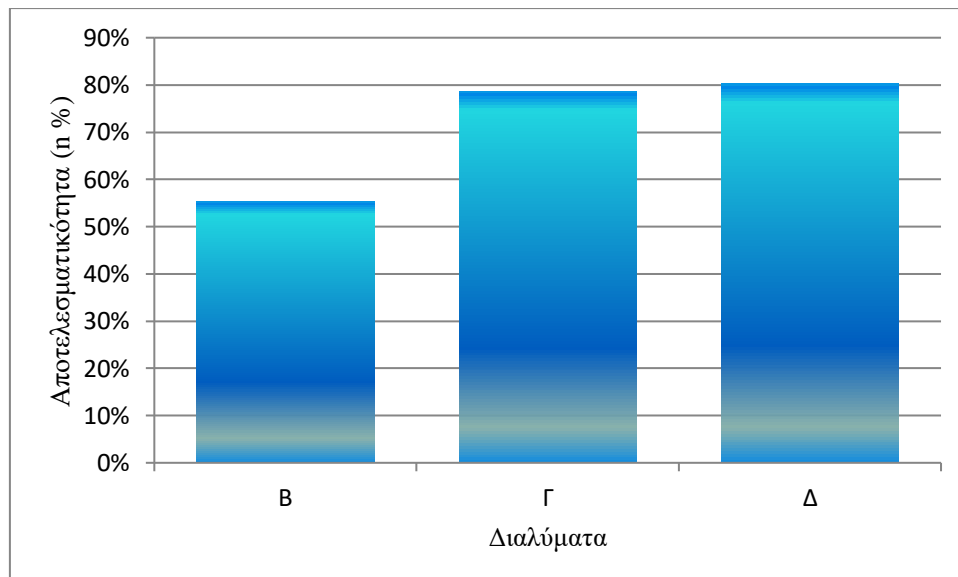
$$n\% = \frac{\Delta m_{unin} - \Delta m}{\Delta m_{unin}} \times 100 \Leftrightarrow n\% = \frac{1,125 - 0,502}{1,125} \times 100 \Leftrightarrow n\% = 55,37\%$$

Για το διάλυμα Γ ισχύει:

$$n\% = \frac{\Delta m_{unin} - \Delta m}{\Delta m_{unin}} \times 100 \Leftrightarrow n\% = \frac{1,125 - 0,24}{1,125} \times 100 \Leftrightarrow n\% = 78,67\%$$

Για το διάλυμα Δ ισχύει:

$$n\% = \frac{\Delta m_{unin} - \Delta m}{\Delta m_{unin}} \times 100 \Leftrightarrow n\% = \frac{1,125 - 0,222}{1,125} \times 100 \Leftrightarrow n\% = 80,26\%$$



Εικ. 4.20: Η % αποτελεσματικότητα της δράσης των αναστολέων διάβρωσης Β, Γ και Δ κατά τη δοκιμασία διάβρωσης των δοκιμίων χάλυβα για χρόνο 8 εβδομάδων

4.2.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΙΛΠΝΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για την αντικειμενική αποτύπωση της οπτικής εμφάνισης της επιφάνειας των δοκιμίων μετά τις 8 εβδομάδες εμφάνισης σε διαλύματα χλωροϊόντων με και χωρίς την προσθήκη αναστολέα, έγινε έλεγχος με ειδική συσκευή (στιλπνόμετρο / Glossmeter). Στην περίπτωση που η μεταλλική επιφάνεια είναι καθαρή και χωρίς ίχνη διάβρωσης οι τιμές για τις μοίρες 20⁰, 60⁰ και 85⁰ είναι 93.8, 95.7, 99.5 αντίστοιχα. Κατασκευάστηκαν Πίνακες τιμών (Πίνακες 4.7 – 4.11) για την αντικειμενική σύγκριση της στιλπνότητας της επιφάνειας των δοκιμίων πριν και μετά την έκθεση στο διαβρωτικό περιβάλλον.

Πίνακας 4.7: Αρχικές μετρήσεις σε επιφάνεια δείγματος πριν την έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον.

Μέτρηση στιλπνότητας αρχικού δείγματος χωρίς διάβρωση			
	20°	60°	85°
1 ^η Μέτρηση	92,3	94,4	98,1
2 ^η Μέτρηση	92,3	94,4	98,0
3 ^η Μέτρηση	92,2	94,5	97,9
4 ^η Μέτρηση	92,1	94,5	97,8
M.O.	92,2	94,4	97,8

Πίνακας 4.8: Μέτρηση στυλπνότητας μεταλλικής επιφάνειας μετά την εμφάπτιση σε διάλυμα αναφοράς χωρίς αναστολέα.

Μετρήσεις σε διαβρωτικό περιβάλλον χωρίς αναστολέα (Διάλυμα αναφοράς)			
	20°	60°	85°
1 ^η Μέτρηση	0,3	3,3	14,5
2 ^η Μέτρηση	0,4	3,2	14,5
3 ^η Μέτρηση	0,3	3,3	14,5
4 ^η Μέτρηση	0,3	3,3	14,5
Μ.Ο.	0,4	3,2	14,5

Πίνακας 4.9: Μέτρηση στυλπνότητας μεταλλικής επιφάνειας μετά την εμφάπτιση σε διάλυμα αναφοράς στο οποίο προστέθηκε πράσινο Τσάι.

Μετρήσεις σε διάλυμα που περιείχε Πράσινο τσάι			
	20°	60°	85°
1 ^η Μέτρηση	3,0	17,9	16,8
2 ^η Μέτρηση	3,0	17,9	16,8
3 ^η Μέτρηση	3,0	17,9	16,8
4 ^η Μέτρηση	3,0	17,9	16,7
Μ.Ο.	3,0	17,9	16,7

Πίνακας 4.10: Μέτρηση στυλπνότητας μεταλλικής επιφάνειας μετά την εμβάπτιση σε διάλυμα αναφοράς στο οποίο προστέθηκε Κρόκος Κοζάνης.

Μετρήσεις σε διάλυμα που περιείχε Κρόκο Κοζάνης			
	20°	60°	85°
1 ^η Μέτρηση	1,4	12,4	38,3
2 ^η Μέτρηση	1,4	12,5	38,3
3 ^η Μέτρηση	1,4	12,5	38,4
4 ^η Μέτρηση	1,3	12,5	38,4
M.O.	1,4	12,5	38,5

Πίνακας 4.11: Μέτρηση στυλπνότητας μεταλλικής επιφάνειας μετά την εμβάπτιση σε διάλυμα αναφοράς στο οποίο προστέθηκε Χένα.

