



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

Καθοδική προστασία σε πλοία με την επιβολή εξωτερικής τάσης (σύστημα ICCP)

Impressed current cathodic protection (ICCP) systems for the anti-corrosion protection of ships.

Συγγραφέας:

ΣΚΟΡΔΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

A.M.: 51113031

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Δρ. Σταματίνα Θεοχάρη

Αιγάλεω, 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

Καθοδική προστασία σε πλοία με την επιβολή εξωτερικής τάσης (σύστημα ICCP)

Συγγραφέας

ΣΚΟΡΔΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ (Α.Μ.: 51113031)

Επιβλέπουσα

Σταματίνα Θεοχάρη, Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α.

Ημερομηνία εξέτασης

04/03/2024

Εξεταστική Επιτροπή

Σταματίνα Θεοχάρη
Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α.

Ισίδωρος Ιακωβίδης,
Λέκτορας ΠΑ.Δ.Α.

Γ. Χατζηκωνσταντής
Επ. Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Σκόρδος Ιωάννης του Αντωνίου, με αριθμό μητρώου 51113031 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο Δηλών



ΣΚΟΡΔΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς την επιβλέπουσα καθηγήτρια κ. Σταματίνα Θεοχάρη για τον ανεκτίμητο ρόλο που διαδραμάτισε στην επιτυχή ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας μου. Η πολύτιμη καθοδήγησή της και οι επικοινωνιακές συμβουλές της συνέβαλαν σημαντικά στην ανάπτυξη και εμπλουτισμό της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θέλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τους γονείς μου, τον αδερφό μου και τους στενούς συγγενείς για την ανεκτίμητη στήριξη που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια ολόκληρης της διαδρομής αυτής. Η αμέτρητη αγάπη, η κατανόηση και η ενθάρρυσή τους ήταν καθοριστική σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία επικεντρώνεται στην αναζήτηση αποτελεσματικών λύσεων για την αντιμετώπιση της διάβρωσης στα πλοία, και εστιάζει στη μέθοδο καθοδικής προστασίας που εφαρμόζει επιβαλλόμενο ρεύμα ή τάση από εξωτερική πηγή, και είναι γνωστή ως σύστημα ICCP (Impressed Current Cathodic Protection).

Η εργασία εξετάζει εκτενώς το φαινόμενο της διάβρωσης, των βασικών αρχών της καθοδικής προστασίας και της λειτουργίας του συστήματος ICCP στα πλοία. Στη συνέχεια της εργασίας, δίνεται έμφαση στην ανάλυση των αρχών που εξασφαλίζουν την αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος ICCP, καθώς και στις σύγχρονες μεθοδολογίες που εφαρμόζονται κατά τον σχεδιασμό του.

Τέλος, πραγματοποιείται μια ανασκόπηση μελέτης, όπου συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δύο μεθοδολογίες σχεδίασης (υπολογιστικής και πειραματικής μοντελοποίησης). Αυτή η σύγκριση θα συνεισφέρει στην κατανόηση των δυνατοτήτων και των περιορισμών κάθε μεθοδολογίας, προσφέροντας παράλληλα προοπτικές για περαιτέρω βελτιώσεις και έρευνα στον τομέα της προστασίας των πλοίων από τη διάβρωση με το σύστημα ICCP.

Λέξεις κλειδιά: Διάβρωση πλοίων, Καθοδική προστασία, Καθοδική προστασία με εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση, Μεθοδολογίες πειραματικής και υπολογιστικής μοντελοποίησης.

Abstract

This Diploma Thesis focuses on the research about effective anti-corrosion solutions for ships, and especially on the most modern method of cathodic protection that uses current or voltage imposition from an external source, also known as ICCP (Impressed Current Cathodic Protection) system.

The work includes an extensive examination of the phenomenon of corrosion, the basic principles of cathodic protection and the operation of the ICCP system on ships. In this thesis, emphasis is placed on the analysis of the principles that concerns the effective operation of the ICCP system, as well as the methodologies applied for its design.

Finally, a review study is carried out, where the results obtained from the two design methodologies (computational and experimental modeling) are compared. This comparison will contribute to the understanding of the strengths and limitations of each methodology, while offering perspectives for possible improvements and further research in the field of ship corrosion protection by the ICCP system.

Keywords: Corrosion of ships, Cathodic protection, Cathodic protection ICCP, Methodologies of experimental and computational modeling design.

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Πρόλογος..... | 15 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ | 16 |
| 1.1 Εισαγωγή..... | 16 |
| 1.2 Η ερμηνεία της διάβρωσης..... | 17 |
| 1.3 Η διάβρωση στα πλοία..... | 19 |
| 1.3.1 Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση | 19 |
| 1.3.2 Οι επιπτώσεις της διάβρωσης στα πλοία | 21 |
| 1.4 Αντιμετώπιση της διάβρωσης..... | 22 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΘΟΔΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ..... | 24 |
| 2.1 Εισαγωγή..... | 24 |
| 2.2 Ιστορική αναδρομή | 25 |
| 2.3 Δυναμικό προστασίας..... | 26 |
| 2.4 Κριτήρια καθοδικής προστασίας | 27 |
| 2.4.1 Συνέπειες της μειωμένης προστασίας..... | 28 |
| 2.4.2 Συνέπειες υπερπροστασίας | 29 |
| 2.5 Τρόποι εφαρμογής της καθοδικής προστασίας..... | 29 |
| 2.5.1 Σύστημα θυσιαζόμενων ηλεκτροδίων (ανοδίων) | 30 |
| 2.6 Απαιτούμενη πυκνότητα ρεύματος | 31 |
| 2.7 Απαιτούμενο ρεύμα προστασίας..... | 34 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΑΘΟΔΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ | 36 |
| 3.1 Εισαγωγή..... | 36 |
| 3.2 Πηγές ρεύματος | 37 |
| 3.2.1 Μονάδα ανορθωτή/μετασχηματιστή (rectifier/transformer)..... | 37 |
| 3.2.2 Παροχή ρεύματος και σύστημα ελέγχου | 46 |
| 3.2.3 Εξοπλισμός παρακολούθησης και ελέγχου | 47 |
| 3.3 Άνοδοι επιβαλλόμενου ρεύματος..... | 49 |
| 3.3.1 Άνοδοι από χυτοσίδηρο (<i>Cast iron anodes</i>)..... | 50 |
| 3.3.2 Άνοδοι από γραφίτη (<i>Graphite anodes</i>)..... | 50 |
| 3.3.3 Άνοδοι από μαγνητίτη (<i>Magnetite anodes</i>)..... | 50 |
| 3.3.4 Άνοδοι από χυτοσίδηρο υψηλής περιεκτικότητας σε πυρίτιο (<i>High-silicon cast iron anodes</i>)..... | 50 |
| 3.3.5 Άνοδοι από κράμα μολύβδου-αργύρου (<i>Lead alloy-silver anodes</i>) | 51 |
| 3.3.6 Άνοδοι με επένδυση πλατίνας (<i>Platinized anodes</i>) | 51 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.3.7 | Άνοδοι από μικτά οξειδία μετάλλων (<i>Mixed metal oxides anodes, MMO</i>).... | 52 |
| 3.3.8 | Σύνοψη λειτουργικών χαρακτηριστικών των ανόδων..... | 53 |
| 3.3.9 | Τύποι ανόδων ανάλογα με το σχήμα τους | 53 |
| 3.3.10 | Τρόποι εγκατάστασης των ανόδων..... | 55 |
| 3.4 | Dielectric shield (Διηλεκτρική θωράκιση) | 56 |
| 3.5 | Ηλεκτρόδια αναφοράς..... | 58 |
| 3.5.1 | Ηλεκτρόδιο αναφοράς ψευδαργύρου (Zn)..... | 59 |
| 3.5.2 | Ηλεκτρόδιο αναφοράς αργύρου/χλωριούχου αργύρου (Ag/AgCl)..... | 59 |
| 3.5.3 | Δυναμικά ηλεκτροδίων αναφοράς | 60 |
| 3.6 | Διάταξη ανόδων και ηλεκτροδίων αναφοράς | 61 |
| 3.7 | Καλώδια σύνδεσης..... | 63 |
| 3.8 | Cofferdams (Φράγματα)..... | 64 |
| 3.9 | Σύνδεση της προπέλας και του πηδαλίου | 64 |
| 3.9.1 | Σύνδεση της προπέλας (bonding of propeller) | 65 |
| 3.9.2 | Σύνδεση του πηδαλίου (bonding of rudder)..... | 67 |
| 3.10 | Οπτική επιθεώρηση, έλεγχος πριν την ενεργοποίηση και αξιολόγηση του συστήματος..... | 68 |
| 3.10.1 | Οπτική επιθεώρηση | 68 |
| 3.10.2 | Μετρήσεις πριν την ενεργοποίηση του συστήματος..... | 68 |
| 3.10.3 | Ενεργοποίηση συστήματος | 69 |
| 3.10.4 | Αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος..... | 69 |
| 3.11 | Λειτουργία και συντήρηση συστήματος..... | 69 |
| 3.12 | Επιθεώρηση του συστήματος κατά τον δεξαμενισμό του πλοίου | 70 |
| 3.13 | Καθοδική προστασία των πλοίων κατά την διάρκεια τελικών δοκιμών (fitting out) και ακινησίας (Lay-up)..... | 71 |
| 3.13.1 | Καθοδική προστασία κατά την διάρκεια τελικών δοκιμών..... | 71 |
| 3.13.2 | Καθοδική προστασία κατά την διάρκεια ακινησίας | 72 |
| 3.14 | Αποφυγή αλληλεπίδρασης του συστήματος | 73 |
| 3.15 | Καταγραφή δεδομένων του συστήματος καθοδικής προστασίας | 73 |
| 3.16 | Υπολογιστικές μέθοδοι για τον σχεδιασμό καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενο ρεύμα | 76 |
| 3.16.1 | Υπολογισμός ρεύματος προστασίας | 76 |
| 3.16.2 | Συνολική αντίσταση του κυκλώματος..... | 78 |
| 3.16.3 | Απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς και τάση εξόδου της μονάδας τροφοδοσίας. 80 | |
| 4 | ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Σχεδιασμός συστημάτων ICCP στα πλοία..... | 81 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.1 | Πειραματική μοντελοποίηση | 81 |
| 4.1.1 | Μεθοδολογία σχεδιασμού μοντέλου φυσικής κλίμακας | 84 |
| 4.1.2 | Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα της χρήσης πειραματικής μοντελοποίησης..... | 87 |
| 4.2 | Υπολογιστική μοντελοποίηση | 88 |
| 4.2.1 | Εφαρμογή μαθηματικών εξισώσεων | 89 |
| 4.2.2 | Εφαρμογή συνοριακών στοιχείων (BEM) | 92 |
| 4.2.3 | Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα της χρήσης υπολογιστικής μοντελοποίησης | 97 |
| 4.3 | Σύγκριση των διαφορετικών μεθόδων πειραματικής και υπολογιστικής μοντελοποίησης | 99 |
| 4.1 | Συνδυαστική μέθοδος σχεδιασμού | 100 |
| 5 | ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ | 102 |
| 5.1 | Εισαγωγή | 102 |
| 5.2 | Μεθοδολογία | 102 |
| 5.3 | Διαδικασία υπολογιστικής και πειραματικής μοντελοποίησης | 103 |
| 5.4 | Αποτελέσματα | 104 |
| 5.5 | Σχολιασμός αποτελεσμάτων | 111 |
| 5.6 | Συμπεράσματα | 114 |
| | ΕΠΙΛΟΓΟΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 116 |
| | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 117 |

Πρόλογος

Η αλληλεπίδραση των πλοίων με το θαλασσινό περιβάλλον αναδεικνύει μια σειρά από προκλήσεις, με τη διάβρωση να αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ασφάλεια και την απόδοση των πλοίων. Στον πολύπλοκο κόσμο της ναυτιλίας, η πρόληψη και η αντιμετώπιση της διάβρωσης αποτελούν πτυχές ζωτικής σημασίας που αφορούν τη διατήρηση της λειτουργικότητας και της ασφάλειας των πλοίων. Η αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου αποδεικνύεται κρίσιμη για τη διατήρηση της διάρκειας ζωής των πλοίων και την προστασία των επιβατών και του πληρώματος.

Η προσέγγιση αυτού του ζητήματος περιλαμβάνει την ανάπτυξη σύγχρονων τεχνικών και τεχνολογιών που επιτρέπουν την αποτελεσματική αντιμετώπιση της διάβρωσης στο θαλάσσιο περιβάλλον. Οι οργανικές επιστρώσεις αποτελούν μια προηγμένη προστατευτική λύση, καθώς εφαρμόζονται πάνω στο μεταλλικό υπόστρωμα των πλοίων, κι εμποδίζουν την άμεση επαφή του με το θαλασσινό περιβάλλον. Αυτή η τεχνολογία συνδυάζει αποτελεσματική προστασία και διατήρηση των υλικών, συνεισφέροντας στη μείωση της διάβρωσης και των αντίστοιχων καταστροφικών επιπτώσεών της. Η καθοδική προστασία αποτελεί επίσης μια σύγχρονη και αποτελεσματική μέθοδο αντιδιαβρωτικής προστασίας των πλοίων. Με την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος από εξωτερική πηγή εμποδίζεται η εκδήλωση της διάβρωσης, και διασφαλίζεται η ακεραιότητα των μεταλλικών επιφανειών των πλοίων. Με τη συνδυαστική χρήση αυτών των τεχνολογιών, επιδιώκεται η επίτευξη μιας αποτελεσματικής, βιώσιμης και προηγμένης προστασίας των πλοίων από την ανεπιθύμητη και επικίνδυνη δράση του φαινομένου της διάβρωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

1.1 Εισαγωγή

Διάβρωση ονομάζεται η φυσική τάση των μετάλλων να επανέρχονται στην αρχική οξειδωμένη μορφή τους, συνήθως στη μορφή οξειδίων ή αλάτων μετάλλων, από τα οποία έχουν παραχθεί. Το φαινόμενο της οξείδωσης εκδηλώνεται από την πρώτη στιγμή κατά την οποία το μέταλλο θα έρθει σε επαφή με το περιβάλλον, και συνήθως υπό την δράση του οξυγόνου και του νερού. Τελικά η οξείδωση σηματοδοτεί τη διάβρωση, που οδηγεί στην υποβάθμιση των ιδιοτήτων και της αντοχής των μετάλλων.

Το φαινόμενο της διάβρωσης αναφέρεται ως η διαδικασία φθοράς ή καταστροφής υλικών λόγω χημικών, φυσικών ή βιολογικών παραγόντων. Η διάβρωση μπορεί να συμβαίνει σε διάφορα υλικά, όπως μέταλλα, πλαστικά, ξύλα και πέτρες, και έχει επιπτώσεις στη βιομηχανία, την τεχνολογία και την καθημερινή ζωή.

Η διάβρωση των μετάλλων χαρακτηρίζεται είτε ως χημική (chemical corrosion) είτε ως ηλεκτροχημική (electrochemical corrosion) ανάλογα με τα αίτια που την προκαλούν. Στην πρώτη περίπτωση η αλλοίωση του μετάλλου συμβαίνει εξαιτίας της αλληλεπίδρασής του με χημικές ουσίες που υπάρχουν στο περιβάλλον. Στην δεύτερη περίπτωση η αλλοίωση του μετάλλου λαμβάνει χώρα εξαιτίας χημικών διεργασιών που οφείλονται στην απώλεια ηλεκτρονίων και τη μεταφορά τους μέσω ενός ηλεκτρολύτη σε άλλο σώμα που είναι περισσότερο ηλεκτραρνητικό. (DeGiorgi, V. G., 1970)

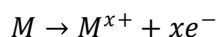
Η διάταξη που δημιουργείται όταν δυο διαφορετικά μέταλλα έρχονται σε επαφή μέσω ηλεκτρολύτη ονομάζεται γαλβανικό ή διμεταλλικό ζεύγος, όπου το μέταλλο με το χαμηλότερο δυναμικό αναγωγής (ή υψηλότερο δυναμικό οξείδωσης) αρχίζει να διαβρώνεται, ενώ το μέταλλο με το υψηλότερο δυναμικό αναγωγής (ή με το χαμηλότερο δυναμικό οξείδωσης) προστατεύεται. Η ηλεκτροχημική διάβρωση είναι η πιο συνήθης μορφή διάβρωσης των ναυπηγικών κατασκευών και μπορεί να προκύψει με διάφορους τρόπους. (Bushman, J. B., 2010)

Για παράδειγμα μπορεί να προκύψει λόγω της δομής των μεταλλικών υλικών που χρησιμοποιούνται, ή λόγω τοπικών μεταβολών που μπορεί να συμβούν στο περιβάλλον του πλοίου, όπως για παράδειγμα λόγω μεταβολών στη συγκέντρωση του οξυγόνου. Στην περίπτωση αυτή, οι περιοχές στις οποίες παρατηρείται έλλειψη οξυγόνου υπόκεινται σε διάβρωση, ενώ οι περιοχές, που είναι πλούσιες σε οξυγόνο παραμένουν άθικτες. (Καρύδης, Π., 2002)

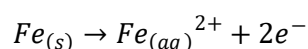
1.2 Η ερμηνεία της διάβρωσης

Για να πραγματοποιηθεί η ηλεκτροχημική αντίδραση της διάβρωσης θα πρέπει να υπάρχουν μια άνοδος και μια κάθοδος, που συνδέονται μέσω κάποιου αγωγού ηλεκτρονίων / ηλεκτρολύτη. Ολόκληρη αυτή η διάταξη ονομάζεται κυψέλη ή κελί διάβρωσης. Στην περίπτωση των πλοίων, ο ηλεκτρολύτης είναι το θαλασσινό νερό.

Στην άνοδο λαμβάνει χώρα η αντίδραση οξειδωσης, που είναι υπεύθυνη για τη διάβρωση του μετάλλου M σύμφωνα με την ακόλουθη χημική εξίσωση (Mathiazhagan, A., 2010; Googan, C., 2021):

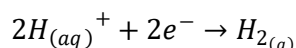


Στην περίπτωση του χάλυβα η χημική εξίσωση γράφεται ως εξής:



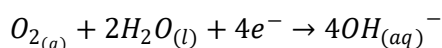
όπου ο Fe παριστάνει ένα άτομο σιδήρου, το Fe^{2+} ένα ιόν σιδήρου, το e^{-} ένα ηλεκτρόνιο και οι δείκτες (s) και (aq) υποδηλώνουν τη στερεή και την ενυδατωμένη κατάσταση των σωμάτων, αντίστοιχα.

Επομένως, η διάβρωση συνοδεύεται από τη ροή ηλεκτρονίων από το ένα μέταλλο (χάλυβα) προς ένα άλλο (II) και την κίνηση των ιόντων μέσα από τον ηλεκτρολύτη (Εικόνα 1). Η περιοχή από την οποία απομακρύνονται ηλεκτρόνια (οξειδωση) αναφέρεται ως ανοδική περιοχή και η αντίδραση χαρακτηρίζεται ως ανοδική. Τα μεταλλικά ιόντα μπορεί να αντιδράσουν με αρνητικά ιόντα που υπάρχουν στον ηλεκτρολύτη και να δώσουν αδιάλυτα προϊόντα διάβρωσης (όπως για παράδειγμα, σκουριά στην περίπτωση του χάλυβα). Τα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται, περνούν στην κάθοδο (μέταλλο II) όπου καταναλώνονται σε μια αντίδραση αναγωγής. Σε όξινα διαλύματα η καθοδική αντίδραση μπορεί να γραφτεί ως εξής:

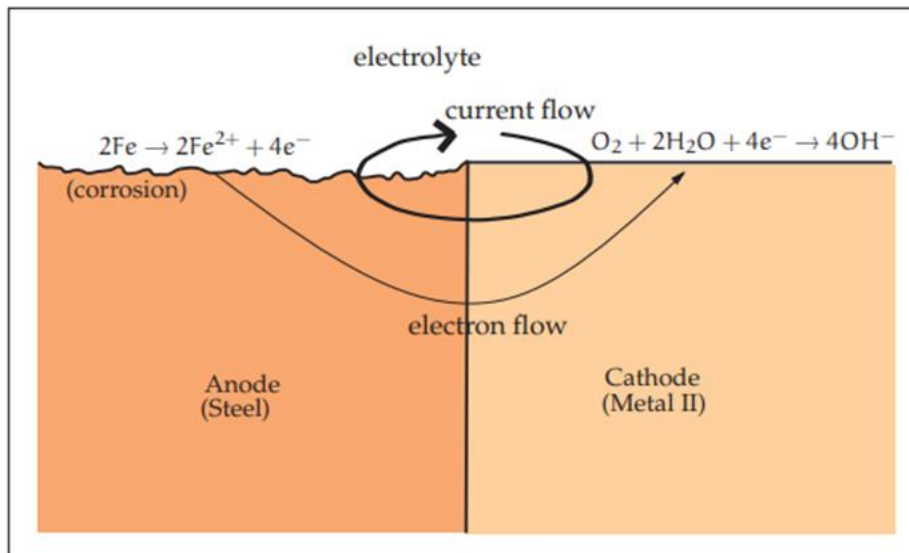


Όπου το H^{+} παριστάνει ένα ιόν υδρογόνου και ο δείκτης (g) συμβολίζει την αέρια κατάσταση του υδρογόνου.

Σε ουδέτερα διαλύματα, όπως είναι το θαλασσινό νερό, η χημική εξίσωση γράφεται:



Το O_2 παριστάνει το αέριο οξυγόνο, το H_2O ένα μόριο νερού, το OH^{-} ένα ιόν υδροξυλίου. Τέλος, ο δείκτης (l) υποδηλώνει την υγρή κατάσταση του νερού. (Kakuba, G., 2005)



Εικόνα 1 : Σχηματική αναπαράσταση της διάβρωσης κατά το σχηματισμό διμεταλλικού ζεύγους. (Πηγή: Kakuba, G. 2005)

Κατά την ανοδική αντίδραση η απομάκρυνση ιόντων Fe^{2+} αντιστοιχεί στην παραγωγή ρεύματος I_A με αποτέλεσμα την διάλυση ποσότητας του ανοδικού μετάλλου (χάλυβα) κατά Δm (g). Αντίστοιχα στην καθοδική αντίδραση η μετακίνηση των ηλεκτρονίων προς το άλλο μέταλλο (II) αντιστοιχεί σε ηλεκτρικό ρεύμα I_C με το μέταλλο να παραμένει άθικτο στην περιοχή αυτή. Συμπερασματικά, η κάθοδος προστατεύεται και παραμένει άθικτη, ενώ η άνοδος διαβρώνεται και η διαδικασία εξελίσσεται μέχρις ότου η ανοδική περιοχή να καταναλωθεί πλήρως. Το μέταλλο της ανόδου καταναλώνεται σύμφωνα με τον νόμο του Faraday (Schwenk, W., 1997):

$$\Delta m = \frac{M * Q}{z * F}$$

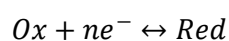
Όπου:

- Δm είναι η μάζα του διαλυμένου μετάλλου
- M είναι το ατομικό βάρος του μετάλλου
- Q είναι το μεταφερόμενο ηλεκτρικό φορτίο
- z το σθένος των μεταλλικών ιόντων και
- F είναι η σταθερά του Faraday.

Τα I_A και I_C είναι γνωστά ως ανοδικά και καθοδικά επιμέρους ρεύματα. Έτσι το συνολικό ρεύμα I υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$I = I_A - I_C$$

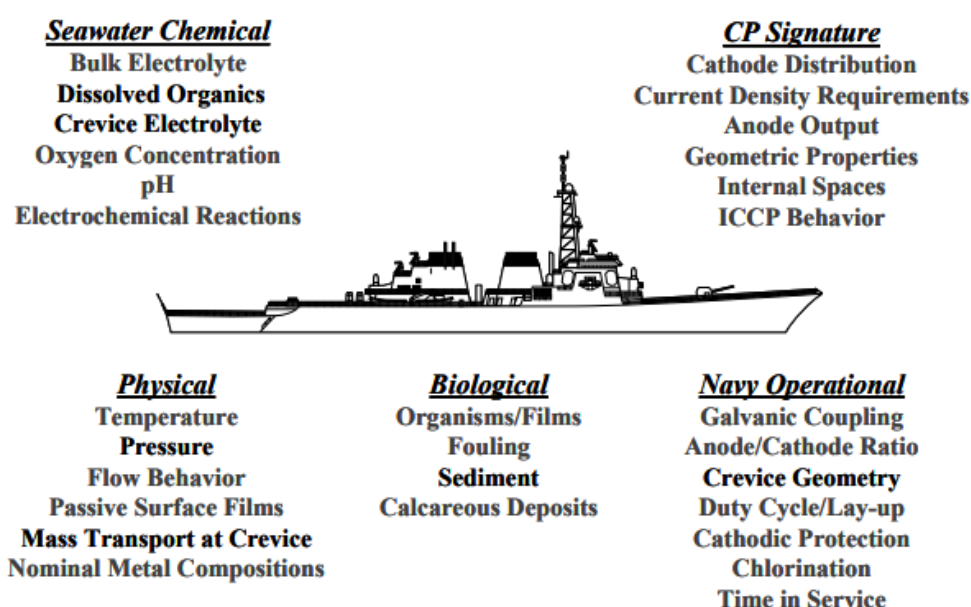
Στην περίπτωση της διάβρωσης το συνολικό ρεύμα είναι πάντα μηδέν (δηλαδή $I_A = I_C$). Τα ηλεκτρόνια δεν καταναλώνονται αλλά συμμετέχουν στην αντίδραση με τον ακόλουθο τρόπο:



Όπου Ox παριστάνει το στοιχείο που οξειδώνεται και Red το στοιχείο που ανάγεται. Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι n ηλεκτρόνια μεταφέρονται κατά τη διάρκεια του φαινομένου της οξειδοαναγωγής.

1.3 Η διάβρωση στα πλοία

Τα πλοία εκτίθενται στο θαλασσινό νερό σε διαφορετικές θερμοκρασίες και γενικά συνθήκες περιβάλλοντος (Εικόνα 2). Με βάση την περιεκτικότητά τους σε άλατα, τα νερά μέσα στα οποία ταξιδεύουν τα πλοία, κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τις παρακάτω προσεγγιστικές περιοχές τιμών: το θαλασσινό νερό περιέχει 3.0 - 4.0% χλωριούχο νάτριο, το υφάλμυρο νερό σε παράκτιες περιοχές 1.0 - 3.0%, το υφάλμυρο νερό ποταμού 0.5 - 1.8%, το αλμυρό νερό ποταμού 0.05 - 0.5% και το νερό ποταμού <0.05%. Επίσης η περιεκτικότητα των ωκεανών σε άλατα θεωρείται σχεδόν σταθερή σε παγκόσμια κλίμακα και ότι αντιστοιχεί σε παρόμοια επίπεδα τιμών, ενώ αντίθετα διαφορετική περιεκτικότητα μπορεί να εμφανιστεί σε πιο κλειστές θάλασσες π.χ. στην Αδριατική (3.9%), στην Ερυθρά θάλασσα (4.1%) και στην Βαλτική (1.0%). Η περιεκτικότητα σε άλατα καθορίζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού. (Bohnes, H. & Richter, B., 1997)



Εικόνα 2: Παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση των πλοίων (Πηγή: DeGiorgi V.G., et al 2005)

1.3.1 Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση

Το θαλασσινό νερό είναι ένας πολύ έντονα διαβρωτικός ηλεκτρολύτης, με αποτέλεσμα τα πλοία και οι θαλάσσιες κατασκευές που βυθίζονται σε αυτό να υφίστανται διάβρωση σε εξαιρετικά σοβαρό βαθμό. (Abbas, M., & Shafiee, M., 2020; Jirapure, S.C., & Borade, A.B., 2014)

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την διαδικασία της διάβρωσης είναι οι παρακάτω:

- 1) Η περιεκτικότητα και η διάχυση του οξυγόνου.
- 2) Η θερμοκρασία.
- 3) Η αγωγιμότητα του διαλύματος.

- 4) Το pH του διαλύματος.
- 5) Το ηλεκτρικό δυναμικό.
- 6) Η παρουσία ιόντων χλωρίου.

1.3.1.1 *Περιεκτικότητα και διάχυση οξυγόνου*

Το οξυγόνο είναι απαραίτητο συστατικό για την ανοδική αντίδραση (οξειδωση) και ο ρυθμός διάβρωσης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την διάχυση του οξυγόνου πάνω στην χαλύβδινη κατασκευή του πλοίου. Η διάχυση του οξυγόνου εξαρτάται από τον ρυθμό ροής του νερού, δηλαδή όσο ο ρυθμός ροής αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και ο ρυθμός μεταφοράς του οξυγόνου. Έχει παρατηρηθεί ότι με την αύξηση του βάθους της θάλασσας, όπου ο ρυθμός ροής του νερού είναι χαμηλός, η ταχύτητα διάχυσης του οξυγόνου στην μεταλλική επιφάνεια είναι σχετικά μικρή, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερο ρυθμό διάβρωσης. Επομένως γίνεται κατανοητό, ότι στην γάστρα ενός πλοίου που βυθίζεται στο νερό, ο ρυθμός διάβρωσης κοντά στην περιοχή της ισάλου πλευσης (ζώνη παφλασμού) είναι μεγαλύτερος σε σύγκριση με το κατώτερο βυθισμένο τμήμα της (δηλαδή τον πυθμένα). Επίσης οι περιοχές έντονης ροής, όπως συμβαίνει στο πρυμναίο τμήμα του πλοίου, παρουσιάζουν υψηλότερο ρυθμό διάβρωσης, διότι σε αυτές συμβαίνουν υψηλές αναταράξεις λόγω των κυμάτων και της περιστροφής της προπέλας. (Jirapure, S.C., & Borade, A.B., 2014)

1.3.1.2 *Θερμοκρασία*

Η διαλυτότητα του οξυγόνου στο νερό μειώνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας, αλλά ο ρυθμός διάχυσης αυξάνεται εκθετικά. Αυτό οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού διάβρωσης με την αύξηση της θερμοκρασίας. Για το λόγο αυτό παρατηρείται αυξημένος ρυθμός διάβρωσης όταν ένα πλοίο πλέει σε τροπικά ύδατα σε σύγκριση με την περίπτωση όπου η πλευση πραγματοποιείται σε πιο ψυχρά ύδατα (π.χ. στον Βόρειο Ατλαντικό). Επιπλέον με την αύξηση της θερμοκρασίας, ο ρυθμός διάβρωσης του χάλυβα και των άλλων μετάλλων είναι μεγαλύτερος, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι περιοχές δίπλα στο μηχανοστάσιο και κάτω από το κατάστρωμα να διαβρώνονται ταχύτερα.