Μετρήσεις σε διάλυμα που περιείχε Χένα			
	20°	60°	85°
1 ^η Μέτρηση	1,2	7,5	20,6
2 ^η Μέτρηση	1,1	7,6	20,1
3 ^η Μέτρηση	1,1	7,5	20,7
4 ^η Μέτρηση	1,2	7,4	20,8
M.O.	1,0	7,6	20,6

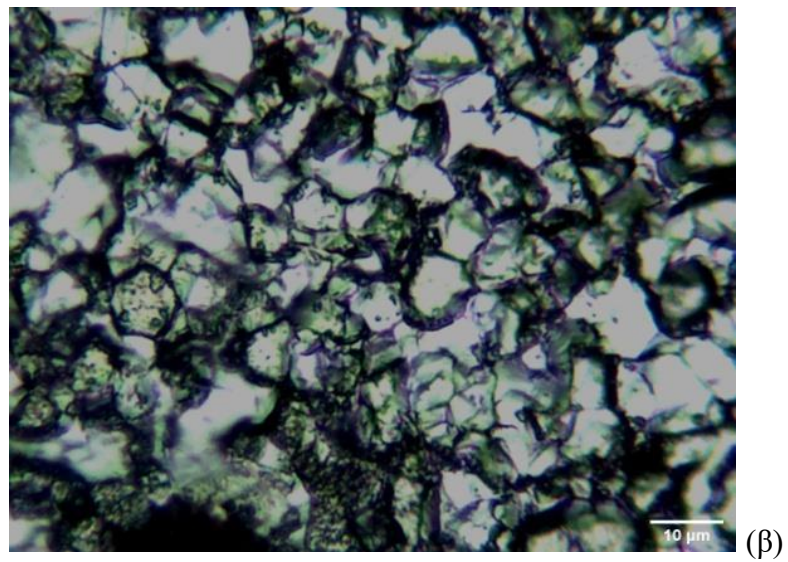
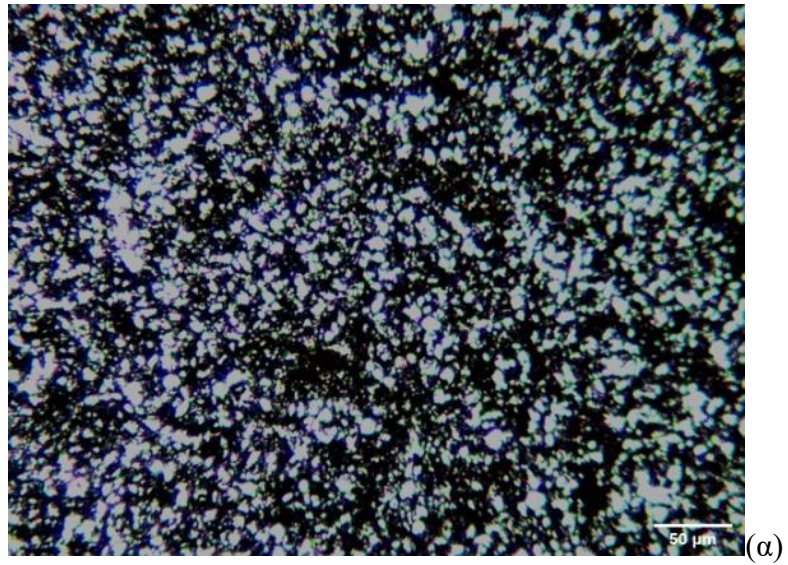
Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις της στυλπνότητας επιβεβαίωσαν ότι την καλύτερη απόδοση είχε ο Κρόκος Κοζάνης, ακολουθεί η Χένα και τέλος το πράσινο Τσάι. Η αρχική επιφάνεια πριν τη διάβρωση είναι πολύ στυλπνή (μεγάλες τιμές στυλπνότητας) ενώ τα δοκίμια που έχουν διαβρωθεί στο διάλυμα αναφοράς έδειξαν πολύ χαμηλές τιμές λόγω των προϊόντων διάβρωσης και των επικαθήσεων στην επιφάνεια τους, που την έκανε θαμπή και με ελάχιστη στυλπνότητα.

4.2.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ΟΠΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ

Ακολούθησε λεπτομερής οπτική παρατήρηση της επιφάνειας των δοκιμίων και ελήφθησαν εικόνες από την κάμερα που είναι συνδεδεμένη με το οπτικό μικροσκόπιο.

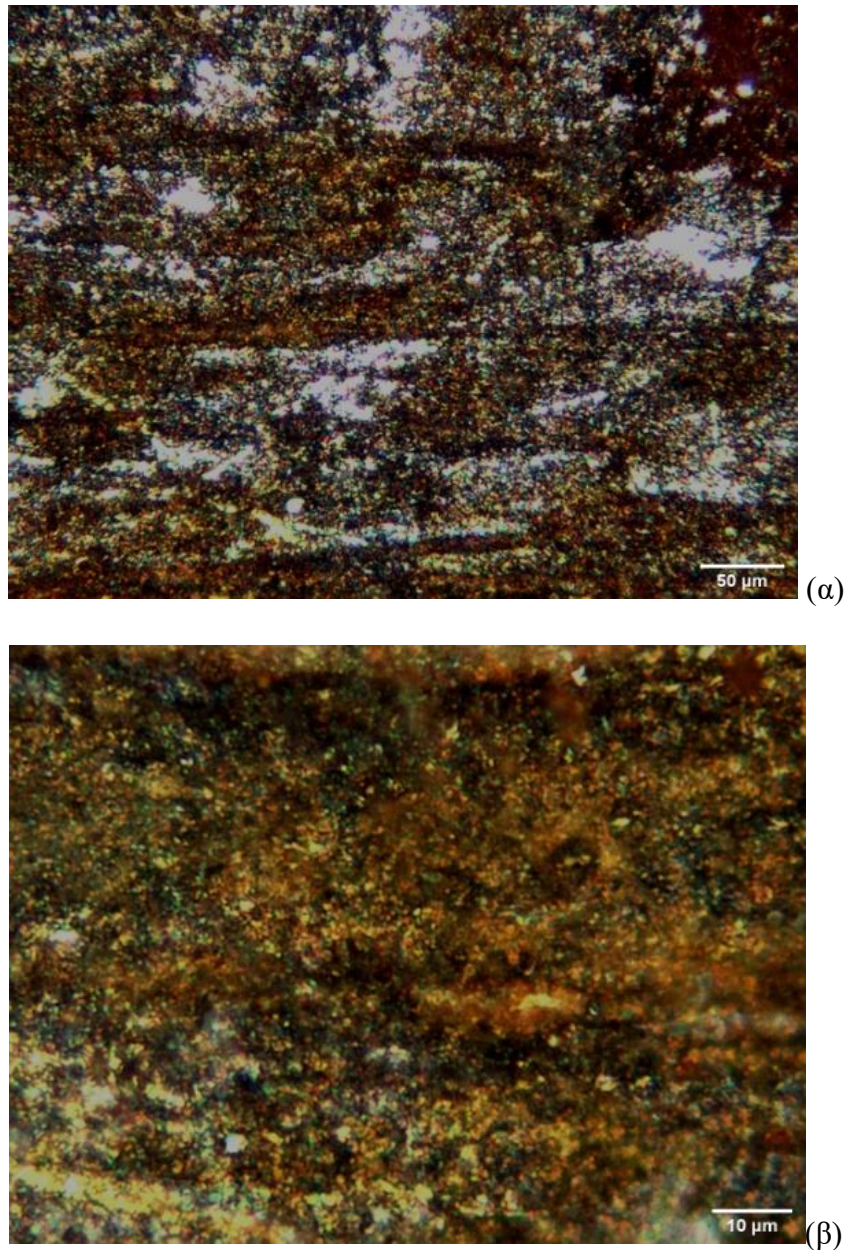
Αρχικά παρατηρήθηκε η μεταλλική επιφάνεια των δοκιμίων όπου πρόκειται για κοινούς ανθρακούχους χάλυβες (plain carbon steels) περιεκτικότητας 0,21 % wt C (κατά δήλωση του προμηθευτή), φερριτικής δομής, που δεν έχουν υποστεί καμία επιπλέον κατεργασία. Διαθέτουν μια προστατευτική επίστρωση μαύρου οξειδίου του σιδήρου (II), (FeO) για προστασία από διάβρωση, η οποία αφαιρέθηκε κατά τη λείανση.