1.3.1.3 *Αγωγιμότητα του διαλύματος*

Η αγωγιμότητα ενός διαλύματος αναφέρεται στην ικανότητα ενός υγρού διαλύματος να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Είναι μια φυσική ιδιότητα που συνδέεται συνήθως με την παρουσία ιόντων ή άλλων ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων στο διάλυμα. Η διάβρωση συμβαίνει υπό την προϋπόθεση να υπάρχει ένα αγώγιμο υλικό μέσο μεταξύ της ανόδου και της καθόδου. Για παράδειγμα στο απεσταγμένο νερό, όπου δεν περιέχονται ιόντα, θεωρητικά δεν αναμένεται να συμβεί διάβρωση, ενώ αντίθετα η διάβρωση αναμένεται να είναι εντονότερη, όταν η αγωγιμότητα αυξάνεται με την παρουσία περισσότερων ιόντων. Συνήθως, τα ιόντα που περιέχονται στο διάλυμα, όπως τα ανόργανα άλατα ή τα ιόντα που προέρχονται από διαλυμένες ουσίες, μπορούν να κινηθούν ελεύθερα και να μεταφέρουν το ηλεκτρικό φορτίο μέσα από το υγρό. Η αγωγιμότητα διαλύματος μετρείται συνήθως σε μονάδες Siemens ανά μέτρο (S/m). Κατά συνέπεια, το θαλασσινό νερό αποτελεί ένα εξαιρετικά διαβρωτικό διάλυμα με υψηλή αγωγιμότητα, ενώ η αγωγιμότητα και επομένως η διαβρωτική ικανότητα του γλυκού και υφάλμυρου νερού είναι αρκετά μικρότερη.

1.3.1.4 Το pH του διαλύματος

Η τιμή του pH ενός διαλύματος αποτελεί κριτήριο της οξύτητας ή της αλκαλικότητας αυτού, και κυμαίνεται σε ένα εύρος τιμών από το 1 έως το 14. Αν η τιμή του pH τείνει προς το 1 τότε το διάλυμα χαρακτηρίζεται ως όξινο και διαθέτει περίσσεια ιόντων υδρογόνου (H^+), εάν τείνει στο 14 ονομάζεται βασικό και διαθέτει περίσσεια ιόντων υδροξυλίου (OH^-), ενώ εάν ισούται με 7 τότε το διάλυμα είναι ουδέτερο και τα ιόντα H^+ και OH^- βρίσκονται σε πλήρη ισορροπία. Το pH επηρεάζει την ανάπτυξη χημικών αντιδράσεων οξειδωσης ή αναγωγής, που μπορεί να επιταχύνουν ή να επιβραδύνουν τις διαδικασίες διάβρωσης ενός μετάλλου. Σε ένα όξινο διάλυμα με περίσσεια ιόντων υδρογόνου, κατά την αντίδραση της διάβρωσης, συμβαίνει έκλυση αερίου υδρογόνου, με αποτέλεσμα ο ρυθμός διάβρωσης να αυξάνει σημαντικά. Σε ένα βασικό διάλυμα όπου επικρατούν αλκαλικές συνθήκες και υπάρχει περίσσεια ιόντων υδροξυλίου, μια μεταλλική κατασκευή μπορεί να μην επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό από την διάβρωση. Τέλος, σε ουδέτερα ή ελαφρώς βασικά περιβάλλοντα, όπως είναι το θαλασσινό νερό ($pH=7.5$) τα ιόντα υδρογόνου και τα ιόντα υδροξυλίου βρίσκονται σχεδόν σε ισορροπία, οπότε δεν αναμένεται να συμβεί αντίδραση διάβρωσης και στην περίπτωση που συμβεί, τότε η διάβρωση μπορεί να είναι λιγότερο επιθετική σε ορισμένα υλικά.

1.3.1.5 Ηλεκτρικό δυναμικό

Κάθε μέταλλο το οποίο βυθίζεται σε ένα αγώγιμο διάλυμα (ηλεκτρολύτη) χαρακτηρίζεται από ένα συγκεκριμένο ηλεκτρικό δυναμικό. Το ηλεκτρικό δυναμικό μπορεί να μετρηθεί σε σύγκριση με ένα γνωστό ηλεκτρικό δυναμικό ενός ηλεκτροδίου αναφοράς. Η ταχύτητα της διάβρωσης καθορίζεται από την τιμή του ηλεκτρικού δυναμικού που εμφανίζει το μέταλλο μέσα στον ηλεκτρολύτη. (Googan, C., 2021)

1.3.1.6 Χλωρίδια και θειικά ανιόντα

Η παρουσία ιόντων χλωρίου (Cl^-) στο θαλασσινό νερό, καθώς και τα θειικά ανιόντα που τυχόν βρίσκονται σε αυτό, επηρεάζουν σημαντικά τις διαδικασίες διάβρωσης, ιδίως των μεταλλικών υλικών. Τα χλωρίδια είναι γνωστά για το ρόλο τους στη δημιουργία τοπικής προσβολής (γνωστής ως "pitting corrosion") σημείων της επιφάνειας των μεταλλικών υλικών, που μπορεί να προκαλέσουν βαθιές οπές και απώλεια υλικού. Αντίστοιχα συμβαίνει με την παρουσία αυξημένων επιπέδων ιόντων χλωρίου και θειικών ανιόντων, που μπορεί να οδηγήσει σε επιτάχυνση της διάβρωσης των μεταλλικών υλικών που βυθίζονται στο θαλασσινό νερό. Η επίδραση των ιόντων χλωρίου καταστρέφει τα μέταλλα και υποβαθμίζει τις ιδιότητες των προστατευτικών οξειδίων που αναπτύσσονται στην επιφάνεια τους, ενώ επιπλέον τα θειικά ανιόντα επιταχύνουν την μεταφορά ηλεκτρονίων και την παραγωγή προϊόντων διάβρωσης στις μεταλλικές επιφάνειες των πλοίων. (Seal, A., 2017)

1.3.2 Οι επιπτώσεις της διάβρωσης στα πλοία

Η διάβρωση των πλοίων αποτελεί σοβαρό ζήτημα, καθώς αυτά εκτίθενται συχνά σε ακραίες συνθήκες περιβάλλοντος όπως αναφέρθηκε προηγουμένως (αλατότητα θαλασσινού νερού, αλλαγές θερμοκρασίας, κτλ.). Οι επιπτώσεις της διάβρωσης στα πλοία είναι πολλές, ενώ οι κυριότερες αναφέρονται στη συνέχεια:

Η αστοχία των υλικών ενός πλοίου είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στην ναυτιλιακή βιομηχανία και οφείλεται κατά κύριο λόγο στην διάβρωση. Η διάβρωση μπορεί να προκαλέσει σημαντική φθορά στην μεταλλική κατασκευή του πλοίου, καθώς τα πάχη των ελασμάτων μειώνονται λόγω της οξειδωσης και κατά συνέπεια της διάλυσης του υλικού τους. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται την εμφάνιση μεγαλύτερων τάσεων και παράλληλα την μείωση της αντοχής των κατασκευαστικών στοιχείων του πλοίου. (Putra, N., et al, 2019)

Άλλο ένα πρόβλημα που προκαλείται εξαιτίας της διάβρωσης είναι η αύξηση της αντίστασης τριβής του πλοίου, εξαιτίας της αύξησης της τραχύτητας του ελάσματος της γάστρας. Με την αύξηση της αντίστασης τριβής αυξάνεται και η ολική αντίσταση πλεύσης του πλοίου, με αποτέλεσμα να δαπανώνται περισσότερα καύσιμα για την κίνηση και την διατήρηση της προβλεπόμενης ταχύτητας λειτουργίας του πλοίου.

Οι περιοχές των πλοίων που πλήττονται εντονότερα από την διάβρωση είναι το εξωτερικό περίβλημα της γάστρας, τα ελάσματα του κύριου καταστρώματος, οι δεξαμενές έρματος, οι δεξαμενές ζυγοστάθμισης στο πρωραίο και στο πρυμναίο τμήμα, τα αμπάρια/δεξαμενές φορτίου (στα φορτηγά ή στα δεξαμενόπλοια, αντίστοιχα) και η προπέλα. Η διάβρωση αυξάνει το κόστος συντήρησης, καθώς απαιτεί την αντιμετώπιση και επισκευή των μεταλλικών δομικών στοιχείων σε τακτά χρονικά διαστήματα για τη διατήρηση της ασφάλειας και της λειτουργικότητας του πλοίου. (Καρύδης, Π., 2002)

Επιπλέον η διάβρωση των πλοίων εγκυμονεί πολλούς κινδύνους για την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής, καθώς και για κάθε είδους ζωντανό οργανισμό στην θάλασσα και γενικότερα για το περιβάλλον. Επομένως αποτελεί ένα από τα κυριότερα προβλήματα, που απασχολούν τις κυβερνήσεις και τους διεθνείς οργανισμούς, καθώς και τους πλοιοκτήτες και συνολικά τον κόσμο της ναυτιλίας, που θα πρέπει να λαμβάνουν διαρκώς την κατάλληλη μέριμνα για την αντιμετώπιση και την αποτροπή της.

Γενικά, η διάβρωση στα πλοία απαιτεί συστηματική παρακολούθηση και αντιμετώπιση για τη διατήρηση της ασφάλειας και της λειτουργικότητάς τους. Οι ναυπηγοί και οι ναυτιλιακές εταιρείες πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις συνθήκες λειτουργίας των πλοίων, τις ιδιαιτερότητες του θαλάσσιου περιβάλλοντος και τους παράγοντες που μπορούν να επιταχύνουν τη διάβρωση.

1.4 Αντιμετώπιση της διάβρωσης

Το φαινόμενο της διάβρωσης είναι ανεπιθύμητο, καθώς οδηγεί στην καταστροφή των μετάλλων και για το λόγο αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την πρόληψη και την αποτροπή του. Οι πιο διαδεδομένοι μέθοδοι για την πρόληψη της διάβρωσης στα πλοία είναι (Mainier, F. B., & Perassolli, V., 2014):

1. Η εφαρμογή οργανικών επιστρώσεων.
2. Η εφαρμογή καθοδικής προστασίας.

Σύμφωνα με τη μέθοδο των οργανικών επιστρώσεων, που είναι υποχρεωτική με βάση τους κανονισμούς του Διεθνή Οργανισμού Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organization), αποτρέπεται η άμεση επαφή του ηλεκτρολύτη (θαλασσινό νερό) με την μεταλλική κατασκευή. Η μέθοδος περιλαμβάνει την εφαρμογή κατάλληλης επικάλυψης (βαφής) στην

επιφάνεια της γάστρας και των υπόλοιπων μεταλλικών εξαρτημάτων του πλοίου, η οποία εμποδίζει τον ηλεκτρολύτη να φτάσει στις επιφάνειες αυτές και να τις διαβρώσει (Εικόνα 3).



Εικόνα 3:Εργασίες εφαρμογής οργανικής επίστρωσης σε γάστρα πλοίου. (Πηγή: <https://safety4sea.com/hull-coatings-technologies/>)

Η εφαρμογή της μονωτικής επίστρωσης στην κατασκευή θα μειώσει σημαντικά την απαιτούμενη πυκνότητα ρεύματος για καθοδική προστασία. Όταν εφαρμοστούν για πρώτη φορά, οι επικαλύψεις μπορεί να εμφανίζουν ορισμένα ελαττώματα τα οποία ενδέχεται κατά τη λειτουργία του πλοίου να αναπτυχθούν περαιτέρω. Η συνδυασμένη χρήση επιστρώσεων και καθοδικής προστασίας προσφέρει αθροιστικά τα πιο ελκυστικά χαρακτηριστικά καθεμιάς από τις παραπάνω μεθόδους ελέγχου της διάβρωσης. Έτσι, ο μεγαλύτερος βαθμός προστασίας παρέχεται από την επίστρωση και στη συνέχεια, η καθοδική προστασία παρέχει προστασία στα σημεία της επικάλυψης, όπου υπάρχουν ατέλειες ή ελαττώματα. Καθώς η επίστρωση υποβαθμίζεται με την πάροδο του χρόνου, αναπτύσσεται η δράση του συστήματος καθοδικής προστασίας. Ένας σωστός συνδυασμός επίστρωσης και καθοδικής προστασίας θα έχει ως αποτέλεσμα ένα οικονομικό και αποτελεσματικό σύστημα προστασίας του πλοίου. (Francis, PE., 2020; Oh, J. S., & Kim, J. D., 2004)

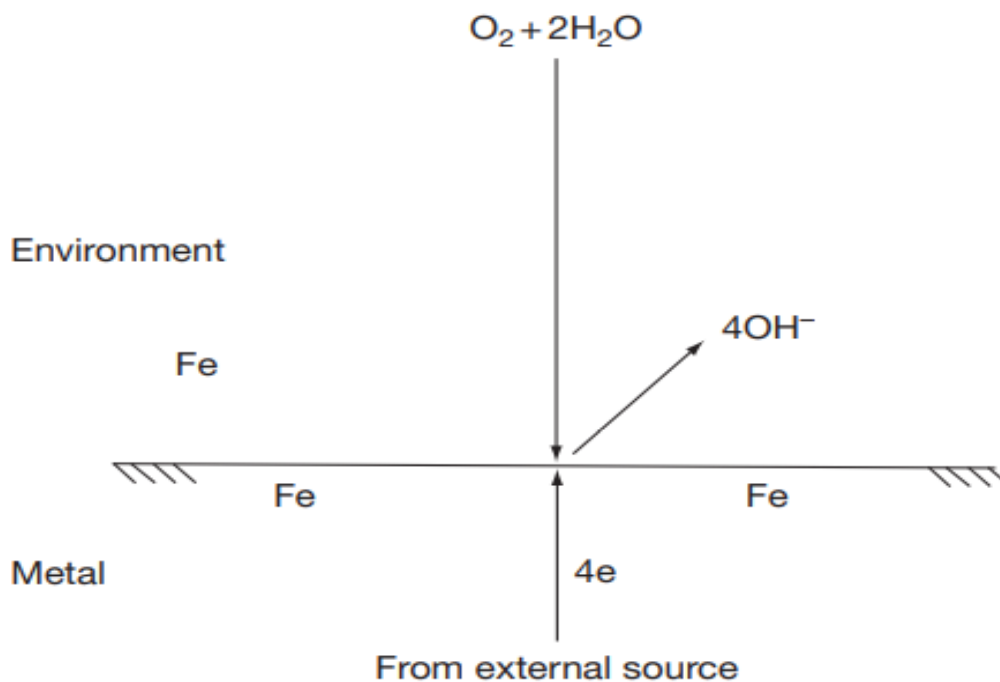
Μια επίστρωση θα πρέπει ιδανικά, να διαθέτει υψηλή ηλεκτρική αντίσταση και να είναι συνεχής, δηλαδή να εμφανίζει όσο το δυνατόν λιγότερα «κενά» και ατέλειες ή ελαττώματα. Θα πρέπει να είναι ανθεκτική σε οποιαδήποτε χημική ή βακτηριακή δράση και επιπλέον σε όλες τις μεταβολές θερμοκρασίας, όπου μπορεί να εκτεθεί. Η επίστρωση δεν θα πρέπει να εμφανίζει φυσαλίδες και θα πρέπει να προσφύεται δηλαδή να προσκολλάται ισχυρά στην επιφάνεια που πρόκειται να προστατευτεί. Επιπλέον θα πρέπει να έχει ικανοποιητικά χαρακτηριστικά όσον αφορά τη συμπεριφορά έναντι της γήρανσης και επαρκή μηχανική αντοχή. Η ικανότητα αντίστασης στην τριβή είναι επίσης σημαντική για να εξασφαλίζεται η ομαλή πλεύση του πλοίου στο νερό. (British Standard, 1991)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΘΟΔΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή

Σύμφωνα με τις βασικές θεωρητικές αρχές της Ηλεκτροχημείας σχετικά με τις ανοδικές και καθοδικές αντιδράσεις, είναι δυνατό να προβλεφθεί τι συμβαίνει στην περίπτωση της διάβρωσης μιας μεταλλικής κατασκευής. Για παράδειγμα, όταν ηλεκτρόνια απομακρύνονται από την επιφάνεια του μετάλλου, αναμένεται επιτάχυνση της ανοδικής αντίδρασης και επομένως, ο ρυθμός διάβρωσης και διάλυσης/κατανάλωσης του μετάλλου αναμένεται να αυξηθεί. Αντίθετα, όταν στην επιφάνεια του μετάλλου οδεύσουν και προστεθούν ηλεκτρόνια, η καθοδική αντίδραση θα πραγματοποιηθεί (προκειμένου να καταναλωθούν τα ηλεκτρόνια που προστέθηκαν) και τότε η ανοδική αντίδραση θα ανασταλεί και η διάβρωση του μετάλλου θα καθυστερήσει. Η παραπάνω διαδικασία αποτελεί την αρχή λειτουργίας της καθοδικής προστασίας. (Ashworth, V., 2010)

Επομένως, η μέθοδος της καθοδικής προστασίας περιλαμβάνει τη σύνδεση μιας εξωτερικής ανόδου και την εφαρμογή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος στην υπό προστασία μεταλλική κατασκευή, η οποία προσλαμβάνει ηλεκτρόνια και λειτουργεί ως κάθοδος. Όταν το ηλεκτρικό δυναμικό της γάστρας του πλοίου που βρίσκεται βυθισμένο στον ηλεκτρολύτη (δηλαδή στο θαλασσινό νερό) ρυθμίζεται σε κατάλληλο εύρος τιμών, ώστε να παρέχεται επαρκές ρεύμα (δηλαδή να εξασφαλίζεται η παροχή της απαραίτητης ποσότητας ηλεκτρικού φορτίου), τότε παρεμποδίζονται οι ανοδικές αντιδράσεις στην επιφάνεια του μετάλλου (Εικόνα 4), και η μεταλλική κατασκευή (γάστρα) προστατεύεται πλήρως από την διάβρωση.

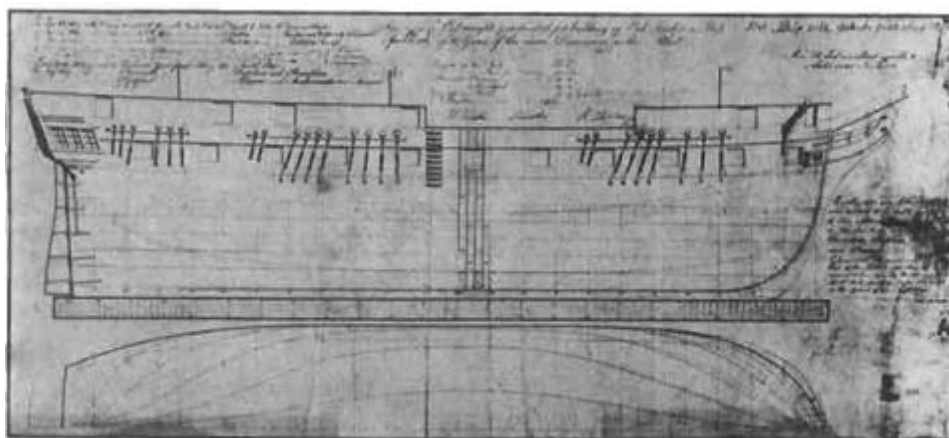


Εικόνα 4: Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού καθοδικής προστασίας. (Πηγή: Ashworth, V., 2010)

2.2 Ιστορική αναδρομή

Η πρώτη πρακτική καθοδικής προστασίας αποδίδεται στον χημικό και εφευρέτη Humphry Davy, όταν το 1761 ζητήθηκε από το αγγλικό ναυαρχείο η συμβουλή του, για την προστασία της χάλκινης επένδυσης που έφεραν τα πλοία του πολεμικού ναυτικού. Μετά από πολυάριθμα εργαστηριακά πειράματα ο Davy ανακάλυψε ότι ο χαλκός προστατεύεται στο θαλασσινό νερό με την προσκόλληση μικρών ελασμάτων σιδήρου ή ψευδαργύρου. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων του διαπίστωσε ότι η διάβρωση του χαλκού στο θαλασσινό νερό αποτρέπεται όταν είναι ελαφρά αρνητικά φορτισμένος, οπότε ο χαλκός μπορεί να προστατευτεί «καθοδικά».

Το 1824 αφού ο Davy κοινοποίησε τα αποτελέσματα της εφεύρεσης του, έλαβε άδεια από το βρετανικό ναυαρχείο να τα εφαρμόσει στην πράξη. Η πρώτη εγκατάσταση καθοδικής προστασίας πλοίου εφαρμόστηκε στην φρεγάτα HMS Samarang (Εικόνα 5), στην οποία τοποθετήθηκαν τέσσερις ομάδες ανοδίων από χυτοσίδηρο. Η πρακτική της καθοδικής προστασίας των χάλκινων επενδύσεων της φρεγάτας είχε τέλεια αποτελέσματα όσον αφορά την αποτροπή της διάβρωσης, ωστόσο διαπιστώθηκε υποβάθμιση των αντιρρυπαντικών ιδιοτήτων του χαλκού, καθώς παρατηρήθηκε αυξημένη θαλάσσια βιοσυσσώρευση στο κύτος. Τελικά, η ευεργετική δράση των ιόντων χαλκού στην αποφυγή της βιοσυσσώρευσης κρίθηκε πιο σημαντική από την πρόληψη της διάβρωσης του περιβλήματος και για τον λόγο αυτό η συγκεκριμένη πρακτική εγκαταλείφθηκε σχετικά γρήγορα. (Von Baeckmann, W., 1997)



Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση του σχεδίου κατασκευής της φρεγάτας Sammarang, η οποία ήταν το πρώτο πλοίο που έκανε θαλάσσιο ταξίδι με καθοδική προστασία του χάλκινου περιβλήματος. (Πηγή: Von Baeckmann, W., 1997)

Αξίζει να σημειωθεί ότι, το 1834 ο Άγγλος επιστήμονας Michael Faraday έθεσε τα επιστημονικά θεμέλια της ηλεκτρόλυσης και τις αρχές της καθοδικής προστασίας, όταν διατύπωσε την ποσοτική σχέση μεταξύ της απώλειας βάρους λόγω διάβρωσης του μετάλλου και του ηλεκτρικού φορτίου (νόμος του Faraday).

Στις αρχές του 1900 όταν ο χάλυβας άρχισε να χρησιμοποιείται εκτενώς ως ναυπηγικό υλικό λόγω των καλύτερων μηχανικών ιδιοτήτων που έχει σε σχέση με το σίδηρο, τότε η διάβρωση του κύτους αναγνωρίστηκε ως σοβαρό πρόβλημα από την ναυτιλιακή

βιομηχανία. Το πρόβλημα της διάβρωσης άρχισε πλέον να αντιμετωπίζεται με την τοποθέτηση ανοδίων ψευδαργύρου στην πρύμνη και στο πηδάλιο των πλοίων.

Λίγο πριν τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, το ναυτικό του Καναδά διεξήγαγε πειράματα καθοδικής προστασίας στα πλοία του με την επικόλληση ανόδων μαγνησίου. Στην περίπτωση αυτή διαπιστώθηκε ότι η χρήση του συγκεκριμένου μετάλλου δεν ήταν η καταλληλότερη, διότι προκαλούσε σπινθήρες στις δεξαμενές έρματος/φορτίου των πλοίων και ελευθέρων υπερβολικές ποσότητες αερίου υδρογόνου κατά την λειτουργία του.

Στην συνέχεια η έρευνα στράφηκε προς την ανάπτυξη νέων κραμάτων για την κατασκευή ανόδων ψευδαργύρου και αλουμινίου, με αποτέλεσμα να αυξηθεί σημαντικά η ηλεκτρική χωρητικότητα και το ηλεκτρικό δυναμικό βελτιώνοντας σημαντικά την απόδοσή τους.

Η ταχύτερη ανάπτυξη της καθοδικής προστασίας έγινε στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής για να καλύψει τις απαιτήσεις της ταχέως αναπτυσσόμενης βιομηχανίας πετρελαίου και φυσικού αερίου, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα της χρήσης χαλύβδινων σωλήνων λεπτού τοιχώματος για υπόγεια μεταφορά καυσίμων. Για το σκοπό αυτό η μέθοδος καθιερώθηκε πλήρως στις Ηνωμένες Πολιτείες το 1945. (Francis, PE.,2020)

Στα τέλη του 1950 διατυπώθηκε η ιδέα ότι η διάβρωση μπορεί να αποτραπεί με την επιβολή συνεχούς ρεύματος χαμηλής τάσης από μια εξωτερική πηγή με τη χρήση αδρανών μετάλλων (άνοδοι). Με την συγκεκριμένη μέθοδο ήταν δυνατόν να εξοικονομηθεί το κόστος αντικατάστασης των θυσιαζόμενων ανοδίων ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Κατά συνέπεια τα λεγόμενα συστήματα καθοδικής προστασίας επιβαλλόμενου ρεύματος άρχισαν να εφαρμόζονται στην ναυτιλιακή βιομηχανία για την προστασία των πλοίων αλλά και άλλων κατασκευών από την διάβρωση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ανάπτυξη της επιστήμης και της τεχνολογίας στον τομέα αυτόν είναι συνεχής και εξελίσσεται διαρκώς μέχρι σήμερα. Επιπλέον, όσο καλύτερα κατανοούνται τα θεμελιώδη θεωρητικά στοιχεία που αφορούν το φαινόμενο της διάβρωσης, τόσο περισσότερο αναπτύσσονται και εξελίσσονται νέες μέθοδοι, υλικά και καινοτομίες με σκοπό την καλύτερη και πιο αποτελεσματική λειτουργία των συστημάτων καθοδικής προστασίας των πλοίων.

2.3 Δυναμικό προστασίας

Η διαφορά δυναμικού μεταξύ ανόδου και καθόδου σε τυπικές συνθήκες ορίζεται ως εξής:

$$E_0 = E_{cathode} - E_{anode}$$

Στην περίπτωση κατά την οποία δεν παρέχεται ρεύμα από εξωτερική πηγή, δηλαδή όταν $V_0 = 0$, τότε το ρεύμα ρέει από την άνοδο στην κάθοδο, καθώς ισχύει:

$$E_{cathode} > E_{anode}$$

Σε άλλες συνθήκες, όπου οι συγκεντρώσεις των δύο ιοντικών διαλυμάτων (δηλαδή ανόδου και καθόδου) είναι διαφορετικές, η διαφορά δυναμικού υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση του Nernst:

$$E_{cathode} - E_{anode} = E_0 - \frac{RT}{nF} \ln Q$$

όπου:

- E_0 είναι η τυπική διαφορά δυναμικού
- R είναι η σταθερά αερίου ($8,31431 \text{ joules}/(^{\circ}\text{K}\cdot\text{mole})$)
- T είναι η απόλυτη θερμοκρασία σε *Kelvin* ($298,2^{\circ}\text{K}$)
- n είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στην αντίδραση
- F είναι η σταθερά του *Faraday* (96.500 C/mole) και
- Q είναι η σταθερά ισορροπίας

Η σταθερά ισορροπίας ορίζεται ως εξής:

$$Q = \frac{[a_M^{+ne}]}{[a_m]}$$

Όπου:

- a_M^{+ne} είναι η ενεργότητα των μεταλλικών ιόντων και
- a_m είναι η ενεργότητα του μετάλλου (ισούται με 1 για καθαρό μέταλλο)

Στην αυθόρμητη αντίδραση διάβρωσης ισχύει ότι $E_{cathode} - E_{anode} > 0$ και επομένως πραγματοποιείται μεταφορά ηλεκτρονίων από την άνοδο στην κάθοδο. Ωστόσο κατά την εφαρμογή τάσης V_0 από εξωτερική πηγή η εξίσωση του Nernst ορίζεται ως εξής:

$$E_{cathode} - E_{anode} = E^0 - V_0 - \frac{RT}{nF} \ln Q$$

Στην περίπτωση που $E_{cathode} - E_{anode} < 0$ τότε έχει επιβληθεί τάση V_0 εξαιρετικά υψηλής τιμής, που θα αναγκάζει το ηλεκτρικό ρεύμα να ρέει αντίθετα από την επιθυμητή φορά, οπότε δημιουργείται ηλεκτρολυτικό στοιχείο, και κατά συνέπεια η κάθοδος διαλύεται ενώ η άνοδος παραμένει άθικτη.

Η ισορροπία επιτυγχάνεται όταν $E_{cathode} - E_{anode} = 0$, και τότε η εξωτερική τάση πρέπει να ισούται:

$$V_0 = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln Q$$

Η παραπάνω συνθήκη ονομάζεται δυναμικό κυψέλης ή κελιού μηδενικού ρεύματος. Επομένως αποδεικνύεται ότι τόσο η πρόβλεψη της πιθανότητας να συμβεί η αντίδραση διάβρωσης όσο και της μεθόδου εφαρμογής της καθοδικής προστασίας ακολουθούν τα βασικά θεωρητικά στοιχεία της ηλεκτροχημείας. (Kakuba, G., 2005)

2.4 Κριτήρια καθοδικής προστασίας

Τα απαιτούμενα ηλεκτρικά δυναμικά για την προστασία των μετάλλων στο θαλασινό νερό βασίζονται στα κριτήρια καθοδικής προστασίας (Πίνακας 1) με τις συγκεκριμένες τιμές να εξαρτώνται από το ηλεκτρόδιο αναφοράς που χρησιμοποιείται κάθε φορά.

Πίνακας 1: Ηλεκτρικά δυναμικά για την προστασία των μετάλλων από τη διάβρωση στο θαλασσινό νερό, σε σχέση με το ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl. (Πηγή: ABS, 2017)

| Material | Minimum Negative Potential volts | Maximum Negative Potential volts |
|---|---|----------------------------------|
| Iron and steel | -0.80 for aerobic environment | -1.10 |
| | -0.90 for anaerobic environment (with active sulfate reducing bacteria) | -1.10 |
| High-strength steels (yield strength > 690 MPa or hardness > 350 HV) | -0.80 | -0.83 to -0.95 ⁽¹⁾ |
| Austenitic stainless steel for aerobic and anaerobic conditions $N_{PRE} = \% Cr + 3.3\% (Mo + 0.5W) + 16\% N$ | -0.30 for $N_{PRE} \geq 40$ ⁽²⁾ | -1.10 |
| | -0.60 $N_{PRE} < 40$ ⁽²⁾ | -1.10 |
| Duplex stainless steel for aerobic and anaerobic conditions | -0.60 ⁽²⁾ | See Note 3 |
| Martensitic stainless steel (13%Cr) for aerobic and anaerobic conditions | -0.50 | See Note 5 |
| Nickel-based alloys | -0.20 | See Note 4 |
| Copper alloys | -0.45 to -0.60 for alloys with aluminum | -1.10 |
| | -0.45 to -0.60 for alloys without aluminum | No limit |

Notes

- For high-strength steels susceptible to hydrogen-induced stress cracking (HISC), the maximum negative potential should be more positive (less negative) than -0.83 V (Ag/AgCl/seawater reference electrode).
- For most applications, these potentials are adequate for the protection of crevices, although higher (more negative) potentials may be considered.
- Forgings, castings, and welds are more prone to HISC than wrought materials due to the coarse microstructure allowing HISC propagating preferentially in the ferritic phase.
- High-strength nickel copper and nickel chromium iron alloys can be subject to HISC, and potentials that result in significant hydrogen evolution should be avoided.
- Depending on strength, specific metallurgic condition, and stress level encountered in service, those alloys can be susceptible to hydrogen embrittlement and cracking. If a risk of hydrogen embrittlement exists, then potential more negative than -0.80 V should be avoided.

Με βάση τον Πίνακα 1, παρατηρείται ότι το απαραίτητο δυναμικό για να εξασφαλίζεται η προστασία του χάλυβα ή των κραμάτων του από τη διάβρωση όταν βυθίζονται σε θαλασσινό νερό (αερόβιες συνθήκες) κυμαίνεται από -0.80 V έως -1.1 V σε σχέση με το ηλεκτρόδιο αναφοράς αργύρου/χλωριούχου αργύρου (Ag/AgCl). Με μια πόλωση αυτής της τάξης μεγέθους, ο ρυθμός διάβρωσης του χάλυβα στο θαλασσινό νερό εμποδίζεται σε ένα ικανοποιητικά χαμηλό επίπεδο. Το δυναμικό προστασίας μειώνεται στα -0.9 V σε σχέση με το ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl στην περίπτωση του χάλυβα που βυθίζεται σε θαλασσινό νερό κάτω από αναερόβιες συνθήκες.

Επιπρόσθετα για χάλυβες υψηλής αντοχής με όριο διαρροής υψηλότερο από 690 MPa, η μέγιστη τιμή για το δυναμικό θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ -0.83 V έως -0.95 V έναντι του ηλεκτροδίου Ag/AgCl, το οποίο προσδιορίζεται έπειτα από δοκιμές των χαλύβων αυτού του τύπου σε συγκεκριμένες μεταλλουργικές και μηχανικές συνθήκες.

2.4.1 Συνέπειες της μειωμένης προστασίας

Στην περίπτωση που τα μετρούμενα δυναμικά ενός πλοίου δεν είναι επαρκή σύμφωνα με τα κριτήρια καθοδικής προστασίας, τότε η διάβρωση αναμένεται να περιοριστεί αλλά δεν θα αναχαιτιστεί πλήρως, καθώς ο βαθμός απόδοσης του συστήματος προστασίας εξαρτάται από την ποσότητα ρεύματος που παρέχεται. Όταν η παροχή ρεύματος

προστασίας διακοπεί εντελώς, η διάβρωση θα επανέλθει σύντομα στον κανονικό αρχικό ρυθμό της.

2.4.2 Συνέπειες υπερπροστασίας

Η επιβολή δυναμικού μεγαλύτερου από το απαιτούμενο σε ένα πλοίο, εκτός από σπατάλη ηλεκτρικής ενέργειας και υλικών ανόδου, είναι δυνατόν να προκαλέσει και άλλα ανεπιθύμητα φαινόμενα όπως:

- 1) Αποκόλληση της οργανικής επίστρωσης. Όταν παρέχεται δυναμικό προστασίας μεγαλύτερο από την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή, τότε προκαλείται παραγωγή αερίου υδρογόνου, το οποίο συχνά παγιδεύεται μεταξύ της επικάλυψης και της μεταλλικής επιφάνειας, δημιουργεί φυσαλίδες και τελικά οδηγεί σε αποκόλληση της επίστρωσης.
- 2) Ψαθυροποίηση υδρογόνου. Το υδρογόνο που παράγεται όταν το δυναμικό καθοδικής προστασίας είναι υπερβολικά μεγάλο, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της ολκιμότητας του χάλυβα. Η ψαθυροποίηση υδρογόνου αποτελεί μια επικίνδυνη επίπτωση και παρατηρείται ιδιαίτερα στους χάλυβες υψηλής αντοχής. (HQUSACE, 1999)

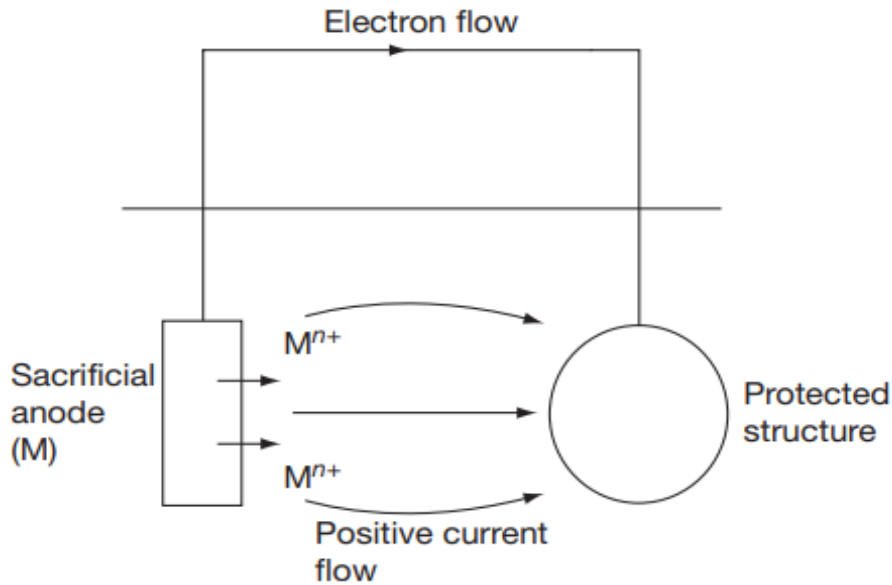
Συμπερασματικά, το σύστημα καθοδικής προστασίας θα πρέπει να παρέχει επαρκές και σωστά κατανομημένο ρεύμα στις χαλύβδινες επιφάνειες της γάστρας του πλοίου, έτσι ώστε οι επιφάνειες να μπορούν να πολωθούν εντός ενός κατάλληλου ορίου δυναμικών, που ορίζεται με βάση τα κριτήρια καθοδικής προστασίας. Με άλλα λόγια, για το σχεδιασμό του συστήματος καθοδικής προστασίας για την εξωτερική επιφάνεια του κύτους θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι συνθήκες λειτουργίας και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου, ώστε το δυναμικό προστασίας να είναι όσο το δυνατόν ομοιόμορφα κατανομημένο σε ολόκληρη την βυθισμένη επιφάνεια του πλοίου. Αποδεικνύεται ότι η επιλογή του συστήματος καθοδικής προστασίας έχει ιδιαίτερη σημασία για την σωστή λειτουργία αλλά και τη διάρκεια ζωής του πλοίου.

2.5 Τρόποι εφαρμογής της καθοδικής προστασίας

Οι κύριοι τρόποι εφαρμογής της καθοδικής προστασίας είναι οι εξής δύο:

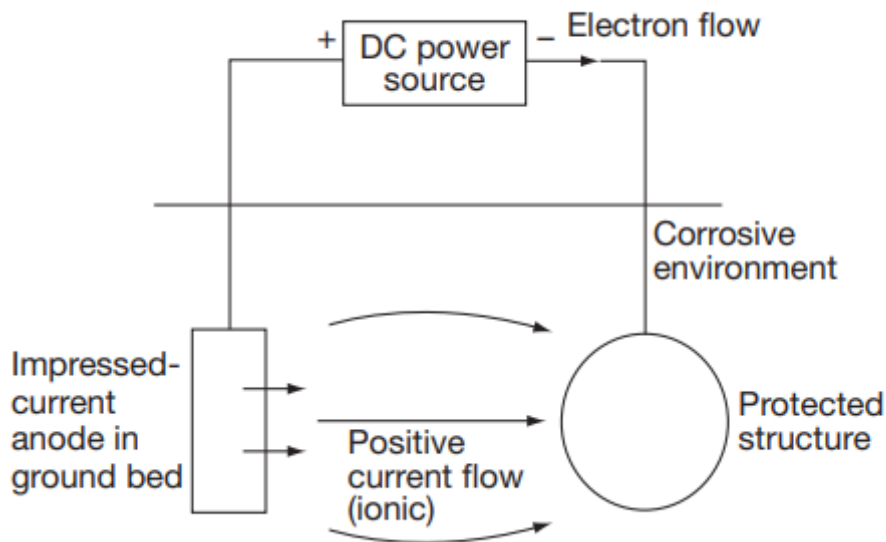
- 1) Με την χρήση θυσιαζόμενων (ή γαλβανικών) ανοδίων
- 2) Με την επιβολή ρεύματος (ή τάσης) από εξωτερική πηγή

Στην πρώτη περίπτωση ένα βοηθητικό μέταλλο συνδέεται απευθείας με την κατασκευή που πρόκειται να προστατευθεί και λειτουργεί ως άνοδος. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ της ανόδου και του χάλυβα, όπως υποδεικνύεται από τις σχετικές θέσεις τους στην ηλεκτροχημική σειρά, προκαλεί τη δημιουργία ρεύματος που ρέει μέσω του ηλεκτρολύτη από την άνοδο προς την χαλύβδινη κατασκευή και την προστατεύει (Εικόνα 6). (Kakuba, G., 2017; Mrdović, L., & Ivošević, Š., 2023)



Εικόνα 6: Σχηματική απεικόνιση καθοδικής προστασίας με τη χρήση θυσιαζόμενων ηλεκτροδίων (ανοδίων). (Πηγή: Ashworth, V.,2010)

Στην δεύτερη περίπτωση μια άνοδος από αδρανές υλικό προσαρμόζεται στην επιφάνεια του χαλύβδινου κύτους και συνδέεται με μια εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος για την επιβολή ρεύματος στην προστατευόμενη δομή (Εικόνα 7). Η συγκεκριμένη μέθοδος ονομάζεται καθοδική προστασία με επιβολή ρεύματος και θα παρουσιαστεί αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια.



Εικόνα 7: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου καθοδικής προστασίας με χρήση επιβαλλόμενου ρεύματος από εξωτερική πηγή. (Πηγή: Ashworth, V., 2010)

2.5.1 Σύστημα θυσιαζόμενων ηλεκτροδίων (ανοδίων)

Για την κατανόηση της δράσης των θυσιαζόμενων ανοδίων χρειάζεται να αναφερθεί η ηλεκτροχημική σειρά ή σειρά δραστηκότητας των μετάλλων (Πίνακας 2). Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται συνήθως ως θυσιαζόμενες άνοδοι είναι το αλουμίνιο (Al), ο

ψευδάργυρος (*Zn*) και το μαγνήσιο (*Mg*) καθώς είναι πιο ηλεκτροθετικά στοιχεία σε σχέση με το χάλυβα (κράμα σιδήρου *Fe*) με αποτέλεσμα να του παρέχουν ηλεκτρόνια, όταν συνδέονται μεταξύ τους ενώ βρίσκονται μέσα στο θαλασσινό νερό. (Francis, PE., 2020; Tezdogan, T., & Demirel, Y. K., 2014)

Πίνακας 2: Ηλεκτροχημική σειρά μετάλλων στο θαλασσινό νερό. (Πηγή: Francis, PE., 2020)

Electropositive
Platinum
Titanium
Stainless steel
Monel
Copper
Lead
Iron, cast iron, or steel
Cadmium
Zinc
Aluminium
Magnesium
Electronegative

Η διάρκεια ζωής των ανόδων κυμαίνεται συνήθως από 10 έως 15 έτη και εξαρτάται από την ποσότητα ρεύματος που απαιτείται να παρέχουν και από το μέγεθός τους. Όταν το σύστημα καθοδικής προστασίας έχει εγκατασταθεί και συντηρείται σωστά με την περιοδική αντικατάσταση των ανοδίων όπως απαιτείται, τότε η δομή του πλοίου μένει απρόσβλητη από την διάβρωση και επομένως, η διάρκεια ζωής του πλοίου καθορίζεται πλέον από άλλους παράγοντες. (HQUSACE, 1999)

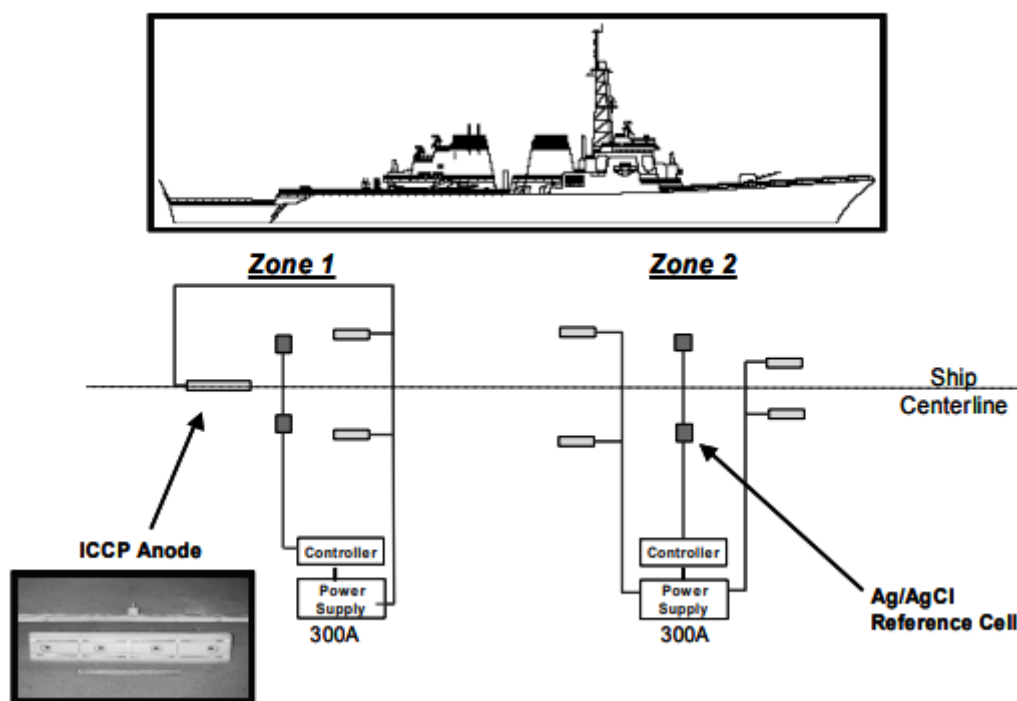
Η μέθοδος καθοδικής προστασίας με τη χρήση ανοδίων προτιμάται κυρίως σε μικρά πλοία κάτω των 100 μέτρων, όπου η απαιτούμενη ποσότητα ρεύματος είναι σχετικά μικρή. Επίσης η χρήση της μεθόδου εφαρμόζεται για την προστασία των δεξαμενών φορτίου/έρματος, καθώς είναι πιο ασφαλής σε σύγκριση με την μέθοδο του επιβαλλόμενου ρεύματος, διότι η χρήση του ρεύματος έχει την τάση να δημιουργεί σπινθήρες, φαινόμενο που είναι επικίνδυνο κατά την μεταφορά εύφλεκτου φορτίου στις δεξαμενές. (Veritas, D. N. & Lloyd, G., 2017; Mrdović, L., & Ivošević, Š., 2023)

2.6 Απαιτούμενη πυκνότητα ρεύματος

Για την επίτευξη καθοδικής προστασίας απαιτείται να επιβληθεί ορισμένη πυκνότητα ρεύματος από την πηγή ρεύματος προς την προστατευόμενη κατασκευή. Η πυκνότητα ρεύματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κατασκευής που πρόκειται να

προστατευθεί και εκφράζεται ως το πηλίκο του ρεύματος ανά μονάδα επιφάνειας (mA/m^2). Οι συνήθειες παράγοντες που καθορίζουν την απαιτούμενη πυκνότητα ρεύματος προστασίας είναι η σύσταση του ηλεκτρολύτη, η συγκέντρωση οξυγόνου, η ταχύτητα του νερού, η θερμοκρασία και η κατάσταση του προστατευόμενου μετάλλου. Για τους παραπάνω λόγους θα πρέπει να παρέχεται η κατάλληλη πυκνότητα ρεύματος ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις συνθήκες λειτουργίας του πλοίου. Η πυκνότητα ρεύματος που πρόκειται να επιβληθεί μπορεί να επιλέγεται μέσω μιας βάσης δεδομένων από άλλα πλοία που λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο ή μέσω πειραματικών δοκιμών και μετρήσεων. (ABS, 2017)

Κατά τον σχεδιασμό της καθοδικής προστασίας οι επιφάνειες της γάστρας του πλοίου μπορούν να χωριστούν σε διαφορετικές ζώνες καθοδικής προστασίας. Οι ζώνες αυτές αν και συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους, μπορούν να θεωρούνται ανεξάρτητες κατά τον σχεδιασμό του συστήματος προστασίας. Για παράδειγμα, η γάστρα χωρίζεται στην πρωμαία και στην πρυμναία ζώνη ενώ το πηδάλιο και η έλικα μπορούν να αποτελούν ξεχωριστές ζώνες (Εικόνα 8).



Εικόνα 8: Τυπική διάταξη συστήματος ICCP δύο ζωνών. (Πηγή: DeGiorgi, V.G., et al, 2005)

Η πρυμναία ζώνη καθοδικής προστασίας έχει την υψηλότερη ζήτηση ρεύματος λόγω των υψηλών ρυθμών ροής και αναταράξεων και επίσης, λόγω του διμεταλλικού ζεύγους που δημιουργείται μεταξύ της γάστρας και της προπέλας. Το σύστημα καθοδικής προστασίας για κάθε ζώνη θα πρέπει να είναι λεπτομερώς σχεδιασμένο και επίσης, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά των υλικών, της επιφάνειας και της κατάστασης της επίστρωσης που έχει εφαρμοστεί. (ABS, 2017)

Η πυκνότητα ρεύματος, που απαιτείται για την προστασία του επιστρωμένου χάλυβα (*coated steel*) σε κάθε ζώνη καθοδικής προστασίας, υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω μαθηματική σχέση (ABS, 2017):

$$J_c = J_b * f_c$$

Όπου:

- J_c είναι η πυκνότητα ρεύματος για την προστασία του επιστρωμένου χάλυβα (*coated steel*) (A/m^2).
- J_b είναι η πυκνότητα ρεύματος για την προστασία του μη επιστρωμένου (γυμνού) χάλυβα (*bare steel*) σε (A/m^2).
- f_c είναι ο συντελεστής διάσπασης της επίστρωσης, ο οποίος με την πάροδο του χρόνου μεταβάλλεται λόγω γήρανσης και μηχανικής βλάβης. Ο συντελεστής διάσπασης θεωρείται $f_c = 0$ για μια τέλεια μονωτική επίστρωση και $f_c = 1$ για τον μη επιστρωμένο χάλυβα.

Οι τυπικές τιμές πυκνοτήτων ρεύματος για επικαλυμμένο και γυμνό χάλυβα (Πίνακας 3) δίνονται παρακάτω και σύμφωνα με τον Αμερικανικό Νηογνώμονα (American Bureau of Shipping – ABS, 2017) είναι οι εξής:

Πίνακας 3: Τυπικές πυκνότητες ρεύματος για γυμνό και επικαλυμμένο χάλυβα. (Πηγή: ABS, 2017)

| <i>Situation</i> <i>m/s (knots)</i> | <i>Design Current Densities</i> <i>for Bare Steel</i> <i>mA/m² (mA/ft²)</i> | <i>Design Current Densities</i> <i>for Coated Steel</i> <i>mA/m² (mA/ft²)</i> |
|--|---|---|
| $V \leq 1$ (2 knots) | 100-200 (9.3-18.6) without tidal influence | 5-15 (0.5-1.4) |
| | 150-250 (13.9-23.2) with tidal influence | 7-20 (0.7-1.9) |
| $1 < V < 10$ (20 knots) | 220-350 (20.4-32.5) | 11-28 (1.0-2.6) |
| $V \geq 10$ (20 knots) | 350-500 (32.5-46.5) | 18-40 (1.7-3.7) |
| Vessels in ice | 500-750 (46.5-69.7) | 35-90 (3.3-8.4) |
| Propeller surface | ≥ 500 (46.5) | |

Οι τιμές του συντελεστή διάσπασης της επίστρωσης (Πίνακας 4) εξαρτώνται κυρίως από τις συνθήκες κατασκευής και λειτουργίας του πλοίου και δίνονται παρακάτω σύμφωνα με τον ABS, ενώ για πλοία με υψηλή ταχύτητα πλεύσης (άνω των 25 κόμβων) και για πλοία που πλέουν σε πάγο, το ετήσιο ποσοστό φθοράς της επίστρωσης μπορεί να είναι υψηλότερο. (ABS, 2017)

Πίνακας 4: Τιμές του συντελεστή διάσπασης επίστρωσης της γάστρας. (Πηγή: ABS, 2017)

| | | |
|---|---|---------------------|
| Initial coating breakdown factor | | 1% to 2% |
| Indicative annual deterioration rates for durability defined ISO 12944 for seawater or brackish water immersion service | Using low durability coating systems | 3% per year |
| | Using medium durability coating systems | 1.5% per year |
| | Using high durability coating systems | 0.5% to 1% per year |

Συμπερασματικά, το απαιτούμενο ρεύμα προστασίας για κάθε περιοχή της μεταλλικής δομής προκύπτει από το γινόμενο του εμβαδού επιφάνειας επί την πυκνότητα ρεύματος προστασίας που απαιτείται για γυμνό χάλυβα πολλαπλασιασμένο με τον συντελεστή διάσπασης της επίστρωσης. (ABS, 2017)

2.7 Απαιτούμενο ρεύμα προστασίας

Το απαιτούμενο ρεύμα προστασίας για κάθε ζώνη μπορεί να προσδιοριστεί όταν είναι γνωστές οι περιοχές της επιφάνειας του πλοίου που χρειάζονται προστασία και οι πυκνότητες ρεύματος κάθε συνιστώσας, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Ο σχεδιασμός των συστημάτων επιβαλλόμενου ρεύματος βασίζεται στη μέγιστη ζήτηση ρεύματος, ενώ ο σχεδιασμός των συστημάτων θυσιαζόμενων ανόδων βασίζεται στη μέγιστη και στη μέση ζήτηση ρεύματος. (ABS, 2017)

Επομένως, κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος καθοδικής προστασίας (είτε με θυσιαζόμενες ανόδους είτε με εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση) θα πρέπει να ληφθούν υπόψη δύο διαφορετικές τιμές, η μέγιστη τιμή (I_{max}) και η μέση τιμή (I_{mean}) απαιτούμενου ρεύματος (ABS, 2017), όπου:

- Το I_{mean} χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ελάχιστης μάζας του υλικού γαλβανικής ανόδου ή της διάρκειας ζωής των ανόδων επιβαλλόμενου ρεύματος που είναι απαραίτητα για τη διατήρηση της καθοδικής προστασίας καθ' όλη την περίοδο σχεδιασμού.
- Το I_{max} αντιστοιχεί στις πιο απαιτητικές συνθήκες λειτουργίας (π.χ. δυναμικές συνθήκες, με την τιμή του συντελεστή διάσπασης επίστρωσης υπολογισμένη στο τέλος ζωής της επίστρωσης και θεωρώντας τις πλέον δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες) και χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό της μέγιστης ισχύος ρεύματος του συστήματος καθοδικής προστασίας.

Οι δυο τιμές του απαιτούμενου ρεύματος προστασίας υπολογίζονται σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους (ABS, 2017):

$$I_{i,max} = S_i * f_{c,max} * J_{bd} (A)$$

$$I_{i,mean} = S_i * f_{c,mean} * [t * J_{bd} + (1 - t) * J_{bs}](A)$$

Όπου:

- $I_{i,max}$ είναι η μέγιστη ζήτηση ρεύματος προστασίας για ένα εξάρτημα (A)
- $I_{i,mean}$ είναι η μέση ζήτηση ρεύματος προστασίας για ένα εξάρτημα (A)

- S_i είναι περιοχή της βυθισμένης ζώνης (υπό συνθήκες πλήρους φορτίου, συμπεριλαμβανομένης της υποβρύχιας γάστρας) (m^2)
- $f_{c,max}$ είναι ο μέγιστος συντελεστής διάσπασης επίστρωσης, όπου $f_{c,max} = 1$ για επιφάνεια γυμνού χάλυβα
- $f_{c,mean}$ είναι ο μέσος συντελεστής διάσπασης επίστρωσης για τη σχετική περίοδο λειτουργίας, όπου $f_{c,mean} = 1$ για επιφάνεια γυμνού χάλυβα
- J_{bd} είναι η πυκνότητα ρεύματος για γυμνό μέταλλο σε δυναμικές συνθήκες (A/m^2)
- J_{bs} είναι η πυκνότητα ρεύματος για γυμνό μέταλλο σε στατικές συνθήκες (A/m^2)
- t είναι το κλάσμα του χρόνου που σχετίζεται με τις δυναμικές συνθήκες

Επομένως το απαιτούμενο ρεύμα προστασίας δίνεται από το άθροισμα όλων των συνιστωσών για κάθε ζώνη καθοδικής προστασίας (ABS, 2017):

$$I_{max} = \sum I_{i,max}$$

$$I_{mean} = \sum I_{i,mean}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΑΘΟΔΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

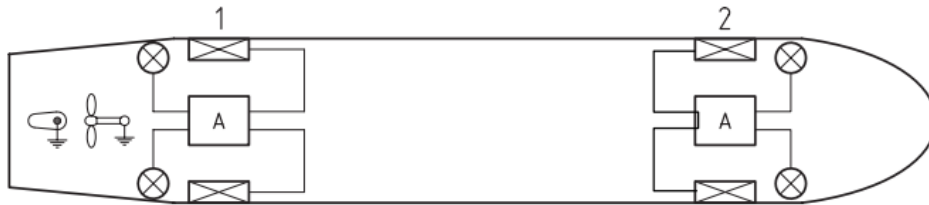
3.1 Εισαγωγή

Η καθοδική προστασία με εξωτερικά επιβαλλόμενο ρεύμα (Impressed Current Cathodic Protection – ICCP) χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές στην θάλασσα και την ξηρά με σκοπό την αποτροπή της διάβρωσης των μεταλλικών κατασκευών. Σε αντίθεση με τα συστήματα θυσιαζόμενων ανόδων, όπου η φυσική (αυθόρμητη) διαφορά δυναμικού μεταξύ της ανόδου και της καθόδου παρέχει το απαιτούμενο ρεύμα προστασίας, ένα σύστημα ICCP τροφοδοτεί με ηλεκτρόνια την προστατευόμενη κατασκευή μέσω μιας εξωτερικής πηγής ρεύματος. Ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδέεται απευθείας με την κατασκευή που πρόκειται να προστατευτεί, ενώ ο θετικός πόλος συνδέεται με τις βοηθητικές αδρανείς ανόδους του συστήματος επιβαλλόμενου ρεύματος. (Oh, J. S., & Kim, J. D., 2004; Putra, N., et al, 2019)

Τα συστήματα ICCP έχουν καθιερωθεί από την ναυπηγική βιομηχανία για την προστασία της βυθιζόμενης γάστρας των πλοίων και η χρήση τους συνήθως προτιμάται για πλοία άνω των 100 μέτρων, όπου το απαιτούμενο ρεύμα προστασίας είναι σχετικά υψηλό και η χρήση θυσιαζόμενων ανόδων καθίσταται αντισυμβατική ή και αναποτελεσματική. Σε αυτή την περίπτωση, το επιβαλλόμενο ρεύμα προστασίας, που απαιτείται, παρακολουθείται και ρυθμίζεται ανάλογα με την ταχύτητα του πλοίου και την ειδική αντίσταση του ηλεκτρολύτη (θαλασσινό νερό), οπότε με τον τρόπο αυτό αποτρέπονται τα προβλήματα που προκύπτουν τόσο από την ελλιπή όσο και από την υπερβολική επιβολή ρεύματος προστασίας στη μεταλλική κατασκευή.

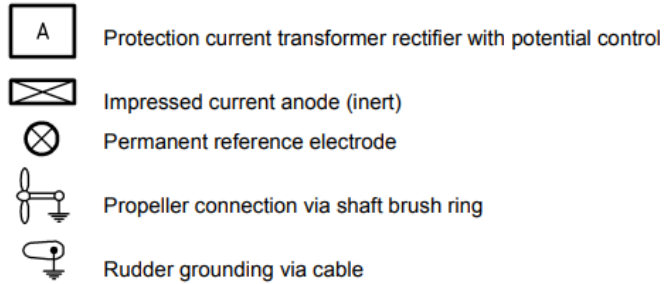
Τα κύρια μέρη που απαρτίζουν ένα σύστημα ICCP (Εικόνα 9) είναι τα εξής:

- Πηγή ρεύματος (power source)
- Συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου του ρεύματος (monitoring and control system).
- Άνοδοι επιβαλλόμενου ρεύματος (impressed current anodes).
- Διηλεκτρική θωράκιση (dielectric shields).
- Ηλεκτρόδια αναφοράς (reference electrodes).
- Καλώδια σύνδεσης (cable connections).
- Φράγματα (Cofferdams).
- Σύστημα γείωσης προπέλας (bonding system of propeller).
- Σύστημα γείωσης πηδαλίου (bonding system of rudder).