Μετά την λείανση και τον καθαρισμό καταγράφηκε η κατάστασή τους πριν την έκθεση στο διαβρωτικό περιβάλλον ως εικόνα αναφοράς που θα βοηθήσουν στη σύγκριση των δοκιμίων μετά την έκθεση στο διαβρωτικό περιβάλλον χωρίς ή με την παρουσία των αναστολέων που εξετάστηκαν στην εργασία αυτή.



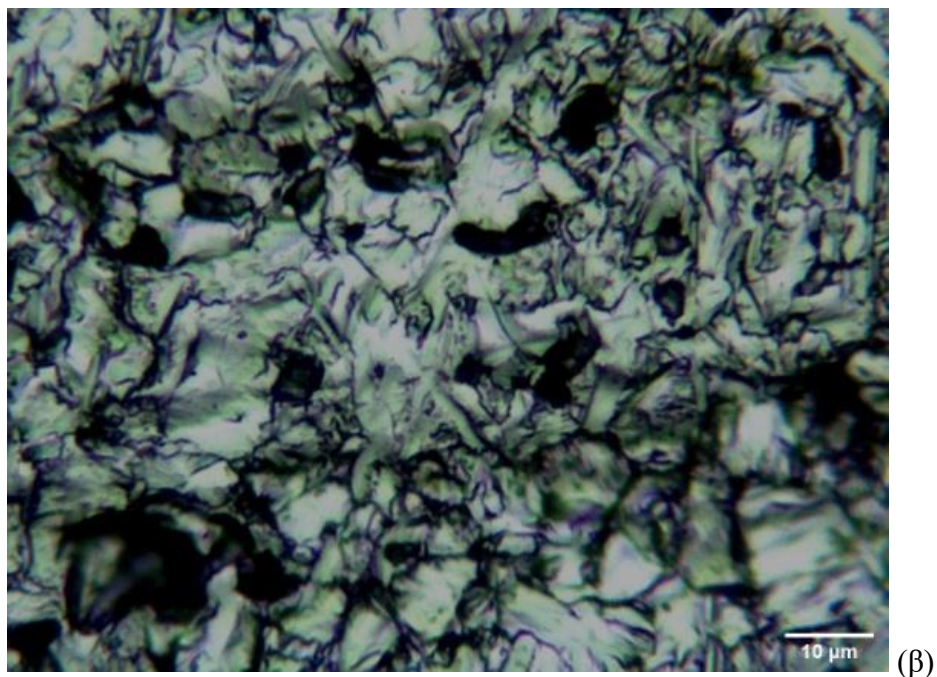
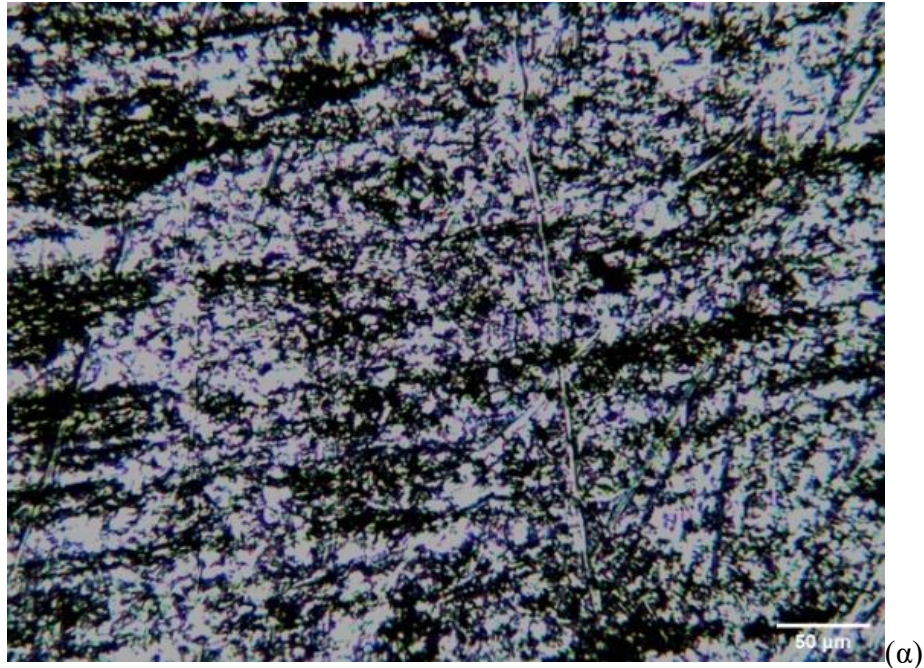
Εικ 4.21: Αρχική επιφάνεια μεταλλικού δείγματος από χάλυβα σε μεγέθυνση $\times 100$ (α) & $\times 500$ (β) πριν την εμφάνιση σε διάλυμα χλωροϊόντων

Ακολούθησε η παρατήρηση της χαλύβδινης επιφάνειας δοκιμίων μετά την δοκιμασία εμβάπτισης σε διάλυμα χλωροϊόντων (διάλυμα αναφοράς) για οκτώ (8) εβδομάδες χωρίς την χρήση αναστολέων διάβρωσης. Οι εικόνες είναι χαρακτηριστικές για δοκίμια χάλυβα, που έχουν υποστεί διάβρωση. Σχεδόν το 100% της επιφάνειας έχει καλυφθεί από προϊόντα διάβρωσης (Εικ. 4.22).