Key

- 1 Aft (Stern) installation
- 2 Forward (Bow) installation



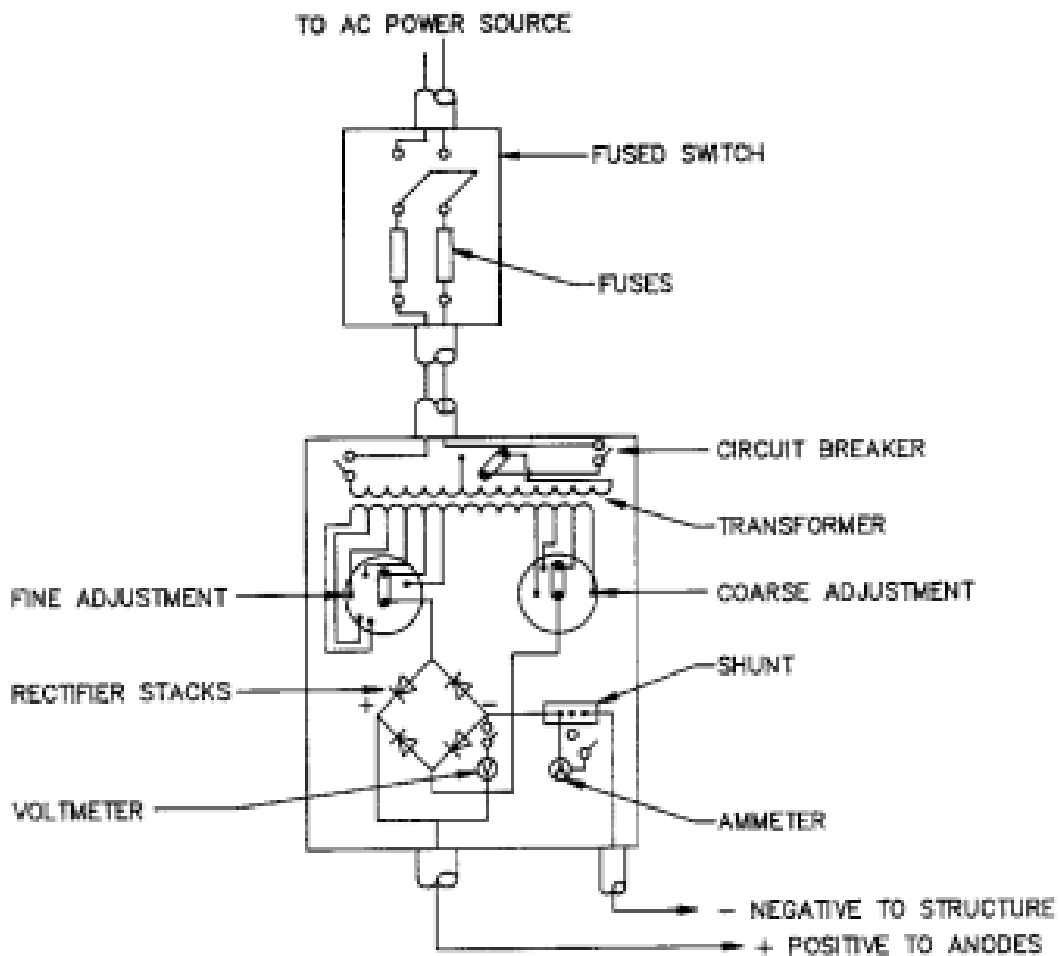
Εικόνα 9: Σχηματική απεικόνιση συστήματος ICCP. (Πηγή: European Standard, 2012)

3.2 Πηγές ρεύματος

Η πηγή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος χρησιμοποιείται για την εξασφάλιση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ της ανόδου και της κατασκευής που προστατεύεται και είναι συνήθως μία μονάδα ανορθωτή/μετασχηματιστή (“*rectifier/transformer*”) που μετατρέπει το εναλλασσόμενο (*Alternating Current - AC*) σε συνεχές ρεύμα (*Direct Current - DC*) κατάλληλης τάσης και ρεύματος εξόδου. Ωστόσο, σε ειδικές εφαρμογές, όταν οι μονάδες ανορθωτή/μετασχηματιστή δεν είναι διαθέσιμες, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν άλλες πηγές ενέργειας, όπως είναι ηλιακά φωτοβολταϊκά στοιχεία, θερμοηλεκτρικές γεννήτριες, ανεμογεννήτριες, κινητήρες, μπαταρίες και ατμοστρόβιλοι κλειστού κύκλου. (HQUSACE, 1999)

3.2.1 Μονάδα ανορθωτή/μετασχηματιστή (*rectifier/transformer*)

Οι μονάδες ανορθωτή/μετασχηματιστή (Εικόνα 10) είναι οι πιο οικονομικές και συνήθως οι πιο αξιόπιστες πηγές ρεύματος. Η μονάδα αποτελείται από έναν μετασχηματιστή, για τον έλεγχο του εναλλασσόμενου ρεύματος σε αποδεκτά όρια, και έναν ανορθωτή για τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος (*AC*) σε συνεχές ρεύμα (*DC*). Οι ακροδέκτες εξόδου και μια ολόκληρη σειρά από εξαρτήματα ολοκληρώνουν το κύκλωμα. (HQUSACE, 1999; Von Baeckmann, W. & Kamperman, H., 1997)



Εικόνα 10: Σχηματική απεικόνιση μονοφασικού ανορθωτή γέφυρας. (Πηγή: HQUSACE, 1999)

3.2.1.1 Μετασχηματιστής ισχύος (Transformer)

Ο μετασχηματιστής μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα μεταξύ δύο ή περισσότερων κυκλωμάτων μέσω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει το επίπεδο τάσης ενός τροφοδοτικού AC, ανάλογα με τη σχεδίαση και τη διαμόρφωση περιέλιξης. Ο ρόλος του μετασχηματιστή είναι ο έλεγχος και η εξομάλυνση του εναλλασσόμενου ρεύματος που προσφέρεται από την ηλεκτρική πηγή σε μία τιμή κατάλληλη για την λειτουργία του συστήματος προστασίας του πλοίου. Οι μετασχηματιστές είναι απαραίτητοι για τη ρύθμιση των επιπέδων τάσης, ώστε να ταιριάζουν με τις απαιτήσεις του συστήματος προς το οποίο προορίζονται. Αποτελούνται από πρωτογενή και δευτερογενή πηνία που είναι μαγνητικά συζευγμένα, επιτρέποντας το μετασχηματισμό της τάσης. Στους περισσότερους ανορθωτές καθοδικής προστασίας μέσω επιβαλλόμενου ρεύματος, η τάση εξόδου από τις δευτερεύουσες περιελίξεις περνά μέσα από ένα σύστημα διακοπών. Οι διακόπτες συνήθως είναι δύο, ένας για λεπτές/ακριβείς ρυθμίσεις (*fine adjustments*) και ένας για χονδροειδείς ρυθμίσεις (*coarse adjustments*). Επομένως η απαιτούμενη ρύθμιση της τάσης γίνεται μέσω διακοπών, με σκοπό την μεταβολή της τάσης στον ανορθωτή. (HQUSACE, 1999; Von Baeckmann, W. & Kamperman, H., 1997)

3.2.1.2 *Ανορθωτής (Rectifier)*

Ο ανορθωτής είναι υπεύθυνος για την μετατροπή της τάσης AC που εξάγεται από τον μετασχηματιστή σε τάση DC. Οι ανορθωτές κατασκευάζονται συνήθως από διόδους ή άλλα ημιαγωγικά στοιχεία και λειτουργούν επιτρέποντας τη ροή ρεύματος μόνο προς τη μία κατεύθυνση (ανορθώνοντας το κύμα AC). Λόγω της εναλλασσόμενης φύσης του ημιτονοειδούς κύματος εισόδου AC, με τη συγκεκριμένη διαδικασία παράγεται μόνο ένα ρεύμα (συνεχές ρεύμα), που αν και μονοκατευθυντικό, αποτελείται από παλμούς ρεύματος. Οι διόδοι του ανορθωτή αποτελούνται συνήθως είτε από συστοιχίες πλακών σεληνίου είτε είναι με βάση το πυρίτιο. Οι διόδοι πυριτίου είναι πιο αποδοτικές σε υψηλές τάσεις ρεύματος αλλά παράλληλα είναι πιο επιρρεπείς σε αστοχία λόγω υπερτάσεων. Επίσης οι πιο συνηθισμένες διαμορφώσεις των ανορθωτών είναι του τύπου “single-phase bridge rectifier” (μονοφασικός ανορθωτής γέφυρας) και “three-phase bridge rectifier” (τριφασικός ανορθωτής γέφυρας), που περιγράφονται παρακάτω. Ωστόσο οι ανορθωτές δεν είναι πάντα 100% αποδοτικοί για τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές, οπότε η απόδοση ενός ανορθωτή υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\text{Απόδοση \%} = \frac{V_{out}}{V_{in}} * 100$$

Όπου:

- Το V_{out} παριστάνει την εξερχόμενη συνεχή τάση.
- Το V_{in} παριστάνει την εισερχόμενη εναλλασσόμενη τάση.

Η αποδοτικότητα μιας μονάδας ανορθωτή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του τύπου του ανορθωτή που χρησιμοποιείται, του σχεδιασμού του και των συγκεκριμένων συνθηκών λειτουργίας. Γενικά, οι ανορθωτές διαθέτουν διάφορα επίπεδα αποδοτικότητας, και έχει ιδιαίτερη σημασία να ληφθούν υπόψη αυτοί οι παράγοντες για να προσδιοριστεί η συνολική τους απόδοση.

Οι τυπικές αποδόσεις των ανορθωτών μονοφασικής γέφυρας είναι της τάξης 60% έως 75%, αλλά μπορούν να αυξηθούν με τη χρήση ηλεκτρονικού φίλτρου ή με τη χρήση ανορθωτή τριφασικής γέφυρας. Το φίλτρο μπορεί να αποτελείται από πυκνωτές και πηνία που βοηθούν στην εξομάλυνση των διακυμάνσεων στην εξαγόμενη τάση, με αποτέλεσμα μια σταθερή τάση DC εξόδου. (HQUSACE, 1999)

3.2.1.3 *Διακόπτες και ασφάλειες κυκλώματος (Circuit breaker and Fuses)*

Τα κυκλώματα ανορθωτή/μετασχηματιστή θα πρέπει να περιλαμβάνουν διακόπτες και ασφάλειες, ώστε το κύκλωμα να προστατεύεται από τυχόν υπερτάσεις. Λειτουργούν ως διακόπτης («ON» / «OFF») της μονάδας τροφοδοσίας. Οι διακόπτες κυκλώματος χρησιμοποιούνται πιο συχνά στην είσοδο εναλλασσόμενου ρεύματος στους ανορθωτές και οι ασφάλειες χρησιμοποιούνται συχνότερα στις εξόδους συνεχούς ρεύματος. Εκτός από τους διακόπτες κυκλώματος και τις ασφάλειες, ο ανορθωτής θα πρέπει να είναι εφοδιασμένος με ένα επιπλέον σύστημα/διακόπτη προστασίας τόσο στην είσοδο εναλλασσόμενου ρεύματος όσο και στην έξοδο συνεχούς ρεύματος, προκειμένου να αποτραπεί κάποια πιθανή καταστροφή από κεραυνούς ή άλλες απότομες υπερτάσεις ισχύος. (HQUSACE, 1999)

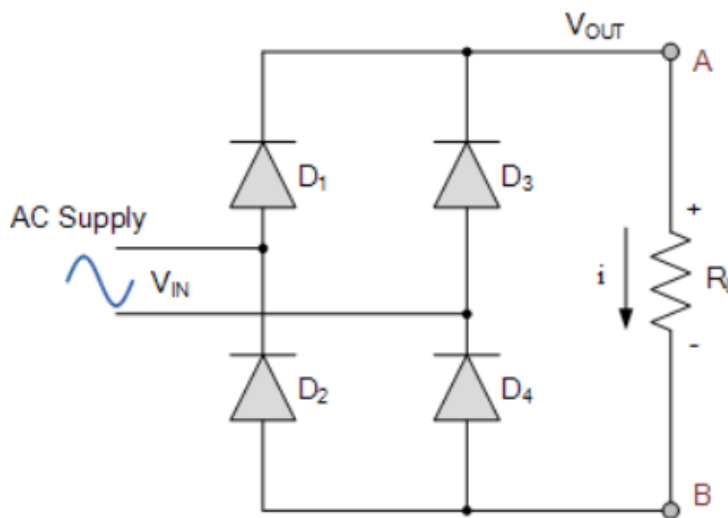
3.2.1.4 Βολτόμετρο και αμπερόμετρο (Voltmeter and Ammeter)

Η μονάδα ανορθωτή/μετασχηματιστή θα πρέπει να διαθέτει όργανα μέτρησης για την ορθή ανάγνωση των τιμών της τάσης και του ρεύματος εξόδου. Τα όργανα μέτρησης δεν πρέπει να λειτουργούν συνεχώς, αλλά θα πρέπει να τίθενται σε λειτουργία στο κύκλωμα όταν απαιτείται, έτσι ώστε να προστατεύονται από ηλεκτρική φθορά/καταστροφή λόγω υπέρτασης (electrical damage). Συνήθως η ένταση του ρεύματος εξόδου μετριέται με την χρήση μιας εξωτερικής διακλάδωσης ρεύματος (*shunt*). Επίσης, τόσο η τάση όσο και το ρεύμα εξόδου μπορούν να μετρηθούν εύκολα με τη χρήση φορητών οργάνων μέτρησης που χρησιμοποιούνται κατά μήκος της εξόδου του ανορθωτή και της διακλάδωσης ρεύματος. Τέλος, οι ενδείξεις των οργάνων μέτρησης του ανορθωτή θα πρέπει να επαληθεύονται περιοδικά με τις ενδείξεις των φορητών οργάνων, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η σωστή λειτουργία του κυκλώματος. (HQUSACE, 1999)

3.2.1.5 Βασικοί τύποι ανορθωτών

3.2.1.5.1 Ανορθωτής τύπου Single-phase bridge rectifier (μονοφασικός ανορθωτής γέφυρας)

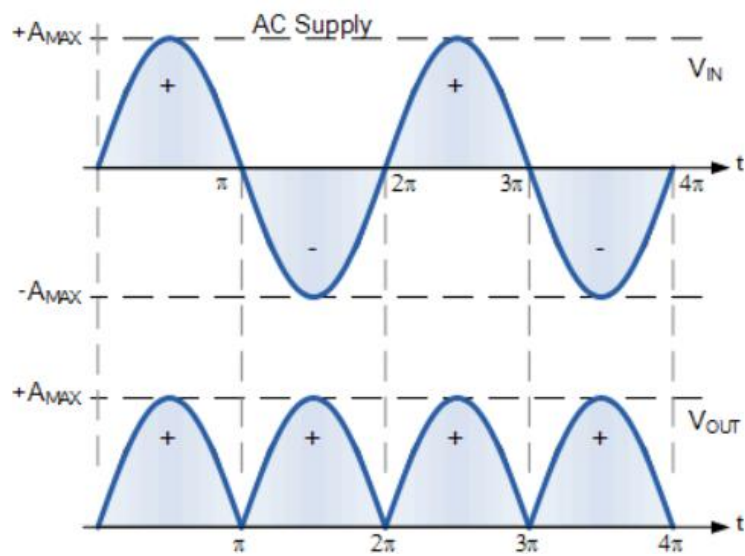
Ένας μονοφασικός ανορθωτής γέφυρας (Εικόνα 11) μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) σε συνεχές ρεύμα (DC) χρησιμοποιώντας ένα κύκλωμα με γέφυρες διόδων (diodes). Είναι μια κοινή και ευρέως χρησιμοποιούμενη τοπολογία ανορθωτή λόγω της απλότητας και της αποτελεσματικότητάς της στη μετατροπή εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές ρεύμα.



Εικόνα 11: Σχηματική απεικόνιση κυκλώματος μονοφασικού ανορθωτή με γέφυρα διόδων. (Πηγή: <https://www.electronics-tutorials.ws/power/single-phase-rectification.html>)

Το συγκεκριμένο κύκλωμα αποτελείται από τέσσερις διόδους διατεταγμένες σε μορφή γέφυρας. Οι διόδοι (diodes) συνδέονται για να σχηματίσουν μια γέφυρα που επιτρέπει στο ρεύμα να ρέει μόνο προς μία κατεύθυνση. Η είσοδος AC εφαρμόζεται σε δύο διαγώνια αντίθετες γωνίες της γέφυρας, ενώ η έξοδος DC λαμβάνεται από τις άλλες δύο γωνίες. Το ρεύμα διέρχεται από το ένα ζεύγος διόδων (ανορθωτικών στοιχείων) ενώ παράλληλα το άλλο ζεύγος εμποδίζει την ροή του ρεύματος στην αντίθετη κατεύθυνση. Επιπλέον, ο

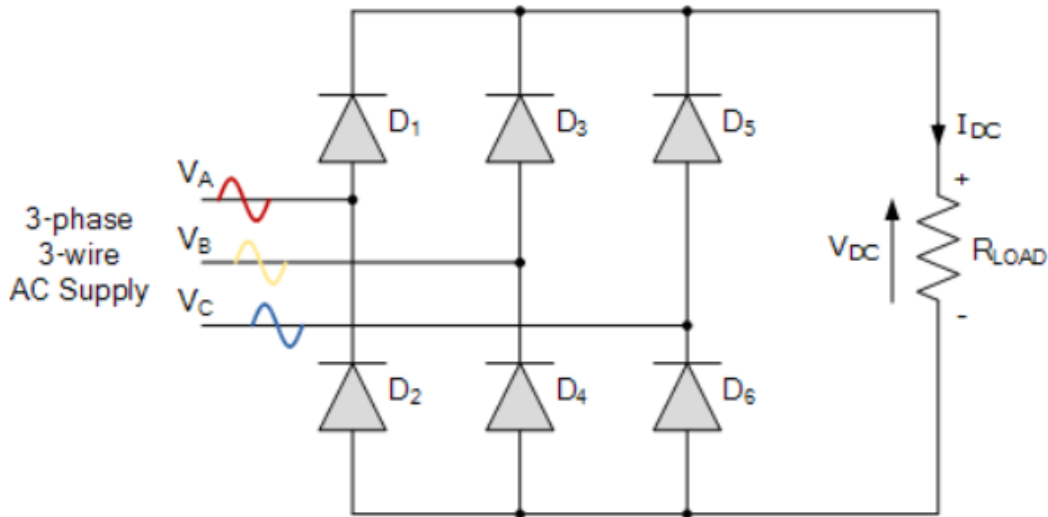
μονοφασικός ανορθωτής γέφυρας συνδέεται με μια μονοφασική πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος AC, η οποία συνήθως διαθέτει δύο εναλλασσόμενα τερματικά τάσης (θετικό και αρνητικό). Για να δημιουργηθεί μια ομαλότερη τάση DC εξόδου, συνήθως προστίθενται πυκνωτές και πηνία στο κύκλωμα. Αυτά τα εξαρτήματα βοηθούν στην εξομάλυνση των παλμών της τάσης AC και σταθεροποιούν την τάση DC. Η έξοδος από την γέφυρα ανορθωτή παρέχει μια παλμική τάση DC. Οι παλμοί έχουν διπλάσια συχνότητα σε σχέση με την εισερχόμενη τάση AC, αλλά οι δίοδοι εξασφαλίζουν ότι το ρεύμα ρέει προς μία κατεύθυνση, και ανορθώνουν αποτελεσματικά την κυματομορφή του AC (Εικόνα 12).(HQUSACE, 1999)



Εικόνα 12: : Σχηματική απεικόνιση ανορθωμένου ρεύματος DC πλήρους κύματος (fullwave). (Πηγή: <https://www.electronics-tutorials.ws/power/single-phase-rectification.html>)

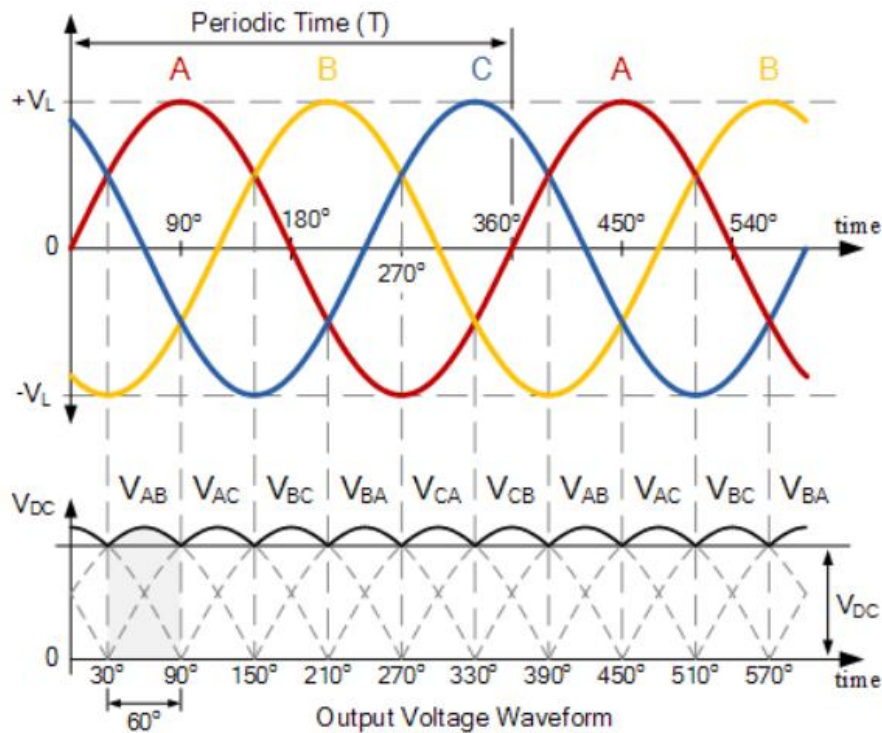
3.2.1.5.2 Ανορθωτής τύπου Three phase bridge rectifier (ανορθωτής τριφασικής γέφυρας).

Ένας τριφασικός ανορθωτής γέφυρας (Εικόνα 13) μετατρέπει το τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) σε συνεχές ρεύμα (DC). Χρησιμοποιεί μια γέφυρα διόδων για να διορθώσει την τριφασική είσοδο AC, παρέχοντας μια πιο ομαλή και συνεχή έξοδο ρεύματος DC.



Εικόνα 13: Σχηματική απεικόνιση τριφασικού ανορθωτή με γέφυρα διόδων. (Πηγή: <https://www.electronicstutorials.ws/power/three-phase-rectification.html>)

Το συγκεκριμένο κύκλωμα αποτελείται από τρία σετ διόδων, που αντιστοιχούν σε κάθε φάση της εισόδου AC και τοποθετούνται σε μια διάταξη γέφυρας. Αυτές οι διόδοι επιτρέπουν τη ροή του ρεύματος μόνο προς τη μία κατεύθυνση και ανορθώνουν το τριφασικό ρεύμα εισόδου AC. Ο ανορθωτής με την τριφασική γέφυρα είναι συνδεδεμένος με μια τριφασική πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος AC, η οποία αποτελείται από τρεις ξεχωριστούς κύκλους AC με γωνιακή διαφορά φάσης 120° μεταξύ των φάσεων. Αυτός ο τύπος τροφοδοσίας AC έχει υψηλή αποδοτικότητα και δυνατότητα να παράγει υψηλά επίπεδα ισχύος. Ο μετασχηματιστής περιέχει τρεις δευτερεύουσες περιελίξεις οι οποίες παρέχουν εναλλασσόμενο ρεύμα σε κάθε ζεύγος διόδων. Η έξοδος του κυκλώματος παρέχει μια παλμική τάση DC. Αντίστοιχα με τον ανορθωτή μονοφασικής γέφυρας, οι διόδοι εξασφαλίζουν ότι το ρεύμα ρέει προς μία κατεύθυνση, ανορθώνοντας αποτελεσματικά την τριφασική κυματομορφή (Εικόνα 14). Για να μειώσουν τους παλμούς και να δημιουργήσουν μια ομαλότερη τάση DC εξόδου, συνήθως προστίθενται πυκνωτές και πηνία στο κύκλωμα. Αυτά τα εξαρτήματα βοηθούν στο φιλτράρισμα των παλμών της τάσης AC και σταθεροποιούν την τάση DC. Οι ανορθωτές τριφασικής γέφυρας είναι κατάλληλοι για υψηλότερα επίπεδα ισχύος σε σύγκριση με τους μονοφασικούς ανορθωτές, καθιστώντας τους κατάλληλους για εφαρμογές που απαιτούν τη μετατροπή ισχύος AC μεγάλου μεγέθους σε DC. Σημειώνεται ότι το αρχικό υψηλό κόστος των τριφασικών μονάδων δικαιολογείται από την εξοικονόμηση ενέργειας που παρέχουν, ειδικά σε εγκαταστάσεις που χρειάζονται μονάδες ισχύος άνω των 1000 W. (HQUSACE, 1999)



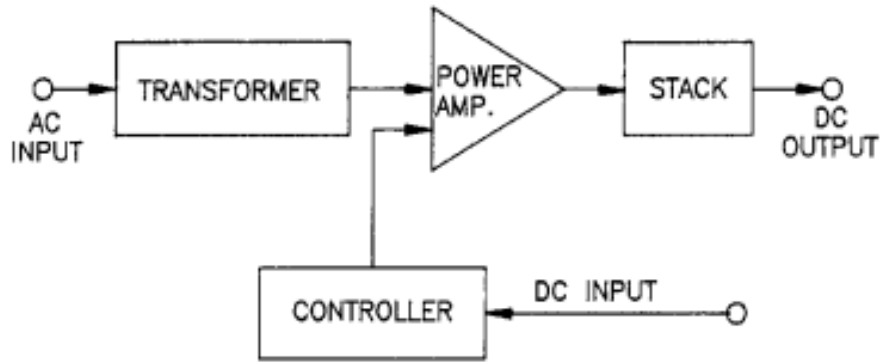
Εικόνα 14: Σχηματική απεικόνιση ανορθωμένου ρεύματος DC τριφασικού ανορθωτή με γέφυρα διόδων.
(Πηγή: <https://www.electronics-tutorials.ws/power/three-phase-rectification.html>)

3.2.1.6 Ειδικοί τύποι ανορθωτών

Για την καθοδική προστασία ειδικών εφαρμογών έχουν αναπτυχθεί ειδικά σχεδιασμένοι τύποι ανορθωτών, όπως είναι οι παρακάτω:

3.2.1.6.1 Ανορθωτής σταθερού ρεύματος.

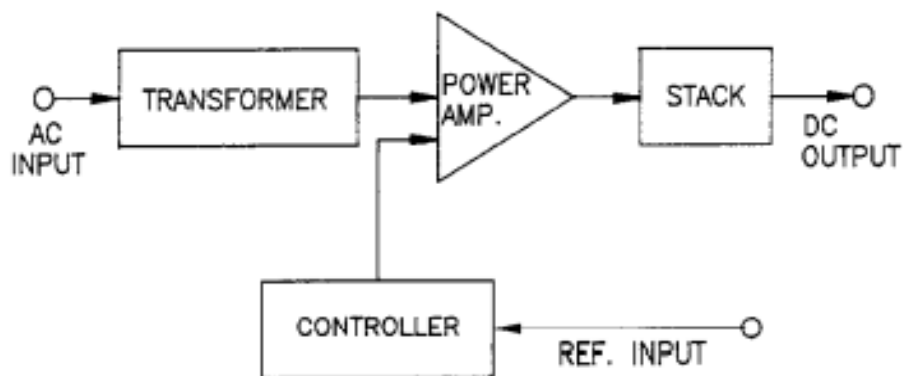
Ο ανορθωτής σταθερού ρεύματος είναι μια συσκευή που σχεδιάζεται να παρέχει σταθερό ρεύμα εξόδου ανεξάρτητα από τις αλλαγές στις συνθήκες λειτουργίας. Για την λειτουργία ενός ανορθωτή σταθερού ρεύματος (Εικόνα 15) χρειάζεται ένας ενισχυτής ρεύματος (power amplifier), ο οποίος παρέχει σταθερό ρεύμα εισόδου στο ανορθωτικό στοιχείο του κυκλώματος, έτσι ώστε να εξέρχεται σταθερό συνεχές ρεύμα από αυτό. Για την ρύθμιση του ενισχυτή χρησιμοποιείται ένα "feed back" (μηχανισμός ανάδρασης) από μια εξωτερική αντίσταση στην έξοδο του κυκλώματος. Ουσιαστικά, η ανάδραση δημιουργεί έναν κλειστό βρόχο ελέγχου που παρακολουθεί το ρεύμα εξόδου. Όταν το ρεύμα αλλάζει λόγω διαφόρων παραγόντων, ο ενισχυτής αντιδρά και προσαρμόζει την έξοδο του, έτσι ώστε το ρεύμα να παραμένει σταθερό. (HQUSACE, 1999)



Εικόνα 15: Τρόπος λειτουργίας του ανορθωτή σταθερού ρεύματος. (Πηγή: HQUSACE,,1999)

3.2.1.6.2 Ανορθωτής με αυτόματο έλεγχο δυναμικού.