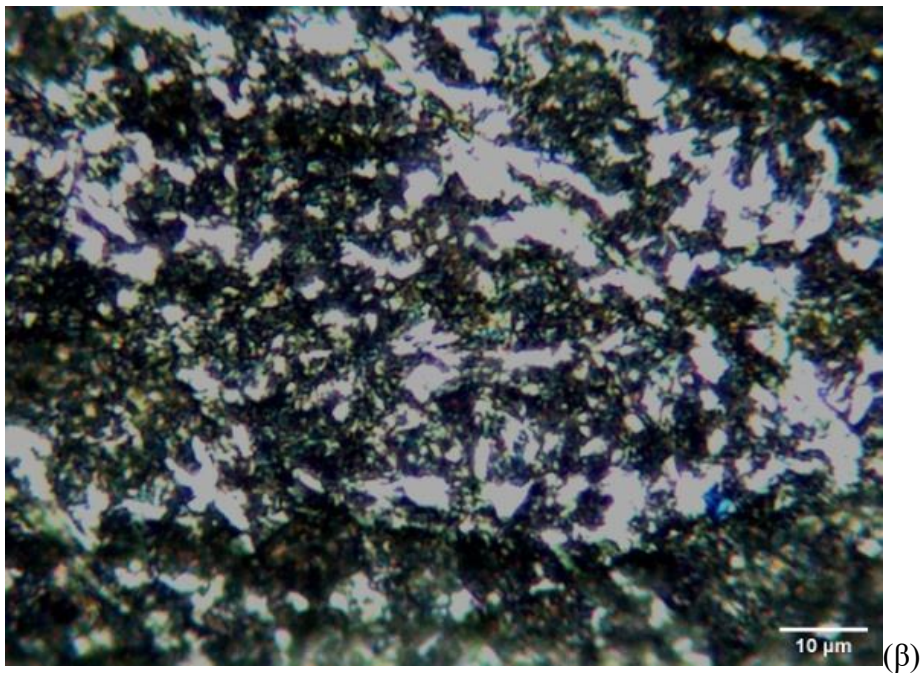
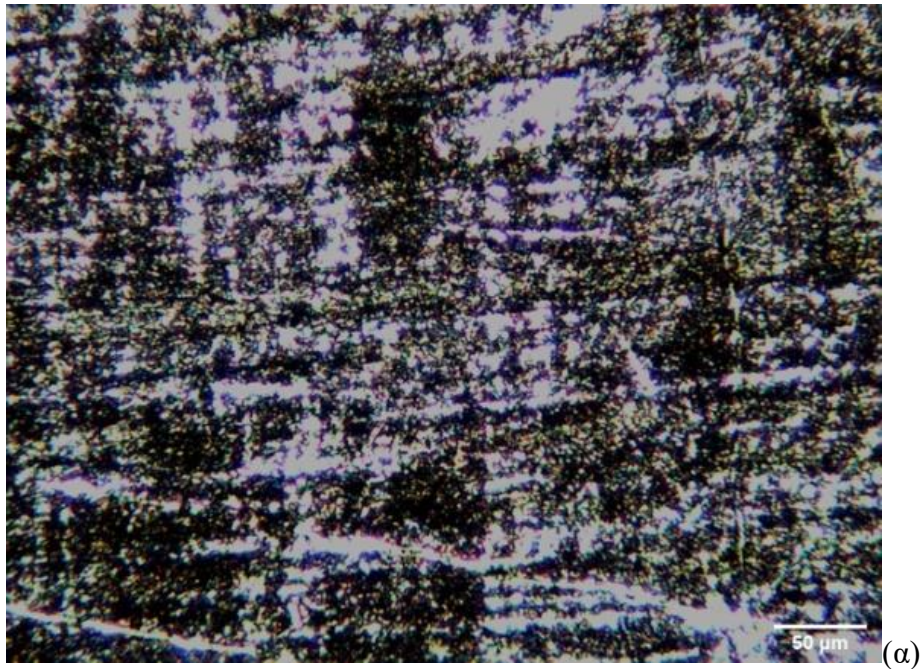
Εικ 4.22: Δείγμα μεταλλικής επιφάνειας σε μεγέθυνση $\times 100$ (α) & $\times 500$ (β) μετά την εμβάπτιση σε διάλυμα χλωροϊόντων για 8 εβδομάδες χωρίς τη χρήση αναστολέων

Στη συνέχεια, παρατηρήθηκε η επιφάνεια δείγματος, το οποίο εμβαπτίστηκε σε διάλυμα όπου προστέθηκε Κρόκος Κοζάνης. Είναι φανερή η θετική επίδραση του αναστολέα, και η μεγάλη ομοιότητα των δειγμάτων με τα αρχικά, πριν την εμβάπτιση στο διαβρωτικό διάλυμα χλωροϊόντων. Δεν παρατηρούνται σχεδόν καθόλου προϊόντα διάβρωσης (Εικ. 4.23).

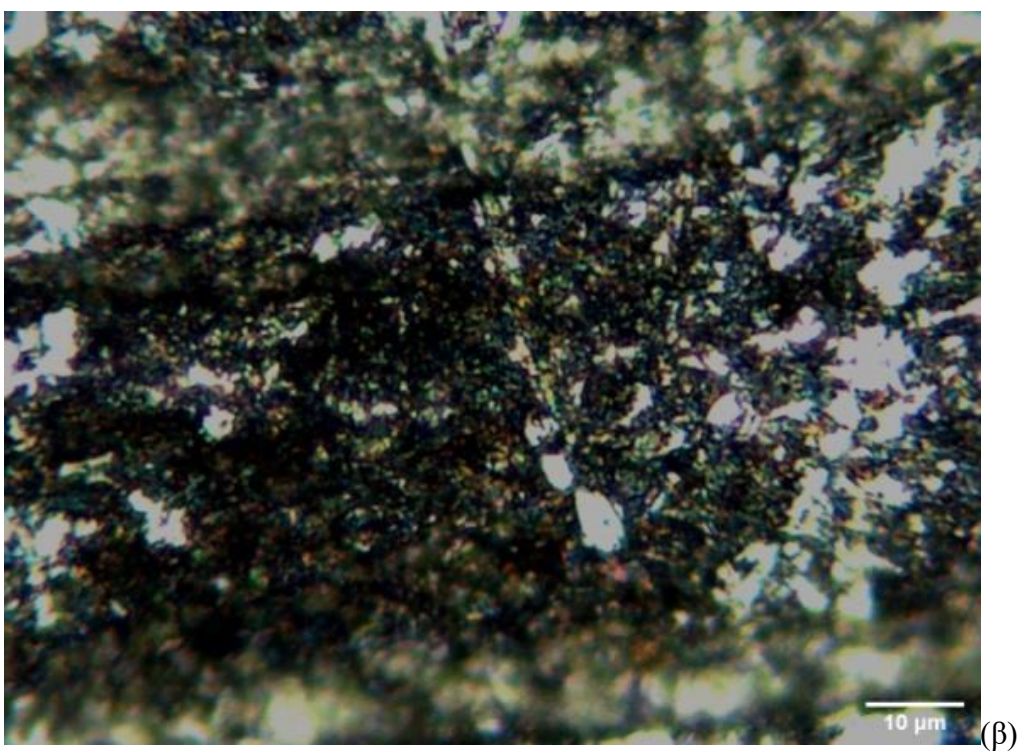
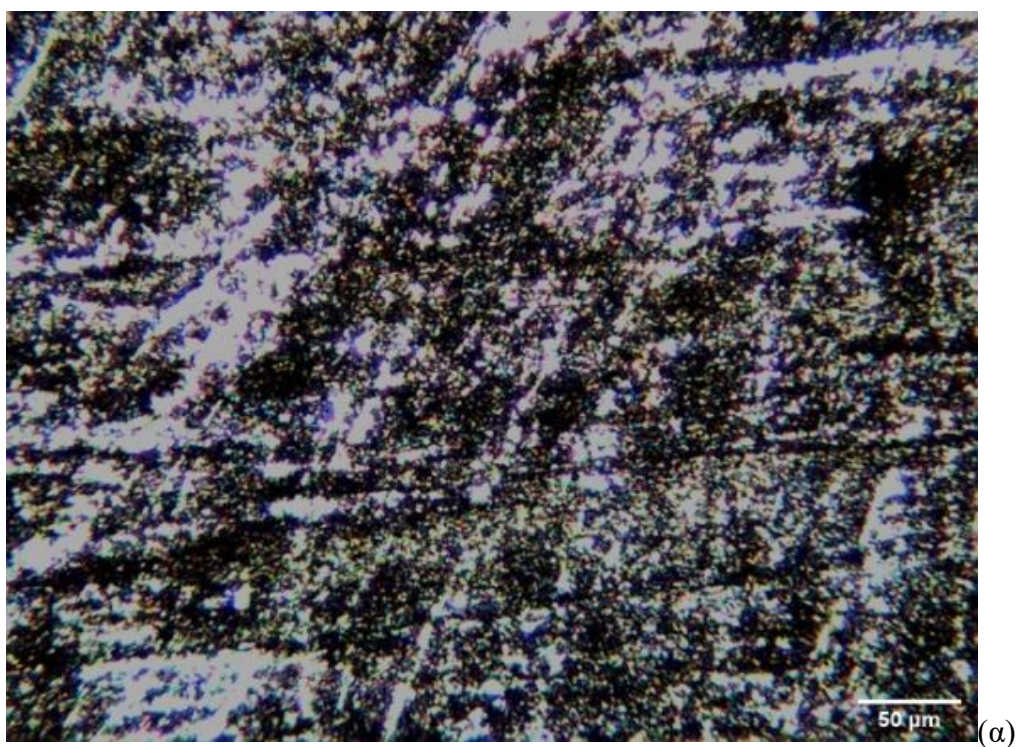


Εικ 4.23: Δείγμα επιφάνειας μεταλλικού δείγματος από χάλυβα σε μεγέθυνση $\times 100$ (α) & $\times 500$ (β) μετά την εμβάπτιση σε διάλυμα αναφοράς που περιείχε Κρόκο Κοζάνης.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε παρατήρηση και απεικόνιση της επιφάνειας των δοκιμίων μετά την εμβάπτιση στα διαλύματα αναφοράς στα οποία προστέθηκε Χένα (Εικ. 4.24) ή Πράσινο τσάι (Εικ. 4.25). Η εικόνα των δοκιμίων αυτών τα κατατάσσει σε μια καλύτερη κατάσταση από τα δείγματα που εκτέθηκαν στο διάλυμα αναφοράς αλλά όχι τόσο καλή όσο εκείνα, που εμβαπτίστηκαν στο διάλυμα αναφοράς όπου προστέθηκε Κροκίνη.



Εικ 4.24: Δείγμα επιφάνειας μεταλλικού δείγματος από χάλυβα σε μεγέθυνση $x 100$ (α) & $x 500$ (β) μετά την εμβάπτιση σε διάλυμα αναφοράς που περιείχε Χένα.



Εικ 4.25: Δείγμα επιφάνειας μεταλλικού δείγματος από χάλυβα σε μεγέθυνση $x 100$ (α) & $x 500$ (β) μετά την εμβάπτιση σε διάλυμα αναφοράς που περιείχε πράσινο Τσάι.

4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η πειραματική μελέτη αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα των φυσικών αναστολέων (Κρόκος, Χένα και πράσινο Τσάι) για την προστασία από τη διάβρωση του χάλυβα. Και οι τρεις ουσίες αλλά κυρίως ο Κρόκος κατάφερε να επιβραδύνει την δημιουργία οξειδίων και γενικά το σχηματισμό προϊόντων διάβρωσης στην επιφάνεια του χάλυβα. Τα κυριότερα συμπεράσματα της μελέτης είναι:

- Η σύγκριση των μαθηματικών παραμέτρων από τις καμπύλες του ρυθμού διάβρωσης έδειξαν ότι και τα τρία φυτικά προϊόντα που δοκιμάστηκαν, δρουν ως αναστολείς της διάβρωσης του χάλυβα σε διάλυμα χλωροϊόντων ενώ παρατηρήθηκε ιδιαίτερα θετική δράση του Κρόκου Κοζάνης.
- Η αποτελεσματικότητα της δράσης των τριών αναστολέων που υπολογίζεται από τις μετρήσεις απώλειας μάζας είναι υψηλή και κυμαίνεται 55% έως 80%.
- Οι μετρήσεις της στιλπνότητας της επιφάνειας των δειγμάτων επιβεβαίωσαν την θετική επίδραση των τριών αναστολέων και ιδιαίτερα του Κρόκου. Οι επιφάνειες που εμβαπτίστηκαν σε διάλυμα με την προσθήκη αναστολέων ήταν πιο στιλπνές σε σχέση με αυτές χωρίς αναστολέα.
- Η παρατήρηση των χαλύβδινων επιφανειών στο μικροσκόπιο επιβεβαίωσε τα αποτελέσματα των προηγούμενων μετρήσεων και συγκεκριμένα έδειξε λιγότερα προϊόντα διάβρωσης στην επιφάνεια των δοκιμίων όταν στο διάλυμα αναφοράς έχουν προστεθεί οι αναστολείς σε σχέση με τις επιφάνειες των δοκιμίων που εκτέθηκαν στο διάλυμα αναφοράς.
- Η αποτελεσματικότητα των ουσιών που εξετάστηκαν ως αναστολείς της διάβρωσης του χάλυβα σε διάλυμα χλωροϊόντων με αύξουσα σειρά ήταν η εξής: πράσινο Τσάι < Χένα < Κρόκος Κοζάνης.

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διάβρωση του χάλυβα όταν εκτίθεται σε θαλάσσιο περιβάλλον προκαλεί σημαντικά προβλήματα, οπότε η αντιμετώπισή της είναι πρωταρχικής σημασίας. Υπάρχουν πολλές και διαφορετικές μέθοδοι που υιοθετούνται, συμπεριλαμβανομένης της ανάπτυξης κραμάτων υψηλής αντοχής, καθώς και της χρήσης διαφόρων επιστρώσεων αλλά και αναστολέων της διάβρωσης. Αναδείχτηκε η αναγκαιότητα και η δυνατότητα χρήσης πράσινων αναστολέων διάβρωσης, οι οποίοι είναι οικονομικοί και φιλικοί προς το περιβάλλον. Η ανάγκη μελέτης και περαιτέρω έρευνας σχετικά με τη δράση των πράσινων αναστολέων για μια πιο βιώσιμη ανάπτυξη αποδεικνύεται ζωτικής σημασίας.

Στην εργασία αυτή, εξετάστηκε το φαινόμενο της διάβρωσης και της προστασίας του χάλυβα από τη διάβρωση τόσο θεωρητικά μέσω της μελέτης της βιβλιογραφίας, όσο και πρακτικά με τη διεξαγωγή συγκεκριμένων πειραματικών μετρήσεων. Αντικείμενο της μελέτης ήταν η αποτελεσματικότητα της χρήσης φυτικών ουσιών φιλικών προς το περιβάλλον για την προστασία του χάλυβα από τη διάβρωση. Αποδείχτηκε ότι η προσθήκη σε μικρές ποσότητες εκχυλισμάτων από το ελληνικό φυτό κρόκος Κοζάνης, από πράσινο ελληνικό τσάι του βουνού και της χένας του εμπορίου, μπορεί να προστατέψει από τη διάβρωση τον κοινό χάλυβα όταν αυτός εκτεθεί σε διαβρωτικό περιβάλλον λόγω της παρουσίας ιόντων χλωρίου.