Ο ανορθωτής με αυτόματο έλεγχο δυναμικού αποτελεί ένα είδος ανορθωτή, που διαθέτει ενσωματωμένο μηχανισμό ελέγχου για το δυναμικό ή την τάση εξόδου του κυκλώματος. Αυτός ο μηχανισμός ελέγχου επιτρέπει στον ανορθωτή να προσαρμόζει το επίπεδο της τάσης εξόδου, ώστε να διατηρείται σε σταθερά επίπεδα, ανεξάρτητα από τυχόν μεταβολές στις συνθήκες λειτουργίας. Για την λειτουργία αυτού του τύπου ανορθωτή (Εικόνα 16) εφαρμόζεται ένα δυναμικό μεταξύ της προστατευόμενης δομής και ενός ηλεκτροδίου αναφοράς, έτσι ώστε να ρυθμίζεται το ρεύμα εισόδου μέσω ενός ενισχυτή και στην συνέχεια να εξάγεται το απαιτούμενο ρεύμα προστασίας στην κατασκευή. Αυτού του τύπου ειδικοί ανορθωτές προτιμώνται σε εφαρμογές, όπου το απαιτούμενο ρεύμα προστασίας και η ειδική αντίσταση του ηλεκτρολύτη (π.χ. θαλασσινό νερό) μεταβάλλονται με τον χρόνο. Για την καθοδική προστασία των πλοίων χρησιμοποιούνται κυρίως οι μονάδες ανορθωτή/μετασχηματιστή με αυτόματο έλεγχο δυναμικού, για τη διατήρηση της πόλωσης της κατασκευής, επειδή οι συνθήκες περιβάλλοντος και οι συνθήκες επίστρωσης συχνά μεταβάλλονται. (HQUSACE, 1999)

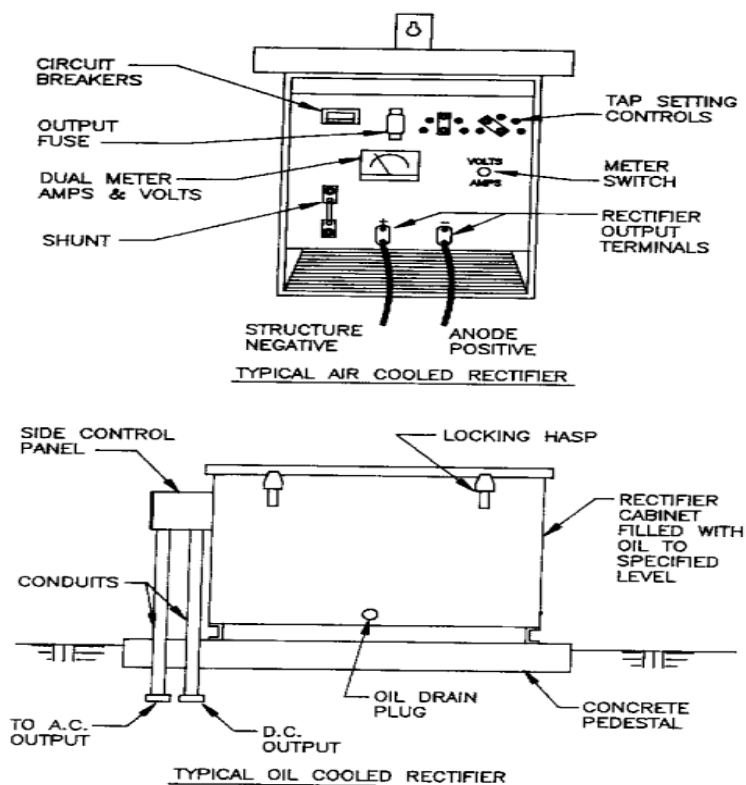


Εικόνα 16: Τρόπος λειτουργίας του ανορθωτή με αυτόματο έλεγχο δυναμικού. (Πηγή: HQUSACE,,1999)

3.2.1.6.3 Ανορθωτής με ψύξη αέρα και ανορθωτής με ψύξη λαδιού.

Οι ανορθωτές μπορούν να χρησιμοποιούν διάφορα μέσα ψύξης για να διατηρήσουν την θερμοκρασία τους σταθερή κατά τη λειτουργία τους. Δύο κοινοί τύποι ψύξης που χρησιμοποιούνται είναι η ψύξη με αέρα και η ψύξη με λάδι (Εικόνα 17). Στην ψύξη με αέρα, ο ανορθωτής χρησιμοποιεί αέρα για να απομακρύνει τη θερμότητα που παράγεται κατά τη λειτουργία του. Συνήθως, υπάρχουν ανεμιστήρες, ώστε με την κυκλοφορία του αέρα να επιταχύνουν τη διαδικασία ψύξης. Αυτός ο τύπος ψύξης είναι συνηθισμένος σε ανορθωτές μικρού και μεσαίου μεγέθους. Στην ψύξη με λάδι, ο ανορθωτής βυθίζεται σε ένα ψυγείο γεμάτο με λάδι, το οποίο απορροφά και διαχέει τη θερμότητα. Το λάδι είναι αποτελεσματικό στη μεταφορά της θερμότητας και προσφέρει καλή ψύξη ακόμη και για μεγάλες τιμές ισχύος ρεύματος. Αυτός ο τύπος ψύξης είναι συνηθισμένος σε μεγαλύτερους ανορθωτές ή σε εφαρμογές όπου η απομάκρυνση της θερμότητας είναι κρίσιμης σημασίας.

Τα πλεονεκτήματα των μονάδων με ψύξη αέρα είναι το χαμηλό κόστος, το μικρό μέγεθος που διαθέτουν, η εύκολη εγκατάσταση και η εύκολη επισκευή τους, ενώ τα μειονεκτήματά τους είναι η απαιτούμενη συχνή συντήρηση των φίλτρων αέρα και οι φθορές τους που προκαλούνται από έντομα και παράσιτα. Οι μονάδες με ψύξη λαδιού είναι συνήθως πιο κατάλληλες σε εξωτερικές εγκαταστάσεις, όπου επικρατούν δυσμενείς καιρικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα σε θερμά κλίματα και σε συνθήκες όπου ενδέχεται να υπάρχουν εκρηκτικά αέρια. Η επιλογή ανάμεσα σε αέρα και λάδι ως μέσων ψύξης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους του ανορθωτή, των απαιτήσεων ψύξης, και των συνθηκών λειτουργίας. (HQUSACE, 1999)



Εικόνα 17: Σχηματική απεικόνιση ανορθωτή με ψύξη αέρα και ανορθωτή με ψύξη λαδιού. (Πηγή: HQUSACE,1999)

3.2.1.6.4 Αντιεκρηκτικά συστήματα ανορθωτών.

Για εφαρμογές αποθήκευσης ή μεταφοράς καυσίμου και φυσικού αερίου έχουν αναπτυχθεί ειδικά αντιεκρηκτικά περιβλήματα ανορθωτών και άλλων εξαρτημάτων, όπως διακόπτες κυκλώματος, ώστε να υπάρχει συμμόρφωση με τα πρότυπα ηλεκτρικής ασφάλειας για επικίνδυνες συνθήκες. (HQUSACE, 1999)

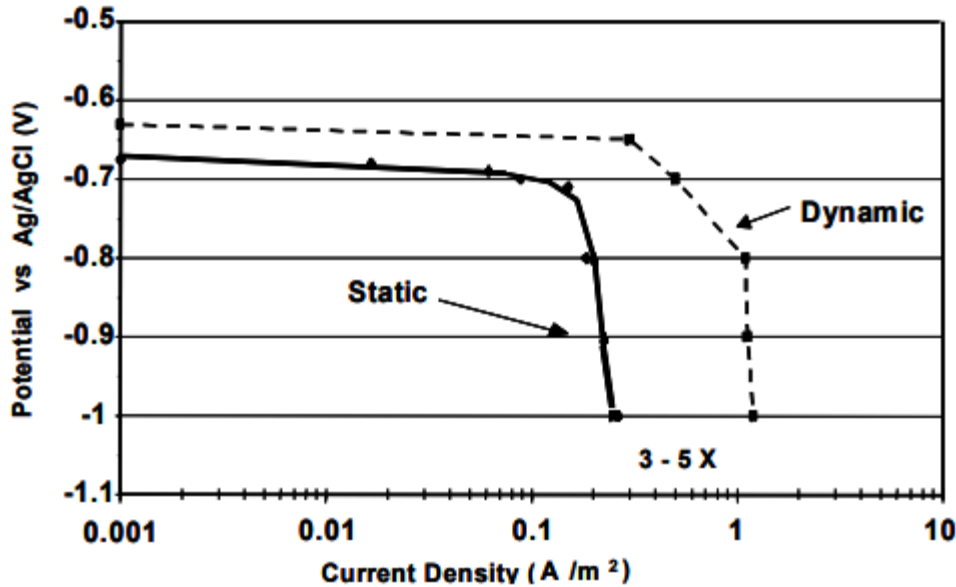
Οι αντιεκρηκτικοί ανορθωτές κατασκευάζονται με ειδικά υλικά και με κατάλληλο σχεδιασμό, καθώς προορίζονται να λειτουργούν σε περιβάλλοντα με υψηλό κίνδυνο εκρήξεων και πρέπει να παρέχουν τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας για την προστασία του περιβάλλοντος και των εργαζομένων. Οι περισσότεροι από αυτούς έχουν περιβλήματα που προστατεύουν τους ευαίσθητους μηχανισμούς από το περιβάλλον. Οι αντιεκρηκτικοί ανορθωτές διαθέτουν σύστημα σφράγισης και συνδέσεις που εμποδίζουν τη διαρροή εύφλεκτων ουσιών. Τα κυκλώματα ελέγχου σχεδιάζονται έτσι ώστε να μειώνεται ο κίνδυνος πυρκαγιάς και εκρήξεων. Επιπλέον, συχνά τοποθετούνται αισθητήρες που ανιχνεύουν την παρουσία εύφλεκτων αερίων. Οι ανορθωτές αυτού του τύπου κατασκευάζονται για να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες που μπορεί να προκληθούν από μια εκρηκτική ατμόσφαιρα. Η σχεδίαση τους εξασφαλίζει την αποτελεσματική κυκλοφορία του αέρα για ψύξη χωρίς να δημιουργείται κίνδυνος.

3.2.2 Παροχή ρεύματος και σύστημα ελέγχου

Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι προτιμότερο ένα πλοίο να διαθέτει δύο ή περισσότερες πηγές ρεύματος, που να περιλαμβάνουν ένα ξεχωριστό σετ ανοδίων η καθεμία. Με σκοπό την επιτυχή καθοδική προστασία θα πρέπει να γίνεται έλεγχος του παρεχόμενου ρεύματος, διότι το απαιτούμενο δυναμικό πόλωσης της γάστρας μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας της. Πιο συγκεκριμένα, εκτός από την σταδιακή φθορά της επίστρωσης της γάστρας, η μεταβολή του απαιτούμενου ρεύματος προστασίας μπορεί να οφείλεται σε αλλαγή των συνθηκών του περιβάλλοντος, της δομής του πλοίου και των συνθηκών πλεύσης. Κάποιοι συνήθεις λόγοι που προκαλούν την ανάγκη μεταβολής του ρεύματος προστασίας περιγράφονται παρακάτω (British Standard, 1991):

1) Αλλαγή της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας. Η βρεχόμενη επιφάνεια του πλοίου αλλάζει ανάλογα με την κατάσταση φόρτωσης, όπως για παράδειγμα συμβαίνει όταν οι δεξαμενές φορτίου βρίσκονται σε πλήρη φόρτωση, οπότε το απαιτούμενο ρεύμα μπορεί να χρειάζεται να αυξηθεί έως και 50% σε σύγκριση με την κατάσταση κατά την οποία το πλοίο πλέει μόνο με έρμα.

2) Αλλαγή της ταχύτητας του πλοίου. Η απαιτούμενη ποσότητα ρεύματος αυξάνεται όταν το πλοίο πλέει με μεγάλη ταχύτητα σε σύγκριση με την περίπτωση, όπου το πλοίο παραμένει ακίνητο. Σε αυτή την περίπτωση, η ποσότητα του ρεύματος εξαρτάται αποκλειστικά από την κατάσταση επίστρωσης της γάστρας. Έτσι, στην περίπτωση που η επίστρωση βρίσκεται σε άριστη κατάσταση, η απαιτούμενη ποσότητα ρεύματος είναι μικρή, ενώ αντίθετα στην περίπτωση ελαττωματικής επίστρωσης, η απαιτούμενη ποσότητα ρεύματος μπορεί να αυξηθεί έως και τρεις φορές περισσότερο (Εικόνα 18).



Εικόνα 18: Απαιτήσεις πυκνότητας ρεύματος του χάλυβα ως συνάρτηση της ροής του θαλασσινού νερού. (DeGiorgi V.G., et al 2005)

3) Αλλαγή στην σύσταση του νερού. Η θερμοκρασία και η αλατότητα του νερού επηρεάζουν σημαντικά την τιμή του απαιτούμενου ρεύματος προστασίας. Πιο συγκεκριμένα, με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται και η τιμή του απαιτούμενου ρεύματος. Έτσι, ένα πλοίο που πλέει σε τροπικά ύδατα θα χρειαστεί 20% έως 25% περισσότερο ρεύμα σε σύγκριση με εκείνο που πλέει σε ψυχρά ύδατα. Αντίθετα όταν η αλατότητα του νερού μειώνεται, η αγωγιμότητα του νερού επίσης μειώνεται. Η αγωγιμότητα είναι η ικανότητα του νερού να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Με τη μείωση αυτής της ικανότητας, το ρεύμα αντιμετωπίζει αυξημένη αντίσταση και συνεπώς, αυξάνεται η τάση του ρεύματος που απαιτείται για να διατηρηθεί η προστασία περιοχών της επιφάνειας μακριά από τις ανόδους.

4) Διαταραχή στο εξωτερικό περίβλημα της γάστρας. Οι υποβρύχιες εργασίες που γίνονται για τον καθαρισμό της γάστρας από τη βιοσυσσώρευση, μπορεί να διπλασιάσουν την ανάγκη για αυξημένο ρεύμα προστασίας για όσο χρονικό διάστημα χρειαστεί, μέχρις ότου ολοκληρωθεί ο καθαρισμός και να αποκατασταθεί το δυναμικό.

3.2.3 Εξοπλισμός παρακολούθησης και ελέγχου

Η μονάδα ανορθωτή/μετασχηματιστή που παρέχει το ρεύμα προστασίας στις ανόδους, θα πρέπει να είναι εξοπλισμένη με εξοπλισμό παρακολούθησης και ελέγχου. Το σύστημα αυτό κατ' ελάχιστον περιλαμβάνει τα εξής (ABS, 2017):

- 1) Ένα βολτόμετρο και ένα αμπερόμετρο για τον έλεγχο της τάσης και της τιμής του συνεχούς ρεύματος εξόδου.
- 2) Μια συσκευή που επιτρέπει τη μέτρηση του ηλεκτρικού ρεύματος εξόδου σε κάθε άνοδο.
- 3) Συσκευές προστασίας από υπερτάσεις και βραχυκυκλώματα. Θα πρέπει να παρέχεται η δυνατότητα μείωσης του ρεύματος εξόδου και ελέγχου της τάσης ανόδου σε μια μέγιστη τιμή.

- 4) Σε περίπτωση φθοράς ενός καλωδίου ή βραχυκυκλώματος στα ηλεκτρόδια αναφοράς, το ρεύμα προστασίας θα πρέπει να απενεργοποιείται αυτόματα ή να ρυθμίζεται στο μηδέν όταν βρίσκεται σε αυτόματη λειτουργία. Θα πρέπει να υπάρχει μια διάταξη ασφαλείας για τη ρύθμιση του απαιτούμενου δυναμικού.
- 5) Ο εξοπλισμός θα πρέπει να είναι σχεδιασμένος έτσι, ώστε να απενεργοποιείται χειροκίνητα εάν χρειαστεί.
- 6) Ένας διακόπτης που επιτρέπει είτε αυτόματη είτε χειροκίνητη λειτουργία.
- 7) Ένα σύστημα παρακολούθησης που επιτρέπει τη μέτρηση των δυναμικών με καθένα από τα ηλεκτρόδια αναφοράς ξεχωριστά, την επιλογή των ηλεκτροδίων αναφοράς/ελέγχου και τον έλεγχο του δυναμικού μεταξύ ηλεκτρολύτη και κατασκευής για κάθε ξεχωριστή πλευρά του πλοίου, ώστε να αποφεύγονται οι υπερβολικές διακυμάνσεις του ρεύματος προστασίας. Η ποσότητα ρεύματος είναι συνάρτηση της κατάστασης της επίστρωσης της γάστρας, της ειδικής αντίστασης του νερού, της ταχύτητας του πλοίου και της κατάστασης της αποβάθρας (είτε το πλοίο είναι μονωμένο είτε σε ηλεκτρική επαφή με άλλες μεταλλικές κατασκευές ή πλοία).
- 8) Σύστημα ελέγχου της ρυθμιζόμενης τάσης με μεγάλη ακρίβεια για τα ηλεκτρόδια αναφοράς (τιμή στόχος) ώστε να είναι εντός των ορίων των ± 10 mV κατά την αυτόματη λειτουργία.
- 9) Μια ένδειξη προειδοποίησης όταν μία από αυτές τις παραμέτρους είναι εκτός ορίων και έχει παρουσιαστεί δυσλειτουργία του συστήματος.

3.3 Άνοδοι επιβαλλόμενου ρεύματος

Οι άνοδοι για ένα σύστημα προστασίας μέσω επιβαλλόμενου ρεύματος έχουν σχεδιαστεί ώστε να είναι ανθεκτικές στη διάβρωση και να χρησιμεύουν μόνο ως πηγή ηλεκτρονίων στην προστατευόμενη δομή, χωρίς να αλλοιώνονται κατά την παροχή του ρεύματος προστασίας. Επομένως, οι άνοδοι δεν χρειάζονται συχνή αντικατάσταση, διότι δεν καταναλώνονται σύμφωνα με τον νόμο του Faraday αλλά υφίστανται μόνο μια μικρή απώλεια υλικού, η οποία θεωρείται αμελητέα. Ωστόσο, οι άνοδοι αυτού του τύπου πρέπει είναι και χημικά ανθεκτικές στα προϊόντα που παράγονται κατά τη χρήση τους ώστε να παραμένουν πραγματικά αμετάβλητες. Γενικά, οι επιθυμητές ιδιότητες που πρέπει να διαθέτουν είναι οι εξής (Bohnes, H. & Funk, D., 1997; Basham, D. L., et al, 2003):

- 1) Καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα.
- 2) Χαμηλό ρυθμό απώλειας βάρους.
- 3) Καλές μηχανικές ιδιότητες, ώστε να αντέχουν στις καταπονήσεις κατά την εγκατάσταση και την λειτουργία του συστήματος.
- 4) Υψηλή αντοχή στις μεγάλες πυκνότητες ρεύματος που επιβάλλονται στην επιφάνειά τους.
- 5) Εύκολη κατασκευή και διάθεση σε μεγάλη ποικιλία σχημάτων.
- 6) Χαμηλό κόστος κατασκευής.

Για την καθοδική προστασία της γάστρας χρησιμοποιείται συνήθως ένα σετ ανοδίων, το οποίο αποτελείται από δύο ανόδους ίδιου τύπου τοποθετημένες σε αντίθετες πλευρές (αριστερή και δεξιά πλευρά) του πλοίου στον ίδιο αριθμό πλαισίου και στην ίδια απόσταση από την βασική γραμμή. Συγκεκριμένα τοποθετούνται τουλάχιστον 1.5 m κάτω από την γραμμή ισάλου του πλοίου, που είναι η περιοχή με τις λιγότερες αναταράξεις, ώστε να προστατεύονται από μηχανικές βλάβες. (ABS, 2017)

Επιπλέον ο αριθμός, οι διαστάσεις και η θέση των ανοδίων καθορίζονται κατάλληλα, προκειμένου να είναι εφικτή η παροχή του μέγιστου απαιτούμενου ρεύματος προστασίας (I_{max}) δηλαδή του μέγιστου ρεύματος που κατανέμεται από την μονάδα ανορθωτή/μετασχηματιστή με την οποία συνδέονται οι άνοδοι για την επίτευξη του απαιτούμενου δυναμικού ολόκληρης της περιοχής που προστατεύεται καθοδικά από αυτό το σύστημα.

Οι άνοδοι θα πρέπει να είναι από αδρανές υλικό και να σχεδιάζονται για μεγάλη διάρκεια ζωής, κι επίσης θα πρέπει να μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα εάν χρειαστεί. Συνήθως κατασκευάζονται από τιτάνιο, νιόβιο ή ταντάλιο με ένα λεπτό στρώμα λευκόχρυσου (πλατίνας) και από μικτά οξειδία μετάλλων. Επίσης μπορούν να κατασκευάζονται από κράματα μολύβδου/αργύρου, υπό την προϋπόθεση ότι η πυκνότητα ρεύματος ανόδου είναι επαρκής, ώστε να διατηρείται το αγωγίμο στρώμα διοξειδίου του μολύβδου. Γενικότερα για καθοδική προστασία με επιβαλλόμενο ρεύμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν άνοδοι κατασκευασμένες από τα εξής υλικά (Bohnes, H. & Funk, D., 1997; Basham, D. L., et al, 2003):

- Άνοδοι από χυτοσίδηρο
- Άνοδοι από γραφίτη

- Άνοδοι από μαγνητίτη
- Άνοδοι από χυτοσίδηρο υψηλής περιεκτικότητας σε πυρίτιο
- Άνοδοι από κράμα μολύβδου-αργύρου
- Άνοδοι με επένδυση λευκόχρυσου
- Άνοδοι από μικτά οξειδία μετάλλων

3.3.1 Άνοδοι από χυτοσίδηρο (*Cast iron anodes*)

Οι άνοδοι από χυτοσίδηρο χρησιμοποιούνται ελάχιστα στην σημερινή εποχή και επιλέγονται κυρίως για προσωρινή προστασία ή για οικονομικούς λόγους. Για μακροχρόνια προστασία πολύπλοκων κατασκευών, όπως είναι η περίπτωση ενός πλοίου βυθισμένου στο θαλασσινό νερό δεν συνίσταται η χρήση του χυτοσίδηρου ως υλικό ανόδου, καθώς η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος που παρέχει είναι 5 A/m^2 ενώ ο ρυθμός κατανάλωσης του υλικού είναι της τάξης 9000 g/A ανά έτος. Η δυσκολία της σύνδεσης του καλωδίου με την άνοδο αποτελεί ένα ακόμα μειονέκτημα της χρήσης ανόδων αυτού του τύπου.

3.3.2 Άνοδοι από γραφίτη (*Graphite anodes*)

Ο γραφίτης χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια ως υλικό ανόδου. Είναι ένα σχετικά φθινό και ελαφρύ υλικό με πυκνότητα περίπου 2 g/cm^3 , ωστόσο χρειάζεται προσεκτικό χειρισμό κατά την μεταφορά, την αποθήκευση και την εγκατάσταση διότι είναι μηχανικά ευαίσθητος. Αυτού του τύπου οι άνοδοι μπορούν να παρέχουν πυκνότητα ρεύματος από 2.5 A/m^2 έως 10 A/m^2 ανάλογα με την αλατότητα του νερού και έχουν ρυθμό κατανάλωσης περίπου 500 g/A ανά έτος. Επίσης ο γραφίτης είθισται να εμποτίζεται με κερί ή ρητίνη ώστε να μειώνεται ο κίνδυνος για ξεφλούδισμα και αποσύνθεση της ανόδου καθώς αυτή καταναλώνεται. Οι βασικές διαμορφώσεις των συγκεκριμένων ανόδων είναι συνήθως κυλινδρικές ή ράβδοι τετραγωνικής διατομής.

3.3.3 Άνοδοι από μαγνητίτη (*Magnetite anodes*)

Ο μαγνητίτης Fe_3O_4 είναι ένα φυσικό ορυκτό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως άνοδος σε σύστημα προστασίας με χρήση επιβαλλόμενου ρεύματος. Συνήθως από μαγνητίτη παράγονται συμπαγείς κυλινδρικές άνοδοι λόγω της δυσκολίας χύτευσης του υλικού. Ο ρυθμός κατανάλωσης είναι της τάξης 1.5 έως 2.5 g/A ανά έτος, ενώ η παρεχόμενη πυκνότητα ρεύματος κυμαίνεται από 90 έως 100 A/m^2 . Τα πλεονεκτήματα της χρήσης ανόδων Fe_3O_4 είναι το χαμηλό τους βάρος, η αντοχή στις υψηλές τιμές δυναμικού, ενώ τα κυριότερα μειονεκτήματα είναι η ευθραυστότητα, η δυσκολία στην χύτευση και η υψηλή ηλεκτρική αντίσταση του υλικού.

3.3.4 Άνοδοι από χυτοσίδηρο υψηλής περιεκτικότητας σε πυρίτιο (*High-silicon cast iron anodes*)

Ο χυτοσίδηρος με υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο έχει βρεθεί ότι είναι κατάλληλος για χρήση ως υλικό ανόδου. Πρόκειται για ένα κράμα σιδήρου που περιέχει 14% πυρίτιο (*Si*) και 1% άνθρακα (*C*), με την πυκνότητα του να είναι περίπου 7 g/cm^3 . Πιο συγκεκριμένα για εφαρμογές στο θαλασσινό νερό το κράμα αυτό περιέχει επίσης περίπου 5% χρώμιο (*Cr*), 1% μαγγάνιο (*Mn*) και 3% μολυβδαίνιο (*Mo*), έτσι ώστε να αποκτήσει μεγαλύτερη σταθερότητα. Μπορεί να κατασκευάζεται σε μεγάλη ποικιλία σχημάτων, διαστάσεων και βαρών. Συνήθως λειτουργεί σε πυκνότητες ρεύματος από 30 A/m^2 έως 50 A/m^2 με τον ρυθμό κατανάλωσης να κυμαίνεται από 250 g/A έως 1000 g/A ανά έτος.

3.3.5 Άνοδοι από κράμα μολύβδου-αργύρου (*Lead alloy-silver anodes*)

Άνοδοι από κράμα μολύβδου-αργύρου (*Pb-Ag*) έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως σε εφαρμογές στο θαλασσινό νερό, και γενικά σε ηλεκτρολύτες που περιέχουν ιόντα χλωρίου (*Cl*). Είναι κατάλληλες για χρήση σε πλοία λόγω της αντοχής τους σε μηχανικές καταπονήσεις. Σε αυτή την περίπτωση η φθορά της ανόδου αποτρέπεται διότι στην επιφάνεια της δημιουργείται ένα λεπτό στρώμα διοξειδίου του μολύβδου (*PbO₂*), ενώ η απόδοση της μπορεί να μειωθεί αρκετά σε βαθιά νερά ή σε νερά με χαμηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο. Έχουν αναπτυχθεί τρία κύρια είδη κραμάτων αυτού του τύπου: το πρώτο αποτελείται από 1% Ag, 6% αντιμόνιο (*Sb*) και το υπόλοιπο Pb, το δεύτερο αποτελείται από 2% Ag και το υπόλοιπο από Pb ενώ το τρίτο αποτελείται από 1% Ag, 5% Sb, 1% κασσίτερο (*Sn*) και το υπόλοιπο από Pb. Το εύρος πυκνοτήτων ρεύματος στο οποίο λειτουργούν τα ανόδια αυτού του είδους κυμαίνεται από 250 A/m² έως 300 A/m² και η ετήσια κατανάλωση υλικού είναι μεταξύ 25 g/A έως 100 g/A ανά έτος. Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου ανόδων είναι η εύκολη μορφοποίηση τους, ενώ ως μειονεκτήματα αναφέρονται ο περιορισμός στη χρήση τους μόνο σε ηλεκτρολύτες με υψηλή συγκέντρωση χλωρίου, η υψηλή πυκνότητά τους (περίπου 11 g/cm³) και η σχετικά χαμηλή πυκνότητα ρεύματος που παρέχουν σε σύγκριση με τις τιμές που απαιτούνται για την προστασία της γάστρας ενός πλοίου. Οι άνοδοι με επένδυση πλατίνας και από μικτά οξειδία μετάλλων έχουν αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τις ανόδους από κράμα μολύβδου-αργύρου.

3.3.6 Άνοδοι με επένδυση λευκόχρυσου (*Platinized anodes*)

Ο λευκόχρυσος ή πλατίνα (*Pt*) μπορεί να θεωρηθεί ως το ιδανικό υλικό κατασκευής ανόδου, καθώς διαθέτει υψηλή αγωγιμότητα και χαμηλό ρυθμό κατανάλωσης, ωστόσο η υψηλή του πυκνότητα (21.3 g/cm³) και κυρίως η εξαιρετικά υψηλή τιμή αγοράς του τον καθιστά ανοικονομικό για αυτή τη χρήση. Για τους παραπάνω λόγους χρησιμοποιούνται ως άνοδοι ευγενή μέταλλα, όπως το τιτάνιο (*Ti*), το νιόβιο (*Nb*) ή το ταντάλιο (*Ta*), των οποίων οι επιφάνειες επικαλύπτονται με μια λεπτή επίστρωση λευκόχρυσου. Με τον τρόπο αυτό αναπτύσσεται στις επιφάνειες των ευγενών αυτών μετάλλων (*Ti*, *Nb* ή *Ta*) ένα αδρανές, μη αγωγίμο επιφανειακό λεπτό στρώμα οξειδίου (*TiO₂*, *NbO₂* ή *TaO₂*) υψηλής ηλεκτρικής αντίστασης, έτσι ώστε τα μέταλλα αυτά (το τιτάνιο, το νιόβιο και το ταντάλιο) να λειτουργούν ως ένα αδρανές υπόστρωμα για τον λευκόχρυσο, το οποίο μπορεί να αντέξει μια εξαιρετικά υψηλή πυκνότητα ρεύματος.

Οι άνοδοι αυτές μπορούν να λειτουργήσουν σε πυκνότητες ρεύματος μεταξύ 500 A/m² έως 3000 A/m², ενώ παράλληλα διαθέτουν εξαιρετικά χαμηλό ρυθμό κατανάλωσης της τάξης 0.004 g/A έως 0.012 g/A ανά έτος. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στο στρώμα του λευκόχρυσου, καθώς έχει παρατηρηθεί ότι ο ρυθμός κατανάλωσης της μπορεί να επιταχυνθεί σε διακυμάνσεις του εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) και συγκεκριμένα έχει παρατηρηθεί μεγαλύτερος ρυθμός κατανάλωσης σε συχνότητες AC μικρότερες των 50 Hz. Αντίθετα η διάρκεια ζωής αυτών των ανόδων μπορεί να διπλασιαστεί με την χρήση τριφασικού ανορθωτή/μετασχηματιστή γέφυρας πλήρους κύματος, καθώς μειώνεται η κυματομορφή στην έξοδο συνεχούς ρεύματος (DC). Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί ότι η διάρκεια ζωής της επένδυσης λευκόχρυσου επηρεάζεται εξίσου από την ειδική αντίσταση του ηλεκτρολύτη, τη ρύπανση, τα άλατα και την παρουσία ορισμένων οργανικών υλικών.