Συμπερασματικά, η προστασία του χάλυβα και γενικά των μετάλλων από τη διάβρωση αποτελεί ένα πολύπλευρο και πολυεπίπεδο θέμα, του οποίου η μελέτη δεν μπορεί να εξαντληθεί σε αυτή την εργασία. Αντίθετα, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση του θέματος τόσο σε θεωρητικό, όσο και σε εργαστηριακό - πρακτικό επίπεδο αξιοποιώντας το συνδυασμό των κλασσικών και των σύγχρονων υπολογιστικών μεθόδων, οι οποίες αποτελούν στόχο για μελλοντική θεωρητική και πρακτική έρευνα με τη χρήση περισσότερων φυσικών και φιλικών στο περιβάλλον αναστολέων διάβρωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adad I., El-Sukkary M.M., Soliman E.A., El-Awady M.Y., Shaban S.M. (2014). Inhibition of mild steel corrosion in acidic medium by some cationic surfactants. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(5), 3524-3535.
- Amiery Al., Kadhum A.A.H., Kadhum A., Mohamad A.B., How C.K., Junaedi S. (2014). Inhibition of mild steel corrosion in sulfuric acid solution by new Schiff base. *Journal: Materials*, 7(2), 787-804.
- Badr E.A., (2014). Inhibition effect of synthesized cationic surfactant on the corrosion of carbon steel in 1M HCl. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20, 3361-3366.
- Birat J.-P. (2006). Alternative ways of making steel: Retrospective and prospective. *Revue de Métallurgie – CIT*, 11, 937–955.
- Beacon (2010). Μηχανική και χημική διάβρωση. *Center for Chemical Process Safety*. Ανακτήθηκε από το διαδικτυακό ιστότοπο με ημερομηνία ανάκτησης 09/02/2023: (<https://www.aiche.org/sites/default/files/2010-01-Beacon-Greek.pdf>)
- Bouyanzer, A., Majidi L., Hammouti B., (2006). Effect of eucalyptus oil on the corrosion of steel in 1M HCl, *Bulletin of Electrochemistry*, 22, 7, 321–324.
- Brycki B. E., Kowalczyk I. H., Azulc A., Kaczerewska O., Pakiet M. (2018). In Aliofkhazraei M (ed.) *Corrosion Inhibitors, Principles and Recent Applications*. InTech. DOI: 10.5772/intechopen.70101
- Dehghani A, Bahlakeh G., Ramezanzadeh B. (2019). Green Eucalyptus leaf extract: A potent source of bio-active corrosion inhibitors for mild steel. *Bioelectrochemistry*. DOI: 10.1016/j.bioelechem.2019.107339
- Fajardo S. R., García-Galvan F, Barranco V (2018). A Critical Review of the Application of Electrochemical Techniques for Studying Corrosion of Mg and Mg Alloys: Opportunities and Challenges. *Magnesium Alloys - Selected Issue*. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.79497.
- Fakih Al, Aziz A.M., Sirat H.M. (2015). Turmeric and ginger as green inhibitors of mild steel corrosion in acidic medium. *Journal. Material. Environmental*, 6 (5), 1480-1487.
- Yang Hyun-Min. (2021). Role of Organic and Eco-Friendly Inhibitors on the Corrosion Mitigation of Steel in Acidic Environments—A State-of-Art Review *Molecules* 26, 11(3473). <https://doi.org/10.3390/molecules26113473>
- Huang Y., Zhang J. (2018). *Materials Corrosion and Protection*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 11, 433-445.
- IACS (2015). Guidelines for Coating Maintenance & Repairs for Ballast Tanks and Combined Cargo/Ballast Tanks on Oil Tankers. Recommendation 87. Ανακτήθηκε από το διαδικτυακό ιστότοπο με ημερομηνία ανάκτησης 09/02/2023: file:///C:/Users/dell/Downloads/rec_087_pdf1213.pdf

- Ibrahimi B.E., Jmiai A., Bazzi L., Issami S.E. (2020). Amino acids and their derivatives as corrosion inhibitors for metals and alloys. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 740-771/
- ISO 12944-9:2018. Paints and Varnishes – Corrosion Protection of Steel Structures by Protective Paint Systems. (1), 1-23.
- Jamil H.E, Shrirri A., Boulif R., Montemor M.F., Ferreira M.G.S. (2005). Corrosion behaviour of reinforcing steel exposed to an amino alcohol-based corrosion inhibitor. *Cement and Concrete Composites*, 27(6), 671-678.
DOI:10.1016/j.cemconcomp.2004.09.019
- Kesavan D., Gopiraman M., Sulochana N. (2012). Green inhibitors for corrosion of metals: a review. *Chemical Science Review Letters*, 1(1), 1-8.
- Kim W.K., Koh S.U., Yang B.Y., Kim K.Y. (2008). Effect of environmental and metallurgical factors on hydrogen induced cracking of HSLA steels. *Corrosion Science*, 50(12), 3336-3342. DOI:10.1016/j.corsci.2008.09.030
- Koch G., Varney J., Thompson N., Moghissi O., Gould M., Payer J. (2016). International measures of prevention, application and economics of corrosion technologies study. *NACE International Impact*. Ανακτήθηκε από το διαδικτυακό ιστότοπο με ημερομηνία ανάκτησης 09/02/2023 :<http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf>.
- Kraus B. (2016). Pontoon Deck Preservation for Floating Dry Docks. *Marine News Magazine*, 48. Ανακτήθηκε από το διαδικτυακό ιστότοπο: <https://magazines.marinelink.com/Magazines/MarineNews/201604/page/50>
- Law D, Cairns J, Millard S.G., Bungey J.H. (2004). Measurement of loss of steel from reinforcing bars in concrete using linear polarisation resistance measurements. *NDT & E International*. 37(5), 381-388.
- Little, B.J. & Lee J.S., (2015). Microbiologically Influenced Corrosion. *Oil and Gas Pipelines*. R.W. Revie (Ed.). <https://doi.org/10.1002/9781119019213.ch27>.
- Liu B., Zhang T., Shao Y., Meng G., Liu J., Wang F. (2012). Effect of hydrostatic pressure on the corrosion behavior of pure nickel. *International Journal of Electrochemical Science*. 7 (3), 1864–1883.
- Chigondo M. and Chigondo F. (2016). Recent Natural Corrosion Inhibitors for Mild Steel: An Overview. *Hindawi Journal of Chemistry*. Ανακτήθηκε από το διαδικτυακό ιστότοπο με ημερομηνία ανάκτησης 09/02/2023: (<https://downloads.hindawi.com/journals/jchem/2016/6208937.pdf>)
- Miracle P. I. (2015). Corrosion inhibition of mild steel in HCL medium using euphorbia heterophylla (Mexican fire-plant) leaf extract (as inhibitor). *Bachelor Thesis, Federal University of technology, P.M.B. 1526, Owerri, IMO State*.
- Miralrio A. & Vasquez A. E. (2020). Plant extracts as green corrosion inhibitors for different metal surfaces and corrosive media. *Journal Processes*. 8(8), 942. <https://doi.org/10.3390/pr8080942>

- Nimmo B. & Hinds G. (2003). Corrosion for beginners. *NPL's Corrosion Group*. Ανακτήθηκε από το διαδικτυακό ιστότοπο με ημερομηνία ανάκτησης 09/02/2023: http://www.testech.ca/article/beginners_guide_to_corrosion.pdf.
- Nezhad A.H.N., Davoodi A., Mohammadi Z. E., Arefinia R. (2020). The effects of an inorganic corrosion inhibitor on the electrochemical behavior of super hydrophobic micro-nano structured Ni films in 3.5% NaCl solution. *Surface and Coatings Technology*, 395. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125946>.
- Okai V., Chahul H.F., WuanaR. A., Barnabas I. A., Tolufashe G. F. (2021). Corrosion inhibition potentials of Cucurbita polyesteramide urethane on mild steel in hydrochloric acid medium. *Scientific African*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00776>
- Pantazopoulou P., Kalogeropoulou S., Theohari S., Papamichalis E. & Tzeli D. (2022). Evaluation of Crocin as green corrosion inhibitor for aluminum in NaCl solution. *Chemical Engineering Communications Journal*. DOI:10.1080/00986445.2022.2147834
- Praveen B.M. and Venkatesha T.V. (2009). Metol as Corrosion Inhibitor for Steel. *International Journal of electrochemical science*, 4, 267-275.
- Rani Amitha B.E. and Basu Bharathi B.J. (2012). Green Inhibitors for Corrosion Protection of Metals and Alloys: An Overview. *International Journal of Corrosion*. DOI:10.1155/2012/380217
- Shehata Omnia S, KorshedL.A. and Attia A. (2018). Green Corrosion Inhibitors, Past, Present, and Future. *Corrosion Inhibitors, Principles and Recent Applications*, April. InTech. DOI:10.5772/intechopen.72753.
- Sadowski L. (2010). New non-destructive method for linear polarisation resistance corrosion rate measurement. *Archives of civil and Mechanical Engineering*. 10, 109-116. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60053-3](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60053-3)
- Sawant S.S., Venkat K., Wagh A.B. (1993). Corrosion of metals and alloys in the coastal and deep waters of the Arabian Sea and the Bay of Bengal. *Indian Journal of Technology*, 1, 862–866.
- Singh A. (2019). Corrosion Inhibitors. BoD – Books on Demand. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.76742>
- Shifler D.A. (2005). Understanding material interactions in marine environments to promote extended structural life. *Corrosion Science*, 47(10), 2335–2352. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.09.027>.
- Traverso P. & Canepa E. (2014). A review of studies on corrosion of metals and alloys in deep-sea environment. *Ocean Engineering*, 87, 10-15. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.05.003>.
- Traverso P. (2008). Metallic materials for use in deep sea environment for the European project KM3NeT: general view and feasibility study on experimental tests. *La Metallurgia Italiana*, 100(1), 29–38.