Το τιτάνιο με επένδυση λευκόχρυσου είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη άνοδος αυτού του τύπου, καθώς πρόκειται για ελαφρύ υλικό με πυκνότητα 4.5 g/cm^3 . Ωστόσο το οξείδιο τιτανίου (TiO_2) διασπάται πιο εύκολα σε υψηλά δυναμικά σε σύγκριση με το οξείδιο νιοβίου (NbO_2) και το οξείδιο τανταλίου (TaO_2). Η μέγιστη συνιστώμενη τάση λειτουργίας των ανόδων τιτανίου με επένδυση λευκόχρυσου είναι 8 V, καθώς κατά την παρουσία ιόντων χλωρίου (Cl^-) το επιφανειακό στρώμα TiO_2 διασπάται σε δυναμικά 9 έως 9.5 V. Επομένως σε συστήματα καθοδικής προστασίας που απαιτούν υψηλότερες τάσεις λειτουργίας θα πρέπει να επιλέγονται άνοδοι με βάση το νιόβιο ή το ταντάλιο. Από την μία το νιόβιο έχει πυκνότητα 8.4 g/cm^3 και από την άλλη το ταντάλιο είναι αρκετά πιο βαρύ με πυκνότητα 16.6 g/cm^3 , ενώ τα επιφανειακά στρώματα που σχηματίζουν NbO_2 και TaO_2 διασπώνται σε δυναμικά 50 V και 100 V αντίστοιχα. Επίσης, άλλο ένα προτέρημα των ανόδων με βάση το Nb και το Ta είναι η σχεδόν τριπλάσια αγωγιμότητα που διαθέτουν σε σχέση με άλλα υλικά.

Τέλος, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην σύνδεση της ανόδου με τα καλώδια, διότι ακατάλληλες συνδέσεις μπορούν να οδηγήσουν σε πρόωρη αστοχία. Επιπλέον, θα πρέπει να διασφαλίζεται ότι οι άνοδοι είναι κατασκευασμένες από εξειδικευμένο προσωπικό σύμφωνα με τις προδιαγραφές και την εφαρμογή των πρότυπων μεθόδων ποιοτικού ελέγχου.

3.3.7 Άνοδοι από μικτά οξείδια μετάλλων (*Mixed metal oxides anodes, MMO*)

Οι άνοδοι από μικτά οξείδια μετάλλων είναι η πιο πρόσφατη τεχνολογία σε υλικό ανόδου και αποτελούνται συνήθως από ένα υπόστρωμα τιτανίου (Ti) και αγώγιμα οξείδια μετάλλων. Τα αγώγιμα οξείδια μπορεί να είναι ένα μείγμα οξειδίων ή ένα στερεό διάλυμα που αποτελείται από οξείδια πολύτιμων μετάλλων, όπως οξείδιο ρουθηνίου (RuO_2), οξείδιο ιριδίου (IrO_2) και αδρανή οξείδια, όπως οξείδιο τιτανίου (TiO_2), πεντοξείδιο τανταλίου (Ta_2O_5), οξείδιο ζirkονίου (ZrO_2) κ.α. Ωστόσο, οι άνοδοι οξειδίων $\text{RuO}_2\text{-TiO}_2$ έχουν μειωμένη διάρκεια ζωής σε εφαρμογές που προορίζονται για το θαλασσινό νερό, λόγω της έκλυσης χλωρίου και οξυγόνου που έχει ως αποτέλεσμα την διάλυση (οξείδωση) του Ru εξαιτίας ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Αντίθετα, οι άνοδοι από MMO με επίστρωση $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ παρουσιάζουν υψηλότερη σταθερότητα σε συνδυασμό με καλές ηλεκτροχημικές ιδιότητες, οπότε είναι κατάλληλες για εφαρμογές στο θαλασσινό νερό.

Οι άνοδοι από MMO έχουν πολύ χαμηλό ρυθμό κατανάλωσης της τάξης 0.0005 g/A έως 0.001 g/A ανά έτος και παράλληλα η πυκνότητα ρεύματος που μπορούν να παρέχουν κυμαίνεται από 400 A/m^2 έως 1000 A/m^2 . Συγκριτικά με τις ανόδους με την επένδυση πλατίνας είναι αρκετά φθηνότερες, καθώς καταναλώνουν μικρότερη ποσότητα πολύτιμου μετάλλου και κατασκευάζονται με απλούστερες διαδικασίες. Γενικότερα η καλή ηλεκτροχημική απόδοση σε συνδυασμό με το λογικό κόστος τους καθιστούν τις ανόδους από MMO εξαιρετικά δημοφιλείς στο εμπόριο. Επιπρόσθετα έχει αναπτυχθεί μια βελτιωμένη άνοδος από MMO, η οποία περιέχει ένα ενδιάμεσο στρώμα Ta μεταξύ του υποστρώματος Ti και της επικάλυψης οξειδίου. Μέσω της παραπάνω μεθόδου κατασκευής, παρατηρήθηκε ότι η διάρκεια ζωής της ανόδου από MMO που λειτουργεί σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά. Εκτός των παραπάνω, η εφαρμογή ενός ενδιάμεσου στρώματος Ta μπορεί να αυξήσει το δυναμικό διάσπασης της ανόδου από τα 8 V σε άνω των 40 V.

Ένα ακόμα πρόβλημα που χρειάζεται αντιμετώπιση είναι η περίπτωση χρήσης αυτών των ανόδων σε θαλασσινό νερό χαμηλής θερμοκρασίας, καθώς σε αυτές τις συνθήκες μειώνεται σημαντικά η διάρκεια ζωής τους. Προκειμένου να διατηρηθεί η διάρκεια ζωής τους συστήνεται να λειτουργούν με μικρότερες πυκνότητες ρεύματος όταν βρίσκονται σε παγωμένες θάλασσες. Λόγω της υπερθέρμανσης του πλανήτη και των πάγων που λιώνουν, είναι πολύ πιθανό οι διαδρομές μέσω της Αρκτικής να αποτελέσουν για το διεθνές εμπόριο νέους δρόμους μεταφοράς, γεγονός που δείχνει την ακόμη μεγαλύτερη ανάγκη για βελτίωση της ποιότητας των ανόδων από MMO με στόχο την υψηλότερη απόδοση και λειτουργία σε θάλασσες με χαμηλές θερμοκρασίες. (Xu, L., et al, 2021).

3.3.8 Σύνοψη λειτουργικών χαρακτηριστικών των ανόδων

Οι ιδιότητες των ανόδων για εφαρμογή επιβαλλόμενου ρεύματος παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5).

Πίνακας 5: Ιδιότητες των ανόδων για χρήση σε σύστημα προστασίας με επιβαλλόμενο ρεύμα.

| Υλικό ανόδου | Ρυθμός κατανάλωσης (g/Αανά έτος) | Μέγιστη πυκνότητα ρεύματος (A/m ²) | Μέγιστη τάση (V) |
|--|----------------------------------|--|------------------|
| Χάλυβας | 9000 | 5 | 50 |
| Γραφίτης | 500 | 2.5-10 | 50 |
| Μαγνητίτης | 1.5-2.5 | 90-100 | 50 |
| Χυτοσίδηρος | 250-1000 | 30-50 | 50 |
| Μόλυβδος-Άργυρος | 25-100 | 250-3000 | 24 |
| Τιτάνιο με επένδυση λευκόχρυσου | 0.004-0.012 | 500-3000 | 8 |
| Ταντάλιο με επένδυση λευκόχρυσου | 0.004-0.012 | 500-3000 | 50 |
| Νιόβιο με επένδυση λευκόχρυσου | 0.004-0.012 | 500-3000 | 100 |
| Μικτά οξειδία μετάλλων σε υπόστρωμα τιτανίου | 0.0005-0.001 | 400-1000 | 8 |

3.3.9 Τύποι ανόδων ανάλογα με το σχήμα τους

Οι άνοδοι που χρησιμοποιούνται κατά την εφαρμογή επιβαλλόμενου ρεύματος μπορούν να κατασκευαστούν στις εξής μορφές και σχήματα:

- **Άνοδοι σε σχήμα κυκλικού δίσκου** (Εικόνα 19). Οι άνοδοι σε σχήμα κυκλικού δίσκου είναι ιδανικές για πλοία που διαθέτουν επίπεδο προφίλ της γάστρας, διότι τοποθετούνται σε εσοχές, ώστε να βρίσκονται τελικά στο ίδιο επίπεδο με την επιφάνεια της γάστρας.



Εικόνα 19: Άνοδος σε σχήμα κυκλικού δίσκου. (Vasilescu, M., et al, 2019)

- **Άνοδοι σε σχήμα μακριών λωρίδων** (Εικόνα 20). Οι άνοδοι σε σχήμα λωρίδας είναι ελαφριές, εύκολες στην εγκατάσταση και μπορούν να παρέχουν μεγάλη πυκνότητα ρεύματος από μια σχετικά μικρή επιφάνεια ανόδου.



Εικόνα 20: Άνοδος σε σχήμα λωρίδας. (Vasilescu, M., et al, 2019)

- **Άνοδοι σε σχήμα έλλειψης** (Εικόνα 21). Οι άνοδοι σε σχήμα έλλειψης μπορούν να παρέχουν καλύτερη κατανομή ρεύματος, γεγονός που τις καθιστά κατάλληλες για πολύπλοκα προφίλ γάστρας.

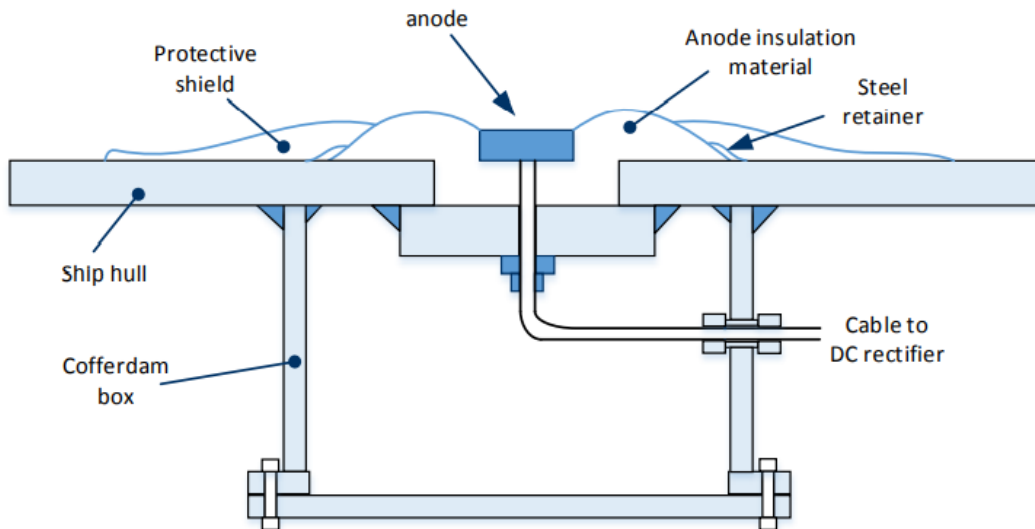


Εικόνα 21: Άνοδος σε σχήμα έλλειψης. (Πηγή: Vasilescu, M., et al, 2019)

3.3.10 Τρόποι εγκατάστασης των ανόδων

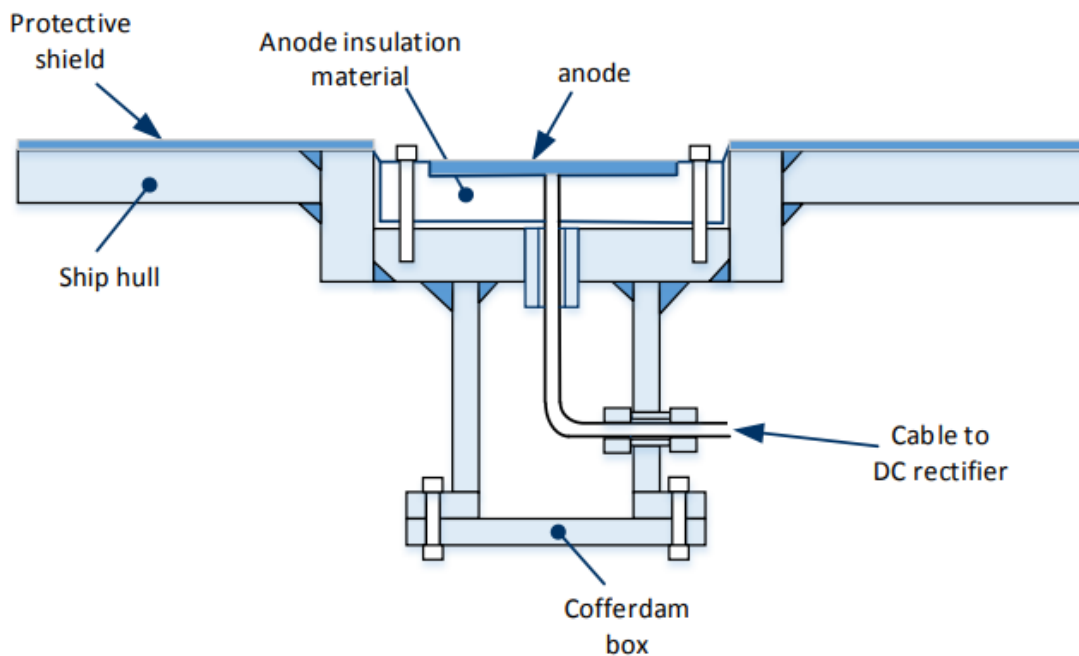
Οι άνοδοι που χρησιμοποιούνται σε συστήματα προστασίας με επιβαλλόμενο ρεύμα μπορούν να εγκατασταθούν στις γάστρες των πλοίων με δύο τρόπους:

- 1) Με στερέωση πάνω στην εξωτερική επιφάνεια της γάστρας (Εικόνα 22).



Εικόνα 22: Σχηματική απεικόνιση εξωτερικής στερέωσης ανόδου. (Πηγή: ABS, 2017)

- 2) Με τοποθέτηση μέσα σε εσοχές στο ίδιο επίπεδο με την επιφάνεια της γάστρας (Εικόνα 23).



Εικόνα 23: Σχηματική απεικόνιση τοποθέτησης ανόδου σε εσοχή. (Πηγή: ABS, 2017)

Στην περίπτωση της προστασίας δεξαμενόπλοιοι οι άνοδοι θα πρέπει να τοποθετούνται εμπρός και πίσω από τον χώρο δεξαμενών φορτίου για λόγους ασφαλείας.

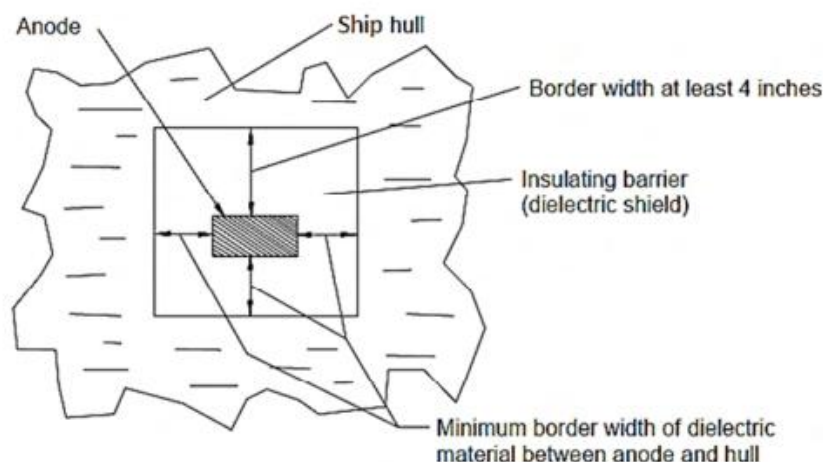
3.4 Dielectric shield (Διηλεκτρική θωράκιση)

Συχνά εμφανίζεται το φαινόμενο της ανάπτυξης υπερβολικά μεγάλων τιμών στα δυναμικά πόλωσης σε περιοχές της επιφάνειας που βρίσκονται κοντά στις ανόδους. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, αυτά τα δυναμικά θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αποκόλληση των οργανικών επιστρώσεων και να αποβούν επιζήμιες για τους χάλυβες υψηλής αντοχής, καθώς προκαλείται ευθραυστότητα λόγω έκλυσης υδρογόνου, ενώ επιπλέον μειώνονται η ολκιμότητα του χάλυβα και η αντοχή του στην κόπωση. Σε αυτή την περίπτωση, η άνοδος πρέπει απαραίτητα να περιβάλλεται από μια διηλεκτρική θωράκιση, ώστε να αποφεύγεται η υπερβολικά υψηλή πυκνότητα ρεύματος στις περιοχές άμεσης γειννίασης με αυτήν, και να εξασφαλίζεται η ομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος σε όλη την βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας.

Τα υλικά διηλεκτρικής θωράκισης μπορούν να είναι είτε τύπου επικάλυψης υψηλής απόδοσης είτε προκατασκευασμένου τύπου και θα πρέπει να έχουν καλές ιδιότητες ηλεκτρικής μόνωσης, να είναι μη υγροσκοπικά υλικά, αλλά ανθεκτικά στις καθοδικές αντιδράσεις και στα αλκαλικά προϊόντα που παράγονται στις ανόδους, που μπορεί να προκαλέσουν καθοδική αποσύνδεση (cathodic disbonding) του υλικού, κατά την οποία προκύπτει αποκόλληση της προστατευτικής επιστρώσης από το μέταλλο. (British Standard, 1991)

Η επικάλυψη υψηλής απόδοσης εφαρμόζεται απευθείας στην επιφάνεια της γάστρας μετά τον καθαρισμό με αμμοβολή και συνήθως είναι εποξειδικού τύπου ή πολυουρεθάνης. Η καλύτερη δυνατή απόδοση αυτών των υλικών εξασφαλίζεται με τον καθαρισμό της γάστρας και το επαρκές πάχος επίστρωσης, το οποίο πρέπει να μειώνεται καθώς η απόσταση από την άνοδο αυξάνεται. (British Standard, 1991)

Οι προκατασκευασμένες διηλεκτρικές ασπίδες (dielectric shields) (Εικόνα 24) κατασκευάζονται από ενισχυμένο γυαλί πολυεστέρα/εποξειδική ρητίνη ή από θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά και διατίθενται είτε ως λεπτά φύλλα προσκολλημένα σε χαλύβδινη πλάκα είτε σε άλλη μορφή κατάλληλη για άμεση προσάρτηση στην γάστρα. (British Standard, 1991)



Εικόνα 24: Σχηματική απεικόνιση διηλεκτρικής ασπίδας για άνοδο σε σύστημα προστασίας επιβαλλόμενου ρεύματος. (Πηγή: ABYC, 2013)

Το μέγεθος της διηλεκτρικής ασπίδας εξαρτάται από το σχήμα της ανόδου, το εφαρμοζόμενο δυναμικό καθοδικής προστασίας, τη μέγιστη τιμή ρεύματος εξόδου και την ειδική αντίσταση του ηλεκτρολύτη και μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τις παρακάτω μαθηματικές σχέσεις (ABS, 2017):

- i) Η ακτίνα (r) μιας διηλεκτρικής ασπίδας ανόδου σε σχήμα κυκλικού δίσκου θα υπολογίζεται από την παρακάτω μαθηματική σχέση ως εξής:

$$r = \frac{\rho * I}{2 * \pi * (E_0 - E)} \quad (m)$$

Όπου:

- E_0 είναι το δυναμικό προστασίας της γάστρας (V)
- E είναι το μέγιστο δυναμικό που μπορεί να αντέξει η βαφή της γάστρας (V)
- ρ είναι η ειδική αντίσταση του ηλεκτρολύτη ($\Omega * m$)
- I είναι η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος

- ii) Για άνοδο σε σχήμα ελλειπτικό: Οι διαστάσεις της διηλεκτρικής ασπίδας μπορούν να υπολογιστούν θεωρητικά ως εξής:

$$b = \frac{L * a^{\frac{1}{2}}}{a - 1} \quad (m)$$

Όπου:

- b είναι ο μεγάλος ημιάξονας της έλλειψης (m)
- L είναι το μήκος της λωρίδας ανόδου (m)
- $\alpha = \exp\left(\frac{2\pi L * (E_0 - E)}{\rho * L}\right)$
- L_0 είναι ο μεγάλος (κύριος) άξονας της έλλειψης που υπολογίζεται ως εξής:

$$L_0 = \frac{L(a + 1)}{a - 1} \quad (m)$$

Στους παραπάνω υπολογισμούς είναι πολύ πιθανό να προκύψουν σφάλματα λόγω του απλοποιημένου φυσικού μοντέλου που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα η άνοδος αναπαρίσταται ως μια γραμμική πηγή ρεύματος, της οποίας η πυκνότητα είναι ομοιόμορφα κατανομημένη κατά το μήκος της και θεωρείται ότι τοποθετείται στην επιφάνεια ενός αγώγιμου μέσου με άπειρο μήκος που παριστάνει το θαλασσινό νερό. (ABS, 2017)

Τέλος, ελλείψει στοιχείων και ειδικών μελετών για συμβατικούς χάλυβες και για οργανικές επιστρώσεις, η ελάχιστη απόσταση μεταξύ της ακμής ανόδου και της συμβατικής επιστρώσης γάστρας ανάλογα με το παρεχόμενο ρεύμα της ανόδου, δίνεται από τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6).

Πίνακας 6: Ελάχιστη απόσταση της ακμής ανόδου από την συμβατική επίστρωση συναρτήσει του παρεχόμενου ρεύματος της ανόδου. (Πηγή: ABS, 2017)

| Anode current output, in A | < 20 | 20 and < 50 | 50 and < 150 | 150 and < 300 |
|----------------------------|------------|-------------|--------------|---------------|
| Distance, m (in.) | 0.5 (19.7) | 10 (39.4) | 1.5 (59.1) | 2.0 (78.7) |

3.5 Ηλεκτρόδια αναφοράς

Τα ηλεκτρόδια αναφοράς χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του δυναμικού του μετάλλου στο θαλασσινό νερό και γενικά επιτρέπουν τον έλεγχο της τιμής του επιβαλλόμενου ρεύματος που παρέχεται από ένα σύστημα καθοδικής προστασίας. Τα ηλεκτρόδια αναφοράς είναι καθαρός ψευδάργυρος (Zn) ή άργυρος/χλωριούχος άργυρος (Ag/AgCl). Τα ηλεκτρόδια ψευδαργύρου είναι πιο στιβαρά ενώ τα ηλεκτρόδια αργύρου/χλωριούχου αργύρου δίνουν πιο ακριβείς μετρήσεις. Πιο συγκεκριμένα τα ηλεκτρόδια αναφοράς Ag/AgCl είναι περισσότερο ακριβή κυρίως στο μη αραιωμένο θαλασσινό νερό με αλατότητα 3,5% ενώ η χρήση τους σε νερό διαφορετικής αλατότητας μπορεί οδηγήσει σε εσφαλμένες τιμές. (European Standard, 2012).

Ένα σήμα από το ηλεκτρόδιο αναφοράς προς τον πίνακα ελέγχου επιτρέπει στο σύστημα καθοδικής προστασίας να προσαρμόζεται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες. Στην συνέχεια, μετριέται το δυναμικό της γάστρας έναντι του ηλεκτροδίου αναφοράς και σηματοδοτείται η παροχή ρεύματος στην έξοδο, μέσω της ρύθμισης της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του δυναμικού της γάστρας και του προκαθορισμένου επιθυμητού δυναμικού. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς είναι τοποθετημένο σε μια κυκλική βάση που διατηρεί ηλεκτρικά μονωμένο το ηλεκτρόδιο από τη γάστρα ενώ μια σειρά οπών πάνω στο ηλεκτρόδιο επιτρέπει τη διέλευση του θαλασσινού νερού, έτσι ώστε να υπολογίζεται το δυναμικό του κύτους σε σχέση με το ηλεκτρόδιο αναφοράς. Οι οπές στο κελί αναφοράς πρέπει να παραμένουν ανοιχτές, ώστε να λειτουργεί το ηλεκτρόδιο και να μην καλύπτονται σε καμία περίπτωση από βαφή. (ABS, 2017)

Τα ηλεκτρόδια αναφοράς θα πρέπει να εγκαθίστανται σε σταθερές θέσεις που καθορίζονται μετά από υπολογισμούς ή ακόμα και εμπειρικά, έτσι ώστε το δυναμικό του κύτους να διατηρείται εντός των καθορισμένων ορίων. Συνήθως δύο ηλεκτρόδια αναφοράς εγκαθίστανται περίπου στα μισά της διαδρομής μεταξύ των ανόδων που τροφοδοτούνται από την ίδια μονάδα ανορθωτή/μετασχηματιστή. Το ένα λειτουργεί ως πρωτεύον στοιχείο ελέγχου, ενώ το άλλο χρησιμεύει ως βοηθητικό για την επαλήθευση της λειτουργίας του πρωτεύοντος στοιχείου. Το βοηθητικό ηλεκτρόδιο αναφοράς είναι σημαντικό για την επαλήθευση της λειτουργίας του συστήματος και στις δύο πλευρές της γάστρας και πρέπει να έχει την δυνατότητα να εξασφαλίζει την κύρια λειτουργία εάν το πρωτεύον ηλεκτρόδιο καταστραφεί. Η αντικατάσταση των ηλεκτροδίων πρέπει να είναι εύκολη και να είναι τοποθετημένα σε προσβάσιμη θέση, ακόμα και όταν το πλοίο είναι εν πλω. Τέλος για τα πλοία που πλέουν στον πάγο σε αρκτικά ύδατα, τα ηλεκτρόδια αναφοράς που είναι προσαρτημένα στην γάστρα και οι διατάξεις τους θα πρέπει να τοποθετούνται σε εσοχές για να προστατεύονται από τη μηχανική φθορά που αναμένεται να είναι μεγάλη εξαιτίας του πάγου. (ABS, 2017)

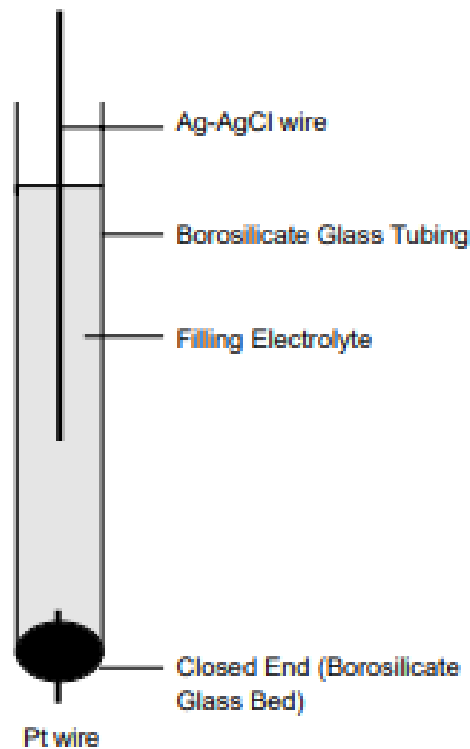
3.5.1 Ηλεκτρόδιο αναφοράς ψευδαργύρου (Zn)

Η χρήση μεταλλικών ηλεκτροδίων συνήθως δεν συνίσταται για άμεση επαφή με τον ηλεκτρολύτη γύρω από μία δομή με σκοπό την μέτρηση του δυναμικού, ωστόσο ο ψευδάργυρος είναι κατάλληλος για πολλές εφαρμογές στο θαλασσινό νερό, ενώ η χρήση του δεν προτιμάται σε άλλους ηλεκτρολύτες. Το ηλεκτρόδιο ψευδαργύρου πρέπει να έχει υψηλή καθαρότητα, δηλαδή να αποτελείται από 99.9% ψευδάργυρο, με την περιεκτικότητα σε σίδηρο να μην υπερβαίνει το 0.0014%. Μερικά από τα κράματα ψευδαργύρου που χρησιμοποιούνται ως θυσιαζόμενες άνοδοι, μπορεί επίσης να είναι κατάλληλα. Τέλος, το ηλεκτρόδιο ψευδαργύρου έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να κατασκευαστεί σε οποιαδήποτε επιθυμητή μορφή. (British Standard, 1991)

Τα ηλεκτρόδια αυτού του τύπου είναι φθηνότερα και πιο ανθεκτικά από τα ηλεκτρόδια αργύρου/χλωριούχου αργύρου και όπως αναφέρθηκε ήδη, έχουν το πλεονέκτημα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο θαλασσινό νερό, εκτός εάν απαιτείται υψηλός βαθμός σταθερότητας. Εμπειρικά έχει διαπιστωθεί ότι ο ψευδάργυρος στο θαλασσινό νερό εμφανίζει αποκλίσεις μεταξύ ± 30 mV, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για ένα ηλεκτρόδιο αργύρου/χλωριούχου είναι της τάξης του ± 5 mV. (British Standard, 1991)

3.5.2 Ηλεκτρόδιο αναφοράς αργύρου/χλωριούχου αργύρου (Ag/AgCl)

Ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς αργύρου/χλωριούχου αργύρου (Εικόνα 25) κατασκευάζεται από άργυρο, με την επιφάνεια του να επικαλύπτεται με χλωριούχο άργυρο. Το ηλεκτρόδιο Ag/AgCl έχει υψηλό βαθμό σταθερότητας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας σε θαλασσινό νερό ή σε αλμυρά νερά στις εκβολές ποταμών. Τα ηλεκτρόδια για χρήση στο θαλασσινό νερό τοποθετούνται σε διάτρητα δοχεία για μηχανική προστασία ώστε να επιτρέπεται η ελεύθερη κυκλοφορία του θαλασσινού νερού σε αυτό. Θα πρέπει να βυθιστούν σε θαλασσινό νερό για αρκετές ώρες πριν από τη χρήση τους και επίσης το άκρο του καλωδίου πρέπει να είναι μονωμένο, για να αποφευχθεί τυχόν βραχυκύκλωμα. (British Standard, 1991)



Εικόνα 25: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτροδίου αναφοράς αργύρου/χλωριούχου αργύρου.

Η μεταβολή της αλατότητας του νερού αναμένεται να επηρεάσει το δυναμικό ενός ηλεκτροδίου αυτού του τύπου. Η αραίωση του θαλασσινού νερού, όπως μπορεί να συμβεί στις εκβολές ποταμών, απαιτεί την εφαρμογή ενός πιο αρνητικού δυναμικού από την προβλεπόμενη τιμή σε σχέση με το ηλεκτρόδιο αναφοράς αργύρου/χλωριούχου αργύρου. Η μεταβολή δεν προβλέπεται να είναι μεγαλύτερη από 60 mV για κάθε δεκαπλάσια αλλαγή στη συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη, οπότε στις περισσότερες περιπτώσεις υιοθετείται ένα ελαφρώς πιο αρνητικό δυναμικό προσαρτίας. Εάν ωστόσο, η μεταβολή της αλατότητας είναι πολύ μεγάλη, το ηλεκτρόδιο θα πρέπει να βυθιστεί σε ένα κορεσμένο διάλυμα χλωριούχου καλίου σε κλειστό δοχείο, και η επικοινωνία του με το περιβάλλον να γίνεται μέσω ενός πορώδους διαφράγματος. Τέλος όταν το ηλεκτρόδιο Ag/AgCl δεν χρησιμοποιείται, πρέπει να φυλάσσεται σε κορεσμένο διάλυμα χλωριούχου καλίου σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. (British Standard, 1991)

3.5.3 Δυναμικά ηλεκτροδίων αναφοράς

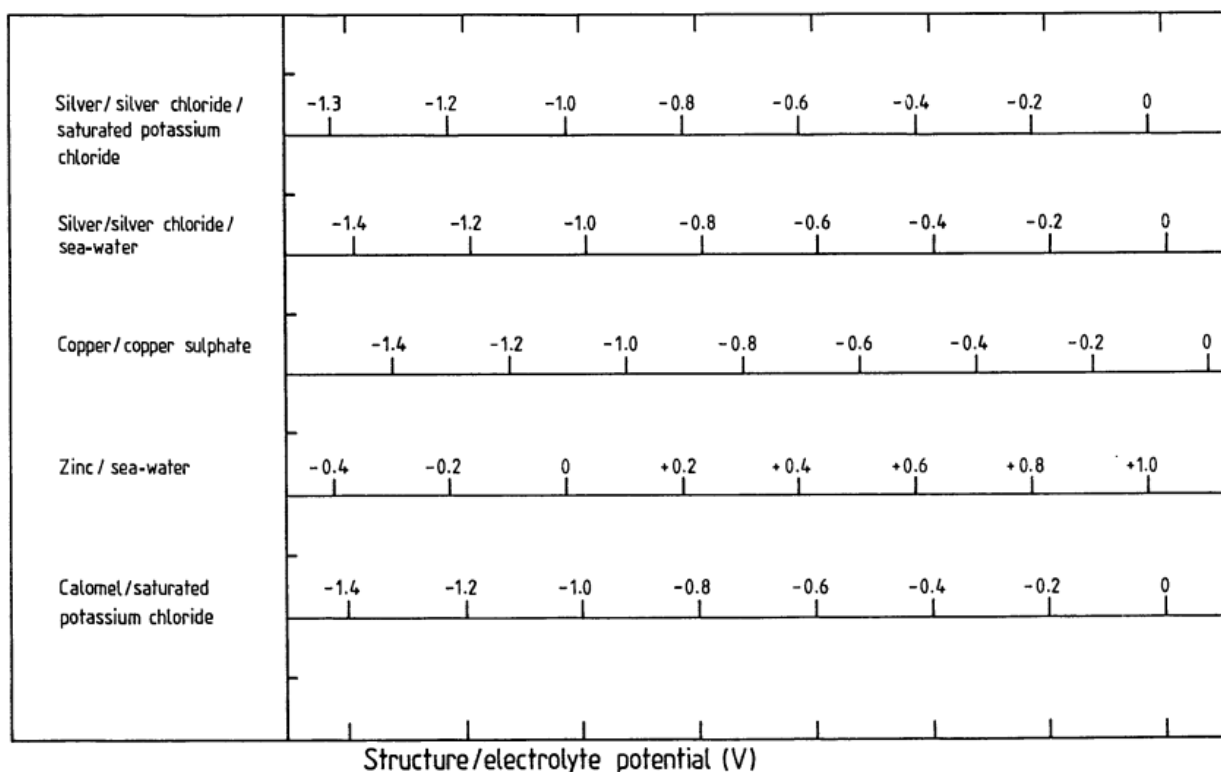
Τα δυναμικά διαφόρων ηλεκτροδίων αναφοράς σε σχέση με το πρότυπο ηλεκτρόδιο υδρογόνου δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7). Το ηλεκτρόδιο καλομέλανα δεν είναι επαρκώς στιβαρό για χρήση στην περίπτωση των πλοίων και προτείνεται μόνο για εργαστηριακές μελέτες, ενώ η χρήση του πλέον τείνει να καταργηθεί και για λόγους τοξικότητας. (British Standard, 1991)

Πίνακας 7: Δυναμικά των ηλεκτροδίων αναφοράς σε σύγκριση με το πρότυπο ηλεκτρόδιο υδρογόνου (25 °C).
(Πηγή: British Standard, 1991)

| Electrode | Potential |
|---|------------------|
| | V |
| Copper/copper sulphate | + 0.32 |
| Silver/silver chloride/saturated potassium chloride | + 0.20 |
| Silver/silver chloride/sea-water | + 0.25 (approx.) |
| Calomel (saturated potassium chloride) | + 0.25 |
| Zinc/sea-water | - 0.78 (approx.) |

Το εύρος των τιμών των δυναμικών λειτουργίας των ηλεκτροδίων αναφοράς δεν είναι πάντα το ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις, όπως φαίνεται παρακάτω (Πίνακας 8):

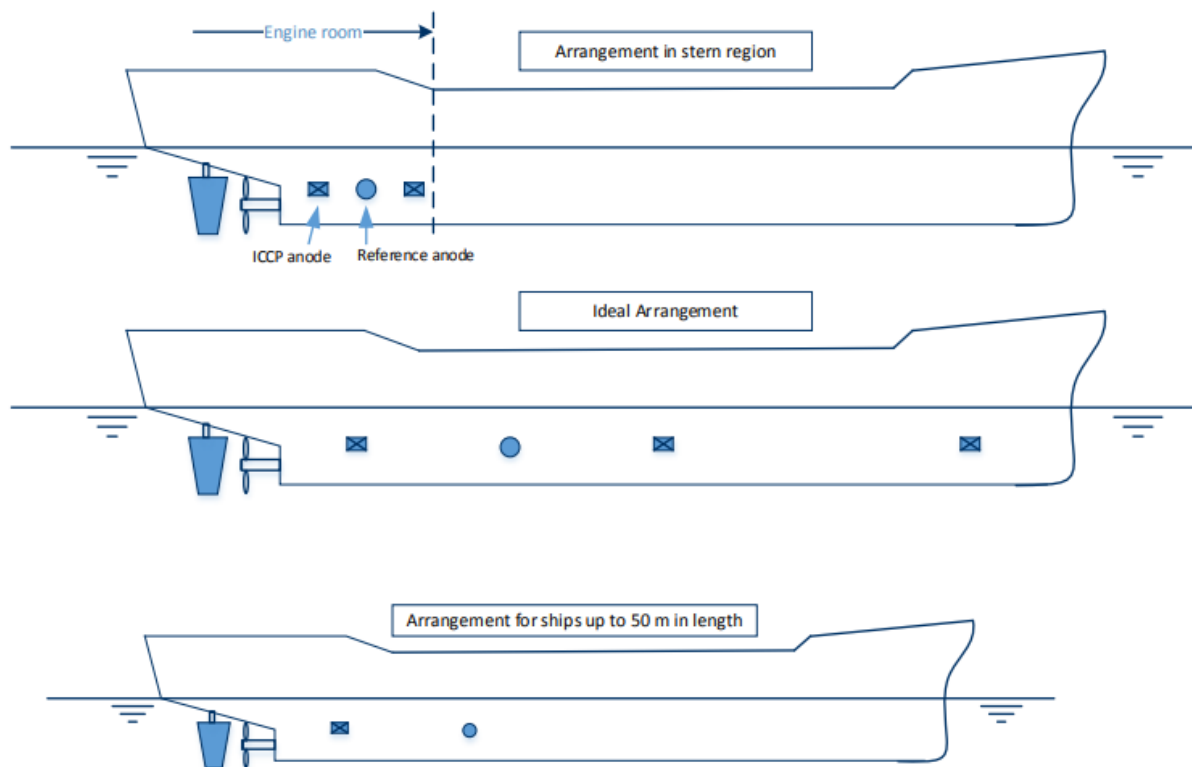
Πίνακας 8: Δυναμικό λειτουργίας ηλεκτροδίων αναφοράς διαφόρων τύπων. (Πηγή: British Standard, 1991)



3.6 Διάταξη ανόδων και ηλεκτροδίων αναφοράς

Η θέση και η διάταξη των ανόδων κατά την εφαρμογή επιβαλλόμενου ρεύματος είναι σημαντικές για την προστασία τους από μηχανικές βλάβες. Η ιδανική διάταξη των ανόδων και των ηλεκτροδίων αναφοράς (Εικόνα 26) θεωρείται εκείνη που γίνεται με βάση την κατανομή ρεύματος, το οποίο υπολογίζεται κατά το σχεδιασμό του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση της επιστρώσης και τη φθορά που αναμένεται να συμβεί κατά τη διάρκεια ζωής του πλοίου (για παράδειγμα, τα παγοθραυστικά και τα πλοία

που πλέουν σε πάγο μπορεί να έχουν εκτεθειμένες μεγάλες επιφάνειες στην περιοχή της πλήρους χωρίς επίστρωση). (ABS, 2017)



Εικόνα 26: Σχηματική απεικόνιση περιπτώσεων διαφορετικής διάταξης των ανόδων και των ηλεκτροδίων αναφοράς στην γάστρα του πλοίου. (Πηγή: ABS, 2017)

Σχετικά με την απόσταση των ανόδων κατά την εφαρμογή επιβαλλόμενου ρεύματος δεν υπάρχει σταθερός κανόνας, διότι η τιμή εξόδου και το εύρος τιμών έντασης ρεύματος μπορούν να ρυθμιστούν ανάλογα με την περίπτωση. (ABS, 2017)

Το σύστημα καθοδικής προστασίας με τη χρήση επιβαλλόμενου ρεύματος σχεδιάζεται για κάθε πλοίο ξεχωριστά και τα κριτήρια σχεδιασμού που πρέπει να πληροί είναι τα ακόλουθα (ABS, 2017):

- 1) Για μεγάλα πλοία με μήκος 150 m ή περισσότερο, οι άνοδοι της πρύμνης πρέπει να απέχουν τουλάχιστον 15m από την προπέλα. Αυτή η απόσταση μπορεί να μειωθεί στα 5m στα μικρά πλοία. Τα ηλεκτρόδια αναφοράς πρέπει να βρίσκονται εκεί που αναμένεται η χαμηλότερη πτώση δυναμικού (δηλαδή σε μεγάλη απόσταση από τις ανόδους). Στα μεγάλα πλοία τα ηλεκτρόδια αναφοράς θα πρέπει να βρίσκονται σε απόσταση τουλάχιστον 15m έως 20m από τις ανόδους και αντίστοιχα σε μικρότερη απόσταση στα μικρά πλοία.
- 2) Οι άνοδοι δεν συνδέονται με το πηδάλιο, αλλά βρίσκονται μεταξύ του άξονα του πηδαλίου και της γάστρας του πλοίου. Η προπέλα προστατεύεται μέσω ενός δακτυλίου ολίσθησης (slip ring) στον άξονα της έλικας, όπως αναλύεται παρακάτω.
- 3) Το πηδάλιο είναι εξοπλισμένο με γαλβανικές ανόδους.

- 4) Το σύστημα επιβαλλόμενου ρεύματος πρέπει να είναι συμμετρικό (δηλαδή, να υπάρχει ίσος αριθμός ανόδων επιβαλλόμενου ρεύματος και ηλεκτροδίων αναφοράς, και να διατάσσονται σε αντίστοιχες θέσεις και στις δυο πλευρές του πλοίου). Σε περίπτωση ασύμμετρης διάταξης αναμένεται να προκληθούν φθορές.
- 5) Τουλάχιστον από ένα σετ ανόδων θα πρέπει να είναι διατεταγμένες στην αριστερή και στη δεξιά πλευρά στην περιοχή της πρύμνης του πλοίου, κατά προτίμηση κοντά στο μηχανοστάσιο.
- 6) Τουλάχιστον ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς θα πρέπει να έχει τοποθετηθεί σε κάθε πλευρά του πλοίου. Το ηλεκτρόδιο αυτό θα πρέπει να βρίσκεται μεταξύ της ανόδου και της προπέλας και όσο το δυνατόν πιο μακριά από την άνοδο (ελάχιστη απόσταση περίπου 10% του μήκους του πλοίου).
- 7) Τα πλοία με μήκος άνω των 175 m θα πρέπει να είναι εξοπλισμένα με ένα δεύτερο σύστημα επιβαλλόμενου ρεύματος στην περιοχή της πλώρης.
- 8) Στην περίπτωση που έχει εγκατασταθεί ένα σύστημα επιβαλλόμενου ρεύματος στην περιοχή της πλώρης, το ηλεκτρόδιο αναφοράς πρέπει να βρίσκεται μεταξύ της ανόδου και της πλώρης.
- 9) Απαιτείται διηλεκτρική θωράκιση (dielectric shield) γύρω από τις ανόδους για την προστασία του χάλυβα και την παροχή ομοιόμορφης κατανομής του ρεύματος.

3.7 Καλώδια σύνδεσης

Στα συστήματα καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενο ρεύμα, όλες οι καλωδιώσεις και οι συνδέσεις με τις ανόδους πρέπει να μονώνονται πλήρως από τον ηλεκτρολύτη. Όλα τα καλώδια σύνδεσης πρέπει να είναι στιβαρής κατασκευής από μηχανικής πλευράς, ανθεκτικά από χημικής πλευράς και εφοδιασμένα με επαρκή στήριξη και προστασία για την αποφυγή μηχανικών βλαβών που θα μπορούσαν να προκύψουν κατά τη λειτουργία του πλοίου, συμπεριλαμβανομένων των πιο δυσμενών περιβαλλοντικών συνθηκών που αναμένονται κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος καθοδικής προστασίας. (European Standard, 2012)

Η γείωση μεταξύ της ανόδου και του καλωδίου της πρέπει να είναι υδατοστεγής, χημικά ανθεκτική και μηχανικά στιβαρή. Τα μονωτικά υλικά καλωδίων και τερματισμού πρέπει να είναι ανθεκτικά στις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως στο χλώριο, στο υψηλό pH, στο θαλασσινό νερό, στους υδρογονάνθρακες και άλλες χημικές ουσίες. (European Standard, 2012)

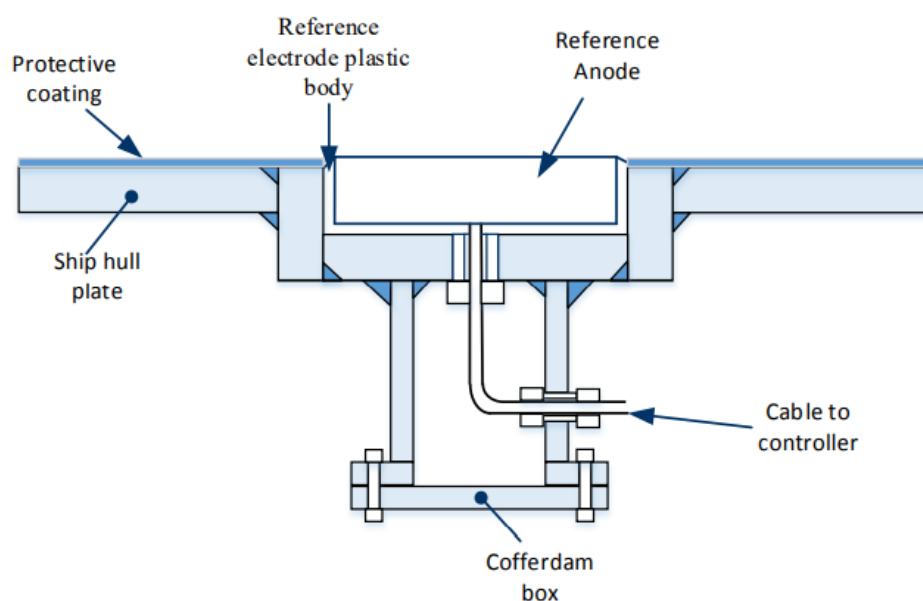
Κατά τον προσδιορισμό της διατομής του καλωδίου, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η πιθανή πτώση τάσης κατά μήκος του καλωδίου που συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 1V έως 2V. Επίσης, θα πρέπει να αποφεύγεται η υπέρβαση της καθορισμένης μέγιστης ονομαστικής τιμής έντασης ρεύματος για ένα δεδομένο μέγεθος καλωδίου. (European Standard, 2012)

Τα καλώδια σύνδεσης για συστήματα καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενο ρεύμα δεν πρέπει να περνούν μέσα από δεξαμενές φορτίου που προορίζονται για προϊόντα χαμηλού

σημείου ανάφλεξης. Η υποδοχή καλωδίου στις ανόδους κάτω από την ίσαλο γραμμή συνδέεται συνήθως μέσω ενός κιβωτίου φραγμού (*cofferdam box*). (ABS, 2017)

3.8 Cofferdams (Φράγματα)

Οι άνοδοι, τα ηλεκτρόδια αναφοράς και άλλα εξαρτήματα που διεισδύουν στην γάστρα, κάτω από την ίσαλο γραμμή πρέπει να σχεδιάζονται, να κατασκευάζονται και να εγκαθίστανται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μηχανική ακεραιότητα και η στεγανότητα του πλοίου. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τα υδατοστεγή φράγματα (Εικόνα 27). Τα υλικά κατασκευής που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να είναι από μέταλλα συμβατά με τη γάστρα, κάτι που είναι πολύ σημαντικό για την πρόληψη της διάβρωσης ή άλλων δυσμενών αντιδράσεων μεταξύ διαφορετικών υλικών, καθώς θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο τη δομική ακεραιότητα του πλοίου. Το πάχος της χαλύβδινης πλάκας των στεγανών φραγμάτων πρέπει να είναι αντίστοιχο με αυτό του κύτους του πλοίου, ώστε να εξασφαλίζεται η ομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος και η αντοχή της δομής, ώστε να εξασφαλίζεται συνολικά η ακεραιότητα του κύτους του πλοίου. Τέλος, η κατασκευή και η τοποθέτηση των υδατοστεγών φραγμάτων θα πρέπει να γίνεται σύμφωνα με τις σχετικές διεθνείς και εθνικές απαιτήσεις ή με τις απαιτήσεις των νηογνωμόνων. (ABS, 2017)



Εικόνα 27: Τυπική διάταξη ενός στεγανού κιβωτίου φραγμού (*cofferdam box*). (Πηγή: ABS, 2017)

3.9 Σύνδεση της προπέλας και του πηδαλίου

Για την ενσωμάτωση των εξαρτημάτων του πλοίου, όπως η προπέλα και το πηδάλιο, στο σύστημα ICCP, χρησιμοποιείται μια διαδικασία γνωστή ως συγκόλληση ή σύνδεση (*bonding*). Ο σκοπός της σύνδεσης είναι να δημιουργείται ένα κοινό ηλεκτρικό δυναμικό μεταξύ των συνδεδεμένων εξαρτημάτων, και να ελαχιστοποιούνται οι διαφορές ηλεκτρικού δυναμικού που υπάρχουν μεταξύ τους.

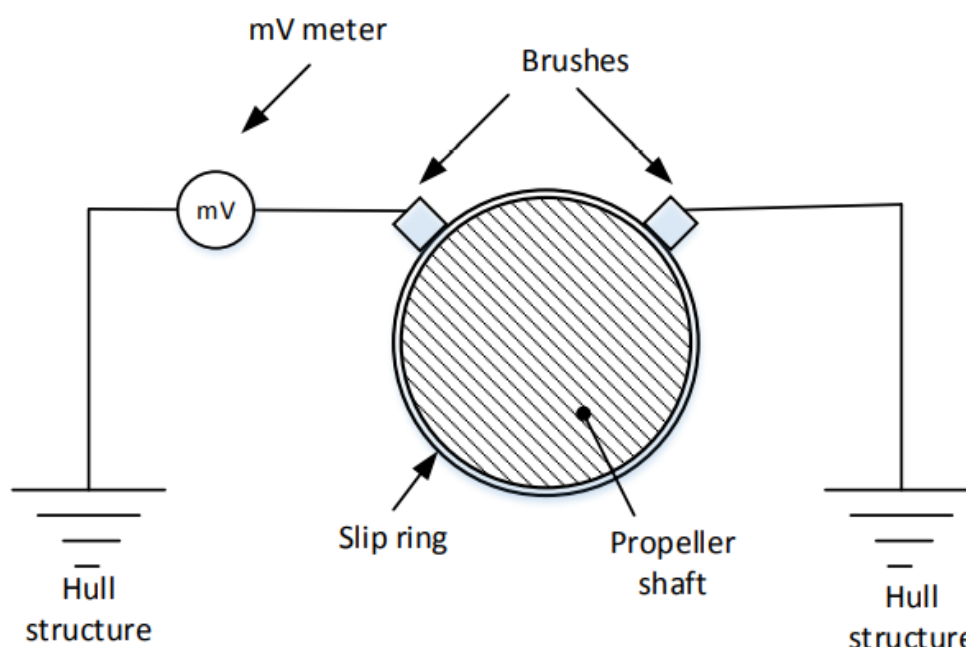
Η σύνδεση πρέπει να είναι χαμηλής ηλεκτρικής αντίστασης επειδή βοηθά στον έλεγχο και τον περιορισμό των διαφορών δυναμικού σε ολόκληρο το σύστημα. Αντίθετα, οι

ανεξέλεγκτες διαφορές δυναμικού μπορεί να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρικών τόξων (electrical arcing) και της «αλληλεπίδρασης διάβρωσης» (corrosion interaction damage). Το ηλεκτρικό τόξο είναι ένας ειδικός τύπος ηλεκτρικής εκκένωσης και μπορεί να συμβεί όταν υπάρχουν σημαντικές διαφορές δυναμικού μεταξύ δύο συνδεδεμένων εξαρτημάτων. Η αλληλεπίδραση διάβρωσης μπορεί να προκληθεί από ηλεκτρικά ρεύματα που προκαλούν επιταχυνόμενη διάβρωση όταν υπάρχουν σημαντικές διαφορές δυναμικού. Με μια σύνδεση χαμηλής ηλεκτρικής αντίστασης, εξασφαλίζεται η πρόληψη της εμφάνισης ζημιών λόγω ηλεκτρικού τόξου και διάβρωσης αλληλεπίδρασης. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ένα σχετικά ομοιόμορφο ηλεκτρικό δυναμικό κατά μήκος του κύτους και των εξαρτημάτων του.

3.9.1 Σύνδεση της προπέλας (bonding of propeller)

Οι προπέλες είναι συνήθως κατασκευασμένες από μπρούτζο ή από κράματα τα οποία έχουν μεγάλη διαφορά δυναμικού από την χαλύβδινη γάστρα του πλοίου, και συνεπώς δημιουργούν ένα γαλβανικό ζεύγος, το οποίο επιταχύνει την διαδικασία της διάβρωσης εάν δεν παρέχεται η κατάλληλη καθοδική προστασία.

Επιπλέον, στα συστήματα καθοδικής προστασίας των πλοίων πρέπει να συμπεριλαμβάνεται ένα σύστημα γείωσης (Εικόνα 28) για την προστασία της προπέλας. Στην προκειμένη περίπτωση ένας δακτύλιος ολίσθησης (*slip-ring*) προσαρμόζεται στον άξονα της προπέλας (*shaft*), έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ηλεκτρική σύνδεση με την γάστρα του πλοίου μέσω μεταλλικών βουρτσών (*brushes*), που στηρίζονται πάνω στον δακτύλιο ολίσθησης. (PTS, 2003)



Εικόνα 28: Σύστημα ηλεκτρικής σύνδεσης και παρακολούθησης της προπέλας. (Πηγή: ABS, 2017)

Η αποτελεσματικότητα του συστήματος γείωσης του άξονα της προπέλας θα πρέπει να εμφανίζει μέγιστη αντίσταση έως 0,001 Ω για ένα ρουλεμάν (*bearing*) γεμάτο νερό και 0,01 Ω για ένα ρουλεμάν (*bearing*) γεμάτο λάδι.

Το σύστημα γείωσης άξονα της προπέλας περιλαμβάνει ένα ζεύγος μεταλλικών βουρτσών υψηλής περιεκτικότητας σε άργυρο/γραφίτη, που είναι τοποθετημένες σε μια σταθερή βάση στον δακτύλιο ολίσθησης. Οι μεταλλικές βούρτσες έχουν χαμηλή αγωγιμότητα, ώστε η αντίσταση του συστήματος ηλεκτρικής σύνδεσης του άξονα να διατηρείται σε χαμηλά όρια ακόμη και σε δυσμενείς συνθήκες.

Στο σύστημα περιλαμβάνεται ένας μετρητής (Εικόνα 29) (όπως ένα βολτόμετρο με ενδείξεις σε mV) για τον έλεγχο του δυναμικού του άξονα της προπέλας του πλοίου. Ο μετρητής έχει υψηλή εσωτερική αντίσταση, που περιορίζει τη ροή ρεύματος στο κύκλωμα σε ελάχιστα επίπεδα, έτσι ώστε να εμφανίζεται με ακρίβεια η διαφορά δυναμικού μεταξύ του άξονα της προπέλας και της γάστρας. Τα καλώδια γείωσης του μετρητή και της βάσης των βουρτσών πρέπει να συνδέονται ξεχωριστά.

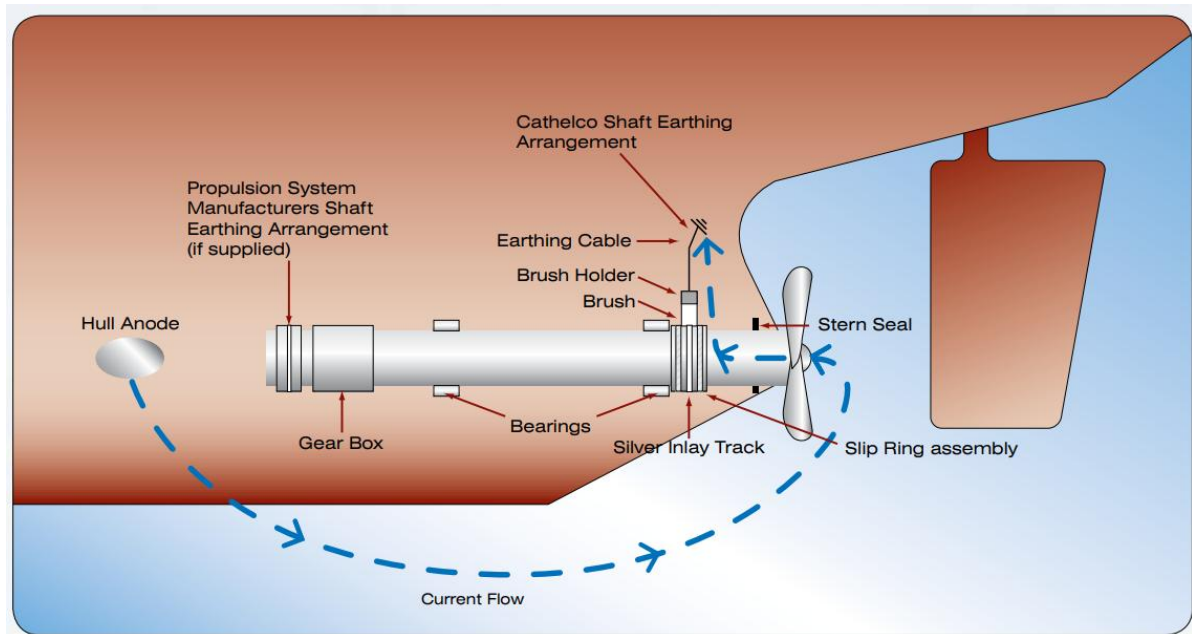


Εικόνα 29: Δακτύλιος ολίσθησης (slip ring) και μετρητής (βολτόμετρο) για την παρακολούθηση του δυναμικού μεταξύ της γάστρας και του άξονα προπέλας. (Πηγή: Vasilescu, M., et al, 2019) .

Κατά την λειτουργία του συστήματος η ένδειξη κάτω των 80 mV όταν ο άξονας περιστρέφεται στο θαλασσινό νερό, υποδηλώνει σωστή γείωση του. Όταν οι μετρήσεις είναι άνω των 80 mV, τότε πρέπει να καθαρίζεται η επιφάνεια του δακτυλίου ολίσθησης. Όταν ο άξονας βρίσκεται σε ακινησία, ο μετρητής πρέπει να δείχνει την ένδειξη "0", διότι εάν τυχόν εισέρχεται ρεύμα στην προπέλα, αυτό θα επιστρέφει στην γάστρα.

Το σύστημα σύνδεσης θα πρέπει να ελέγχεται τουλάχιστον δύο φορές την εβδομάδα όσον αφορά την κατάσταση καθαρότητας. Σε περίπτωση που έχουν συσσωρευτεί λάδια, ακαθαρσίες, ή σκουριές στην επιφάνεια του δακτυλίου ολίσθησης ή μεταξύ του δακτυλίου ολίσθησης και του άξονα, τότε θα πρέπει να χρησιμοποιείται απολιπαντικό, σμυριδόχαρτο και καθαρό πανί για τον καθαρισμό του.