Yang Y., Zhang T., Shao Y., Meng G., Wang F. (2010). Effect of hydrostatic pressure on the corrosion behavior of Ni–Cr–Mo–V high strength steel. *Corrosion Science*, 52(8), 2697–2706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.04.025>.

Venkatesan R., Venkatasamy M.A., Bhaskaran T.A., Dwarakadasa E.S., Ravindran M. (2002). Corrosion of ferrous alloys in deep sea environments. *British Corrosion Journal*, 37(4), 257–266. <https://doi.org/10.1179/000705902225006633>.

Wombacher F., Maeder U., Marazzani B. (2004). Aminoalcohol based mixed corrosion inhibitors. *Cement & Concrete Composites*, 26 (3), 209-216.

Zarasvand K. A. & Rai V. R. (2014). Microorganisms: Induction and inhibition of corrosion in metals. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 87, 66-74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.10.023>.

Zhang T., Yang Y., Shao Y., Meng G., Wang F. (2009). A stochastic analysis of the effect of hydrostatic pressure on the pit corrosion of Fe–20Cr alloy, *Electrochimica Acta*, 54(15), 3915–3922. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.02.010>.

Zvirko O.I., Savula S.F., Tsependa V.M., Gabetta G., Nykyforchyn H.M. (2016). Stress corrosion cracking of gas pipeline steels of different strength, *Procedia Structural Integrity*, 2, 509-516. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.066>.

Αντωνοκοπούλου Μαρία-Αγγελική, Μανιάτη Κλειώ, Παπαναγιώτου Μελισάνθη (2005). Χρήση αναστολέων διάβρωσης στην προστασία υλικών. Πτυχιακή εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

Αρακάς Γ. (2015). Μελέτη αντοχής σε κόπωση μίας ενισχυμένης χαλύβδινης γάστρας πλοίου. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων και Συστημάτων του Πανεπιστημίου Αιγαίου.

Βλάχος Γ., Καγκαράκης, Κ., Καψωμένος, Ε. (2005). Περιβάλλον και ανάπτυξη: Διαλεκτικές σχέσεις και διεπιστημονικές προσεγγίσεις. Εναλλακτικές Εκδόσεις. ISBN: 978-960-427-082-8

Βλάχος Γ. (2007). Εμπορική Ναυτιλία & Θαλάσσιο Περιβάλλον. Εκδόσεις Σταμούλη. ISBN: 960351246X.

Γαλανού Μ. (2009). Προστασία του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος από την ατμοσφαιρική διάβρωση με χρήση αναστολέων διάβρωσης. Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

Δημητρακόπουλος Β. (2016). Διερεύνηση συγκολλήσεων ναυπηγικού χάλυβα grade A, μελέτη της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας των συνδέσεων. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του ΕΜΠ.

Δουμένης Π.Ν. (2019). Μελέτη αντοχής σε διάβρωση χάλυβα υψηλής αντοχής σε θαλάσσιο περιβάλλον – Επίδραση διαβρωτικών συνθηκών στις μηχανικές ιδιότητες. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Ζαχαρίου Α. (2009). Ρυθμιστικό πλαίσιο και εναλλακτικές πολιτικές περιβαλλοντικής προστασίας και βιωσιμότητας. Διπλωματική εργασία, Σχολή Διεθνών κι Ευρωπαϊκών Σπουδών του Πανεπιστημίου Πειραιά.

Ζαχαροπούλου Α. (2014). Επίδραση πρόσθετων-προσμικτών στην διάβρωση του χάλυβα οπλισμού του σκυροδέματος. Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

Ιωσηφίδου Α. (2009). Προστασία χαλύβων σε θαλάσσιο περιβάλλον με αντιδιαβρωτικό επικαλυπτικό που περιέχει πιγμέντο από ανοξείδωτο χάλυβα. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Καβέτσος Δ., Κολώτας Ε. (2014). Μελέτη προστασίας οπλισμών σκυροδέματος από τη διάβρωση σε περιβάλλον χλωριόντων. Πτυχιακή Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά.

Καρύδης Π. (2002). Επιθεώρηση, Συντήρηση & Επισκευή της Μεταλλικής Κατασκευής του Πλοίου. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ. ISBN:9789602545485.

Λεκάτου Α. (2022). Διάβρωση και προστασία των μετάλλων και των κραμμάτων τους. Εκδόσεις Τζιόλα.

Μαντά Ε. (2012). Εργοδιάβρωση ανοξείδωτου χάλυβα. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του ΕΜΠ.

Μαργαρίτης Α., Χαλίτι Φρ. (2018). Μελέτη μηχανικής αντοχής, υπό διαβρωτικές συνθήκες ανοξείδωτων χαλύβων. Πτυχιακή Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά.

Μαυρουλέας Δ. (2020). Η συμβολή των ιχθυοκαλλιεργειών στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Επιστημών της Προσχολικής Αγωγής και του Εκπαιδευτικού Σχεδιασμού του Πανεπιστημίου Αιγαίου.

Μπατής Γ. (1999). Φθορά και προστασία των υλικών. Εκδόσεις ΕΜΠ.

Ντάλφου Ε. (2012). Ανθεκτικότητα οργανικών επικαλύψεων που περιέχουν αναστολείς διάβρωσης. Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

Ντούτσιας Γ. (2011). Η συμπεριφορά μετάλλου χάλυβα με επικάλυψη από το οργανικό επικαλυπτικό, φιλικό στο περιβάλλον, σε έκθεση σε επιταχυνόμενη γήρανση. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

Ευφώλης Σ. (2017). Μελέτη προστασίας ορείχαλκου σε ατμοσφαιρικό θαλάσσιο περιβάλλον. Διπλωματική Εργασία του τμήματος Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Παλαιοκόστα Η. (2018). Μελέτη διάβρωσης συστήματος συγκολλημένων χαλύβων υψηλής αντοχής σε θαλάσσιο περιβάλλον. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

Παναγόπουλος Θ. (2004). Δίκαιο Περιβάλλοντος. Εκδόσεις Σταμούλη. ISBN13:9786185304621.

Παντελής Δ. Ι. & Τσιούρβα, Θ. (2012). Διάβρωση και προστασία ναυπηγικών και μηχανολογικών κατασκευών. Εκδόσεις ΕΜΠ

Σαριδάκης Ν.Α. (2011). Μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων ψευδαργύρου για ηλεκτρομηχανολογικές εφαρμογές. Μεταπτυχιακή Εργασία, Σχολή Επιστήμης και Τεχνολογία Υλικών του ΕΜΠ.

Σοκουζούδης Χ. (2015). Μελέτη διάβρωσης χάλυβα σε διάλυμα χλωριούχου ασβεστίου (CaCl_2). Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Σούρσος Δ.(2018). Μελέτη Αντοχής Σε Διάβρωση Ναυπηγικού Χάλυβα Υψηλής Αντοχής Σε Συνθήκες Μεταφοράς Μεταλλεύματος. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανικών του ΕΜΠ.

Σπηλιόπουλος Ι. (2015). Φυσικές και γεωπονικές επιστήμες. Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

Τσάλτας Γ. (2007). Περιβάλλον και θαλάσσιος χώρος: Εξελίξεις και προοπτικές προστασίας και διαχείρισης του θαλάσσιου περιβάλλοντος: Διεθνής και ευρωπαϊκή διάσταση, Εκδόσεις Σιδέρης. ISBN:978-960-08-0400-3.

Τσουλάκος Ν. (2013). Προστασία Μετάλλων μέσω Αντιδιαβρωτικών Χρωμάτων. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Υφαντής Δ. Κ. (2003). Υλικά: Διάβρωση και Προστασία. Εκδόσεις ΕΜΠ.

ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

- [1] Λεκάτου Α. (2022). *Διάβρωση και προστασία των μετάλλων και των κραμάτων τους*. Εκδόσεις Τζιόλα.
- [2], [3], [4] Μαργαρίτης Α., Χαλίτι Φρ. (2018). *Μελέτη μηχανικής αντοχής, υπό διαβρωτικές συνθήκες ανοξείδωτων χαλύβων*. Πτυχιακή Εργασία του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά.
- [5] <https://www.nps.gov/articles/000/submarines-in-world-war-ii.htm/>
- [6] <https://www.texasironandmetal.com/metal-steel-ship-construction>
- [7], [8] Μαντά Ε. (2012). *Εργοδιάβρωση ανοξείδωτου χάλυβα*. Διπλωματική Εργασία, Εργασία του τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του ΕΜΠ.
- [9] <https://qtm.materials.uoc.gr/courses/een/projects2016/gerokwstas.pdf>
- [10] https://www.the_hull_truth.com/boating-forum/373914-my-propeller-cracked-pics.html
- [11] http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/METAL_KATASK/me4_2t.htm
- [12] <https://www.corrosionpedia.com/2/5388/corrosion/corrosive-process/how-to-stop-a-ships-marine-corrosion-in-3-steps>
- [13] <https://www.marineinsight.com/tech/hull-corrosion-and-impressed-current-cathodic-protection-iccp-on-ships-construction-and-working/>
- [14] <https://www.powerandmotoryacht.com/maintenance/how-keep-marine-growth-fouling-your-propellers>
- [15] https://www.chemeng.ntua.gr/dpms_ylika/%CE%92%CE%B9%CE%B2%CE%BB%CE%AF%CE%BF%20%CE%94.%20%CE%A5%CF%86%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%AE.pdf
- [16] <https://maredu.hcg.gr/modules/document/file.php/ASP346/M%CE%BF%CF%81%CF%86%CE%AD%CF%82%20%CE%B4%CE%B9%CE%AC%CE%B2%CF%81%CF%89%CF%83%CE%B7%CF%82.pdf>
- [17] <https://www.nitty-gritty.it/en/crevice-corrosion/>
- [18] http://ikee.lib.auth.gr/record/310961/files/%CE%94%CE%B9%CF%80%CE%BB%CF%89%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%93%CE%B5%CF%89%CF%81%CE%B3%CE%B9%CE%AC%CE%B4%CE%BF%CF%85_%CE%91%CE%B9%CE%BA.pdf
- [19] <https://vacaero.com/information-resources/vac-aero-training/47746-intergranular-oxidation-igo-intergranular-attack-iga.html>
- [20], [23] Ευφώλης Σ. (2017). *Μελέτη προστασίας ορείχαλκου σε ατμοσφαιρικό θαλάσσιο περιβάλλον*. Διπλωματική Εργασία, Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.
- [21] <https://www.brighthubengineering.com/marine-engines-machinery/123875-resurfacing-of-bronze-rudders-and-propellers/>
- [22] Zvirko O.I., Savula S.F., Tsenda V.M., Gabetta G., Nykyforchyn H.M. (2016). *Stress corrosion cracking of gas pipeline steels of different strength*, *Procedia Structural. Integrity*, 2, 509-516. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.066>.
- [24] Ντάφλου Ε. (2012). *Ανθεκτικότητα οργανικών επικαλύψεων που περιέχουν αναστολείς διάβρωσης*. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ.

- [25] Τσουλάκος Ν. (2013). Προστασία Μετάλλων μέσω Αντιδιαβρωτικών Χρωμάτων. Διπλωματική Εργασία, Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.
- [26], [27], [28] Ιωσηφίδου Α. (2009). Προστασία χαλύβων σε θαλάσσιο περιβάλλον με αντιδιαβρωτικό επικαλυπτικό που περιέχει πιγμέντο από ανοξείδωτο χάλυβα. Διπλωματική Εργασία, Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.
- [29], [30] Zarasvand K. A. & Rai V. R. (2014). Microorganisms: Induction and inhibition of corrosion in metals. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 87, 66-74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.10.023>.
- [31], [32] Ζαχαροπούλου Α. (2014). Επίδραση πρόσθετων-προσμηκτών στην διάβρωση του χάλυβα οπλισμού του σκυροδέματος. Διδακτορική Διατριβή, Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ.
- [33], [34] Ibrahim B.E., Jmiai A., Bazzi L., Issami S.E. (2020). Amino acids and their derivatives as corrosion inhibitors for metals and alloys. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 740-771/
- [35] <https://www.intechopen.com/chapters/58797>
- [36] Fakih Al, Aziz A.M., Sirat H.M. (2015). Turmeric and ginger as green inhibitors of mild steel corrosion in acidic medium. *Journal. Material. Environmental*, 6 (5), 1480-1487.
- [37] Yang Hyun-Min. (2021). Role of Organic and Eco-Friendly Inhibitors on the Corrosion Mitigation of Steel in Acidic Environments—A State-of-Art Review *Molecules* 26, 11(3473). DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26113473>.
- [38] Αντωνοκοπούλου Μαρία-Αγγελική, Μανιάτη Κλειώ, Παπαναγιώτου Μελισάνθη (2005). Χρήση αναστολέων διάβρωσης στην προστασία υλικών. Πτυχιακή εργασία , Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ.
- [39], [40] Amiery Al., Kadhum A.A.H., Kadhum A, Mohamad A.B., How C.K., Junaedi S. (2014). Inhibition of mild steel corrosion in sulfuric acid solution by new Schiff base. *Journal: Materials*, 7(2), 787-804.
- [41] Zhang T., Yang Y., Shao Y., Meng G., Wang F. (2009). A stochastic analysis of the effect of hydrostatic pressure on the pit corrosion of Fe-20Cr alloy, *Electrochimica Acta*, 54(15), 3915-3922. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.02.010>.
- [42] Sadowski L. (2010). New non-destructive method for linear polarization resistance corrosion rate measurement. *Archives of civil and Mechanical Engineering*, 10, 109-116. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60053-3](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60053-3).