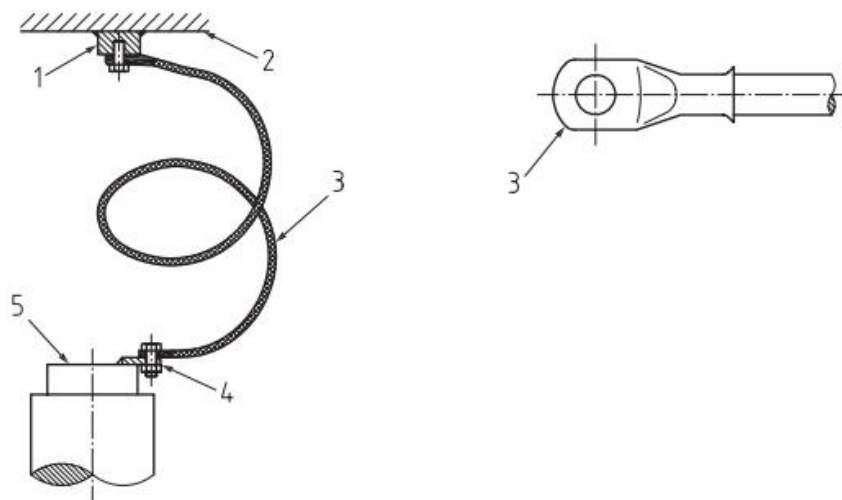
Στη συνέχεια απεικονίζεται η πλήρης διάταξη (Εικόνα 30) του συστήματος γείωσης της προπέλας.



Εικόνα 30: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης του συστήματος γείωσης προπέλας. (Vasilescu, M., et al, 2019)

3.9.2 Σύνδεση του πηδαλίου (bonding of rudder)

Σε ένα σύστημα καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενο ρεύμα θεωρείται σημαντικό το χαλύβδινο πηδάλιο να συνδέεται ηλεκτρικά με τη δομή του πλοίου, ώστε να διασφαλίζεται η προστασία του (Εικόνα 31).



Key

- 1 Socket for Bolt, brazed or welded
- 2 Hull internal
- 3 Ground cable and lug
- 4 Cable connected to brazed or welded lug on rudder stock
- 5 Rudder stock

Εικόνα 31: : Σύστημα γείωσης πηδαλίου. (Πηγή: European Standard, 2012)

Λόγω της ταλάντωσης των συγκεκριμένων εξαρτημάτων χρησιμοποιείται ένας εύκαμπτος μάντας ή καλώδιο, όπου το ένα άκρο συγκολλείται στην γάστρα και το άλλο άκρο στο κοντάκι του πηδαλίου (*rudder stock*). Η αντίσταση των συνδέσεων με τη δομή της γάστρας και με πηδάλιο θα πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να διασφαλίζεται ότι υπάρχουν ελάχιστες διαφορές δυναμικού (μικρότερες από 20 mV). Ο εύκαμπτος μάντας θα πρέπει να έχει διατομή περίπου 35 mm² και το μήκος του να μην υπερβαίνει τα 3m. Για την εκτίμηση της ροής του ρεύματος στις συνδέσεις, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η επιφάνεια του προσαρτήματος και η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος που έχει σχεδιαστεί να παρέχει το σύστημα στην γάστρα. Τέλος, κατά τη λειτουργία του συστήματος, η χρήση ενός βολτομέτρου θα πρέπει να επιβεβαιώνει την ορθή λειτουργία των συνδέσεων. (British Standard, 1991)

3.10 Οπτική επιθεώρηση, έλεγχος πριν την ενεργοποίηση και αξιολόγηση του συστήματος

3.10.1 Οπτική επιθεώρηση

Κατά τον δεξαμενισμό (*dry docking*) των πλοίων πραγματοποιείται αρχικά πλήρης οπτική επιθεώρηση στο σύστημα καθοδικής προστασίας και σε όλα τα εξαρτήματα που το απαρτίζουν, ώστε να επιβεβαιωθεί ότι εξαρτήματα και καλώδια έχουν εγκατασταθεί σωστά, φέρουν σήμανση όπου χρειάζεται και ότι προστατεύονται από οποιαδήποτε πιθανή φθορά ή βλάβη.

Επιπλέον πρέπει να επιθεωρούνται οπτικά οι άνοδοι και τα ηλεκτρόδια αναφοράς, ώστε να επιβεβαιώνεται ότι δεν έχουν επικαλυφθεί με βαφή και ότι η εγκατάσταση έχει γίνει σύμφωνα με την τεκμηρίωση του σχεδιασμού.

Η διηλεκτρική θωράκιση γύρω από τις ανόδους επιθεωρείται οπτικά για να επιβεβαιωθεί ότι η εγκατάσταση πραγματοποιήθηκε με το σωστό τρόπο, όπως επίσης περιγράφεται στην τεκμηρίωση του σχεδιασμού. Στη συνέχεια, ελέγχεται το πάχος της μεμβράνης της θωράκισης για τυχόν παρουσία ελαττωμάτων («κενών»), όπως απαιτεί η τεκμηρίωση και οι συστάσεις του κατασκευαστή. Τέλος, όλα τα δεδομένα των επιθεωρήσεων πρέπει να καταγράφονται. (ABS, 2017)

3.10.2 Μετρήσεις πριν την ενεργοποίηση του συστήματος

Πριν την ενεργοποίηση του συστήματος καθοδικής προστασίας και αφού το πλοίο έχει καθελκυστεί από την αποβάθρα δεξαμενισμού, θα πρέπει να πραγματοποιούνται μετρήσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν (ABS, 2017):

- i) Μέτρηση του δυναμικού της γάστρας στο θαλασσινό νερό σε σχέση με όλα τα μόνιμα εγκατεστημένα ηλεκτρόδια αναφοράς.
- ii) Μέτρηση του δυναμικού της γάστρας και στο θαλασσινό νερό σε σχέση με φορητά ηλεκτρόδια αναφοράς.

- iii) Ηλεκτρονική καταγραφή ή/και μετάδοση των δεδομένων ως μέρος του συστήματος παρακολούθησης της απόδοσης της καθοδικής προστασίας.

3.10.3 Ενεργοποίηση συστήματος

Το σύστημα καθοδικής προστασίας πρέπει να ενεργοποιείται σύμφωνα με τις απαιτήσεις σχεδιασμού. Οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται κατά την ενεργοποίηση του συστήματος περιλαμβάνουν (ABS, 2017):

- i) Μέτρηση του δυναμικού της γάστρας και όλων των εξαρτημάτων του πλοίου στο θαλασσινό νερό σε σύγκριση με όλα τα μόνιμα εγκατεστημένα ηλεκτρόδια αναφοράς.
- ii) Επαλήθευση της πολικότητας της δομής. Εάν οποιαδήποτε τιμή διαφοράς δυναμικού χάλυβα/θαλασσινού νερού μετατοπιστεί προς θετική κατεύθυνση, θα πρέπει να διερευνηθεί και να προσδιοριστεί η ανάγκη για τυχόν πρόσθετες δοκιμές ή/και εργασίες αποκατάστασης.
- iii) Τέλος, προσδιορίζεται η τάση και το ρεύμα εξόδου από την μονάδα ανορθωτή/μετασχηματιστή και το ρεύμα που παρέχουν στην δομή οι άνοδοι επιβαλλόμενου ρεύματος.

3.10.4 Αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος

Η αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος γίνεται μέσα σε χρονικό διάστημα ενός μήνα από την ενεργοποίηση του συστήματος καθοδικής προστασίας. Σε αυτήν την περίπτωση θα πραγματοποιηθούν μετρήσεις δυναμικού με χρήση φορητού ηλεκτροδίου αναφοράς που είναι συμπληρωματικό των διατάξεων μόνιμης παρακολούθησης που έχουν εγκατασταθεί, ώστε να επιβεβαιωθεί ότι στο στάδιο σχεδιασμού πληρούνται τα απαιτούμενα κριτήρια για αντιπροσωπευτικές θέσεις της γάστρας του πλοίου. (ABS, 2017)

Στην συνέχεια πραγματοποιείται επανάληψη των μετρήσεων δυναμικού, όπως προαναφέρθηκε, μετά από χρονικό διάστημα ενός μήνα πριν τη λήξη της εγγύησης για το πλοίο και το σύστημα καθοδικής προστασίας του, ή εντός δώδεκα μηνών από τη δεξαμενισμό του πλοίου.

3.11 Λειτουργία και συντήρηση συστήματος

Τα χρονικά διαστήματα και οι διαδικασίες δοκιμών λειτουργίας και συντήρησης του συστήματος προστασίας θα πρέπει να συμμορφώνονται με το εγχειρίδιο λειτουργίας και συντήρησης ή με την τροποποίηση αυτών, όσον αφορά την απόδοση του συστήματος, προκειμένου να εξασφαλίζεται η συνεχής, αποτελεσματική και αποδοτική λειτουργία των συστημάτων καθοδικής προστασίας. (ABS, 2017)

Για την σωστή λειτουργία ενός συστήματος καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενο ρεύμα, θα πρέπει καταρχήν να επιβεβαιώνεται ότι (ABS, 2017):

- Το σύστημα είναι ενεργοποιημένο και όλα τα μέρη του λειτουργούν.

- Υπάρχει ένα αρχείο της λειτουργίας του συστήματος με καταγεγραμμένο τον πιθανό χρόνο διακοπής λειτουργίας.
- Όλες οι τιμές ρεύματος εξόδου των ανόδων είναι παρόμοιες με εκείνες που ρυθμίστηκαν κατά την προηγούμενη αξιολόγηση.

Στην συνέχεια, οι διαδικασίες συνολικής παρακολούθησης και επιθεώρησης θα πρέπει να περιλαμβάνουν τα εξής (ABS, 2017):

- i) Μέτρηση και καταγραφή του συνολικού ρεύματος και τάσης εξόδου από την μονάδα ανορθωτή/μετασχηματιστή (σε καθημερινή βάση).
- ii) Μέτρηση και καταγραφή του δυναμικού της χαλύβδινης γάστρας στο θαλασσινό νερό σε σχέση με τα μόνιμα ηλεκτρόδια αναφοράς (σε καθημερινή βάση).
- iii) Μέτρηση και καταγραφή του ρεύματος εξόδου από τις ανόδους (σε καθημερινή βάση).
- iv) Μέτρηση παραμέτρων από οποιουσδήποτε άλλους αισθητήρες, που είναι εγκατεστημένοι ως μέρος του συστήματος παρακολούθησης απόδοσης (κατά περίπτωση).
- v) Βαθμονόμηση των μόνιμων ηλεκτροδίων αναφοράς (σε ετήσια βάση). Για τη βαθμονόμησή τους θα πρέπει να χρησιμοποιείται φορητό ηλεκτρόδιο αναφοράς. Αυτό θα πρέπει να τοποθετείται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο μόνιμο ηλεκτρόδιο αναφοράς ενώ το ρεύμα καθοδικής προστασίας θα πρέπει να απενεργοποιείται κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης.
- vi) Λεπτομερής αντιπροσωπευτική επιθεώρηση ολόκληρης της δομής με χρήση φορητών ηλεκτροδίων αναφοράς (μετά από δεξαμενισμό του πλοίου ή μετά από οποιαδήποτε σημαντική επισκευή ή ανακαίνιση του συστήματος καθοδικής προστασίας και ετησίως).
- vii) Μέτρηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ της κάθε ανόδου και της γάστρας για την επιβεβαίωση της μόνωσής τους.

Τέλος, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τα συστήματα με επιβαλλόμενο ρεύμα μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο τους δύτες και για το λόγο αυτό συνήθως απενεργοποιούνται κατά τη διάρκεια καταδυτικών εργασιών στην περιοχή της γάστρας. Εάν η απενεργοποίηση του συστήματος είναι ανέφικτη, τότε οι δύτες θα πρέπει να ενημερώνονται, ώστε να πραγματοποιούνται οι απαραίτητες ενέργειες για την ασφάλειά τους. (ABS, 2017)

3.12 Επιθεώρηση του συστήματος κατά τον δεξαμενισμό του πλοίου

Οι γαλβανικές άνοδοι θα πρέπει να επιθεωρούνται και να αντικαθίστανται εάν υπολογίζεται ότι δεν επαρκούν με βάση το ρυθμό κατανάλωσής τους για ολόκληρη την χρονική περίοδο μέχρι τον επόμενο δεξαμενισμό.

Για συστήματα με επιβαλλόμενο ρεύμα, θα πρέπει να ελέγχεται η ηλεκτρική αντίσταση και η μόνωση των ανόδων και των ηλεκτροδίων στην γάστρα. Οι μετρήσεις θα πρέπει να

πραγματοποιούνται αφού καθαριστεί η επιφάνεια των ανόδων και των ηλεκτροδίων για να αποφευχθούν τυχόν προβλήματα αγωγιμότητας λόγω εναποθέσεων αλάτων. Η ηλεκτρική αντίσταση πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 1 ΜΩ. Τιμές κάτω από αυτό το όριο μπορεί να είναι αποδεκτές εάν εξασφαλίζεται η απόδοση του συστήματος, αλλά θα πρέπει να ελέγχονται όταν υπάρχει ένδειξη πιθανής φθοράς.

Η επίστρωση θα πρέπει να ελέγχεται οπτικά για να διαπιστωθεί εάν η φθορά της είναι εντός της τιμής που προβλέπεται στο σχεδιασμό του συστήματος καθοδικής προστασίας ή εάν υπάρχουν ενδείξεις βλάβης της επίστρωσης που προκαλείται από την καθοδική προστασία. (ABS, 2017)

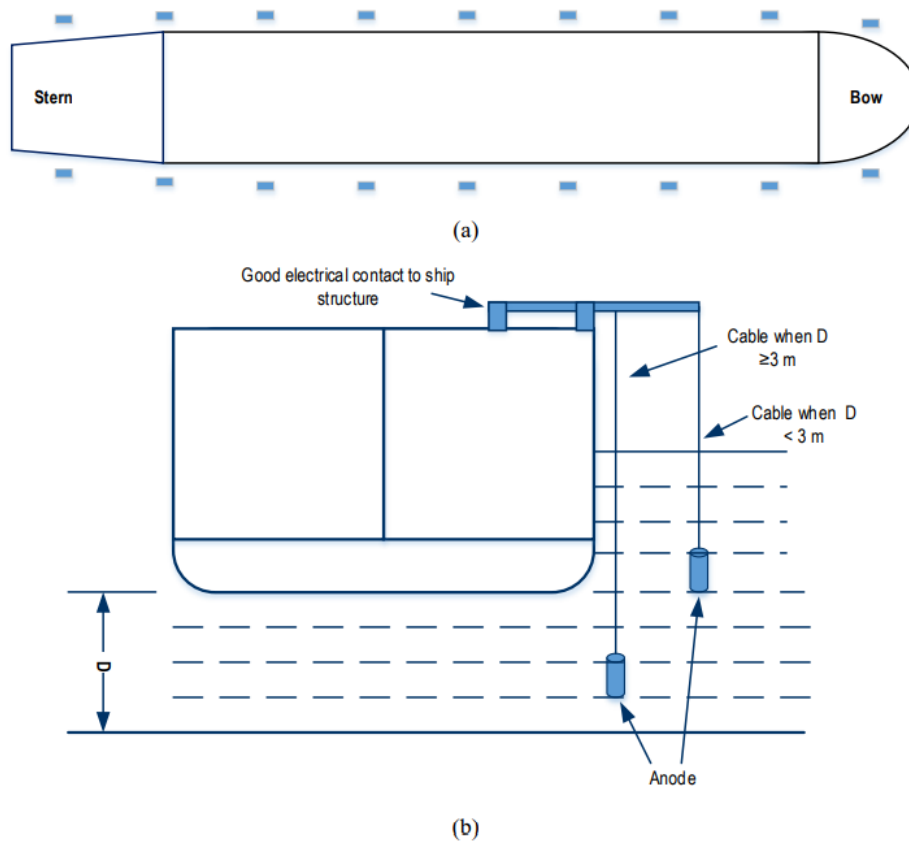
3.13 Καθοδική προστασία των πλοίων κατά την διάρκεια τελικών δοκιμών (fitting out) και ακινησίας (Lay-up).

Κατά την ναυπήγηση νεόκτιστων πλοίων, κατά την διάρκεια επισκευής, κατά την διάρκεια επανατοποθέτησης ή και κατά την περίοδο παραμονής σε αγκυροβόλιο, θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την παροχή επαρκούς προστασίας των υποβρύχιων επιφανειών, όπως της γάστρας, των εξαρτημάτων και της προπέλας.

3.13.1 Καθοδική προστασία κατά την διάρκεια τελικών δοκιμών

Ανάλογα με τον τύπο του πλοίου, η περίοδος των τελικών δοκιμών πριν την παράδοση του πλοίου στον πλοιοκτήτη μπορεί να διαρκέσει πολλές εβδομάδες ή ακόμα και μήνες. Οι συνθήκες στις προβλήτες δοκιμών (*fitting out berths*) στα ναυπηγεία ευνοούν ιδιαίτερα την εμφάνιση διάβρωσης, κάτι το οποίο δημιουργεί την ανάγκη για εφαρμογή καθοδικής προστασίας, ώστε να εξασφαλίζεται η πρόληψη της διάβρωσης και κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου. (ABS, 2017)

Όταν πρόκειται να εφαρμοστεί ένα σύστημα καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενο ρεύμα (*ICCP*), τότε κατά την περίοδο των δοκιμών θα πρέπει να τοποθετηθούν προσωρινές θυσιαζόμενες άνοδοι (Εικόνα 32) πριν εγκατασταθεί ή ενεργοποιηθεί το μόνιμο σύστημα ICCP.



Εικόνα 32: Σχηματική απεικόνιση της προσωρινής τοποθέτησης θυσιαζόμενων ανόδων. (Πηγή: ABS, 2017)

Οι προσωρινές γαλβανικές άνοδοι, οι οποίες αναρτώνται στις πλευρές του πλοίου, πρέπει να συνδέονται ηλεκτρικά με αυτό. Επιπλέον αυτές οι άνοδοι πρέπει να είναι επαρκείς, ώστε να παρέχουν επαρκή πόλωση και το δυναμικό της γάστρας να διατηρείται και να παραμένει σε ικανοποιητικό επίπεδο. (ABS, 2017)

3.13.2 Καθοδική προστασία κατά την διάρκεια ακινησίας

Κατά την περίοδο που το πλοίο βρίσκεται σε αγκυροβόλιο για ένα χρονικό διάστημα, τότε η επιλογή ανάμεσα σε αναρτημένες γαλβανικές ανόδους και ένα εξωτερικό σύστημα τροφοδοσίας που παρέχεται από την ακτή θα εξαρτηθεί από την ευκολία προσβασιμότητας της πηγής ισχύος. (ABS, 2017)

Στην περίπτωση που το πλοίο βρίσκεται μόνιμα σε αγκυροβόλιο, η καθοδική προστασία μπορεί να παρέχεται με την τοποθέτηση θυσιαζόμενων ανόδων ή με την τοποθέτηση ανόδων επιβαλλόμενου ρεύματος στον πυθμένα του πλοίου εντός της θάλασσας, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει αρκετή απόσταση μεταξύ των ανόδων και της καρίνας κατά την άμπωτη (*low tide*) για να αποφευχθεί τυχόν βλάβη στην βαφή του πλοίου. (ABS, 2017)

Επιπλέον, τα πλοία που είναι στάσιμα για μεγάλα χρονικά διαστήματα ενδέχεται να προσβληθούν από θαλάσσια ρύπανση (βιοσυσσώρευση), που θα προκαλέσει μικροβιακή διάβρωση. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μπορούν να εφαρμοστούν τα κριτήρια προστασίας για

αναερόβιες συνθήκες, με ελάχιστο δυναμικό προστασίας -0.9 V και μέγιστο αρνητικό δυναμικό -1.1 V έναντι του ηλεκτροδίου αναφοράς Ag/AgCl. Η αρχική ρύθμιση της τιμής του ρεύματος απαιτεί δύο ή τρεις επιθεωρήσεις του δυναμικού καθοδικής προστασίας σε διαστήματα μερικών ημερών. Στη συνέχεια η επιθεώρηση μπορεί να γίνεται σε διαστήματα αρκετών μηνών, υπό την προϋπόθεση ότι οι συνθήκες του νερού παραμένουν σταθερές και η λειτουργία του συστήματος καθοδικής προστασίας είναι σταθερή. Τέλος θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η εγγύτητα άλλων σκαφών ή κατασκευών, οπότε θα πρέπει να γίνονται δοκιμές για τυχόν αλληλεπιδράσεις. (ABS, 2017)

3.14 Αποφυγή αλληλεπίδρασης του συστήματος

Γενικά, η δοκιμή για αλληλεπιδράσεις δεν απαιτείται να πραγματοποιείται στα πλοία, λόγω της συχνής λειτουργίας και της συνεχούς κίνησής τους. Ωστόσο, εάν ένα πλοίο είναι ή ελλιμενισμένο για μεγάλες ή επαναλαμβανόμενες περιόδους δίπλα σε χαλύβδινες αποβάθρες ή προβλήτες, συνιστάται η διεξαγωγή δοκιμών αλληλεπίδρασης προκειμένου να αποδειχθεί ότι οι παρακείμενες κατασκευές δεν επηρεάζονται αρνητικά από το σύστημα καθοδικής προστασίας. Εάν διαπιστωθούν οποιεσδήποτε αλλαγές στη γειτονική δομή ή το δυναμικό του ηλεκτρολύτη μεγαλύτερες από τις επιτρεπόμενες, πρέπει να διερευνώνται και να διορθώνονται.

Οι γειτονικές κατασκευές που διαθέτουν σύστημα καθοδικής προστασίας δεν πρέπει να αλλάζουν τα επίπεδα προστασίας τους πέρα από τα όρια που υποδεικνύονται, ενώ οι γειτονικές κατασκευές που δεν διαθέτουν καθοδική προστασία δεν θα πρέπει να παρουσιάζουν μεταβολές στο δυναμικό διάβρωσής τους μεγαλύτερες από $+20$ mV.

Τέλος, εάν ένα πλοίο βρίσκεται παραπλεύρως ή ελλιμενισμένο για μεγάλα χρονικά διαστήματα δίπλα σε προβλήτα που προστατεύεται με σύστημα καθοδικής προστασίας, συνιστάται η διεξαγωγή δοκιμών αλληλεπίδρασης του συστήματος καθοδικής προστασίας για τον προσδιορισμό των τυχόν επιπτώσεων στην γάστρα του πλοίου από το παρακείμενο σύστημα. (European Standard, 2012)

3.15 Καταγραφή δεδομένων του συστήματος καθοδικής προστασίας

Ο σχεδιασμός, η εγκατάσταση, η ενεργοποίηση, η έναρξη και η συνέχιση της λειτουργίας, καθώς και η τεκμηρίωση των συστημάτων καθοδικής προστασίας πρέπει να καταγράφονται πλήρως και σε μόνιμη βάση. Η καταγραφή αυτή θα πρέπει να περιλαμβάνει όλα τα δεδομένα που σχετίζονται με το σχεδιασμό, και όλες τις πληροφορίες σχετικά με το σύστημα καθοδικής προστασίας, την εγκατάσταση, τη θέση, τη λειτουργία και τη συντήρηση του συστήματος αυτού. (ABS, 2017)

Η αρχική τεκμηρίωση εγκατάστασης πρέπει να περιλαμβάνει την πιο πρόσφατη αναθεώρηση ή οποιαδήποτε αλλαγή στις προδιαγραφές σχεδιασμού, συμπεριλαμβανομένων των θέσεων του εξοπλισμού, της ισάλου γραμμής κ.λπ.

Τα δεδομένα που αφορούν τη θέση λειτουργίας του συστήματος καθοδικής προστασίας πρέπει να περιλαμβάνουν αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν μετά

την ενεργοποίηση κάθε ζώνης καθοδικής προστασίας, συμπεριλαμβανομένων των παρακάτω (ABS, 2017):

- Δεδομένα από μετρήσεις του δυναμικού της κατασκευής που χρήζει προστασίας.
- Δοκιμές σχετικά με την αλληλεπίδραση του συστήματος καθοδικής προστασίας με παρακείμενες κατασκευές.

Επιπλέον τα ακόλουθα δεδομένα πρέπει να καταγράφονται και να διατηρούνται ως αναφορά και στη συνέχεια να ενημερώνονται, όποτε γίνονται μεταβολές στο σύστημα (ABS, 2017):

- 1) Τα κριτήρια σχεδιασμού που περιλαμβάνουν τη διάρκεια ζωής του συστήματος, τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος (όπως το εύρος των τιμών αλατότητας και την ειδική αντίσταση του νερού), τα κριτήρια προστασίας, την πυκνότητα ρεύματος, τις τιμές του ρεύματος εξόδου των ανόδων, τη σχετική τάση εξόδου τροφοδοσίας στη μέγιστη και ελάχιστη αναμενόμενη τιμή ρεύματος σύμφωνα με το σχεδιασμό και τον υπολογισμό του μέγιστου βαθμού διάσπασης της επίστρωσης.
- 2) Ο αριθμός και οι προδιαγραφές των ανοδίων, συμπεριλαμβανομένων των διαστάσεών τους, της σύστασής τους, των λεπτομερειών σύνδεσης, των πυκνοτήτων και των τιμών του ρεύματος που παρέχουν, της μέγιστης, μέσης, και ελάχιστης διάρκειας ζωής τους, καθώς επίσης τα στοιχεία και η τεκμηρίωση του κατασκευαστή/προμηθευτή.
- 3) Οι λεπτομέρειες προσάρτησης των ανοδίων και των ηλεκτροδίων αναφοράς, καθώς και οι προδιαγραφές των καλωδίων σύνδεσης και των λοιπών διατάξεων στην γάστρα του πλοίου.
- 4) Η θέση κάθε ανόδου και ηλεκτροδίου αναφοράς, όπως επιβεβαιώθηκε κατά την κατασκευή, όλες οι αποκλίσεις από την προτεινόμενη θέση κατά το σχεδιασμό και την ημερομηνία εγκατάστασης. Αυτά τα δεδομένα θα πρέπει να ενημερώνονται κατά τη διάρκεια ζωής του πλοίου.
- 5) Οι προδιαγραφές οποιασδήποτε διηλεκτρικής θωράκισης που τυχόν χρησιμοποιείται, συμπεριλαμβανομένης της θέσης, των διαστάσεων, της προετοιμασίας της επιφάνειας, του υλικού, του πάχους ξηρής μεμβράνης της επίστρωσης και των δεδομένων επιθεώρησης που καταγράφηκαν κατά την εγκατάσταση όλων των διηλεκτρικών ασπίδων.
- 6) Η θέση, οι λεπτομερείς προδιαγραφές, τα σχέδια, τα διαγράμματα κυκλωμάτων και τα χαρακτηριστικά εξόδου κάθε πηγής ισχύος συνεχούς ρεύματος (όπως η μονάδα ανορθωτή/μετασχηματιστή) με τις εργοστασιακές εκθέσεις δοκιμών τους.
- 7) Η θέση, η περιγραφή και οι προδιαγραφές οποιουδήποτε συστήματος παρακολούθησης και ελέγχου απόδοσης, ηλεκτρικών συσκευών προστασίας (ασφάλειες, διακόπτες κυκλώματος κ.λπ.), εξοπλισμού μέτρησης και καλωδίων σύνδεσης.
- 8) Τα αποτελέσματα θέσης σε λειτουργία, συμπεριλαμβανομένης της μέτρησης δυναμικού ηλεκτροδίου αναφοράς χάλυβα/θαλασσινού νερού από σταθερά ηλεκτρόδια αναφοράς, η αντιπροσωπευτική επιθεώρηση ολόκληρης της κατασκευής με χρήση φορητών ηλεκτροδίων αναφοράς, οι τιμές ρεύματος και

τάσης εξόδου κάθε πηγής ισχύος συνεχούς ρεύματος, οι μετρήσεις βαθμονόμησης για κάθε σταθερό ηλεκτρόδιο αναφοράς και η τυχόν προσαρμογή για μη αυτόματες συσκευές.

- 9) Τα αποτελέσματα της περιοδικής επιθεώρησης συντήρησης περιλαμβάνουν τις τιμές δυναμικού ηλεκτροδίου αναφοράς χάλυβα/θαλασσινού νερού, τις τιμές εξόδου συνεχούς ρεύματος, τα δεδομένα συντήρησης στις μονάδες ανορθωτή/μετασχηματιστή και περιόδους διακοπής λειτουργίας, προκειμένου να παρακολουθούνται οι αλλαγές της κατάστασης του συστήματος καθοδικής προστασίας για την κατασκευή.
- 10) Ένα εγχειρίδιο λειτουργίας και συντήρησης (*manual*) που περιγράφει λεπτομερώς το ενσωματωμένο σύστημα, τις διαδικασίες επιθεώρησης και δοκιμών, τα διαστήματα επιθεώρησης και δοκιμών και έναν οδηγό επίλυσης σφαλμάτων.

3.16 Υπολογιστικές μέθοδοι για τον σχεδιασμό καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενο ρεύμα

Οι διαδικασίες σχεδιασμού καθοδικής προστασίας είναι συνήθως εμπειρικές, ή μπορεί να βασίζονται σε εμπειρικά στοιχεία τα οποία λαμβάνονται από βάση δεδομένων. Ωστόσο, δεν πρέπει να θεωρούνται ως η απόλυτη ή η μοναδική μεθοδολογία.

3.16.1 Υπολογισμός ρεύματος προστασίας

Ανάλογα με το τύπο του πλοίου, δηλαδή εάν πρόκειται για νεόκτιστο είτε βρίσκεται ήδη σε λειτουργία και με βάση τις συνθήκες λειτουργίας του, η απαιτούμενη πυκνότητα ρεύματος προστασίας δίνεται με βάση τον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 9):

Πίνακας 9: Απαιτούμενη πυκνότητα ρεύματος για διάφορα είδη πλοίων. (Πηγή: Botha, C., 2000)

| | New building mA/m ² | In service mA/m ² |
|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Ocean-going ships (SPC coated) | 10 | 15 |
| Other ocean-going ships | 12 | 15 |
| Coasters | 14 | 20 |
| Ro-Ro ferries | 14 | 20 |
| Trawlers | 22 | 24 |
| Kort nozzle tugs | 22 | 24 |
| Dredgers | 24 | 27 |
| Ice breakers | 25 | 30 |
| Tugs | 18 | 22 |

Για να προσδιοριστεί ο τύπος και ο αριθμός των ανοδίων που απαιτούνται, πρέπει να υπολογιστεί η βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας. Ένας προσεγγιστικός τρόπος υπολογισμού του εμβαδού της βρεχόμενης επιφάνειας (S) της γάστρας μπορεί να γίνει με βάση μαθηματικό τύπο, ο οποίος δίνεται (Botha, C., 2000) στη συνέχεια:

$$S = (1.8 * L_{BP} * D) + (L_{BP} * C_B * B) (m^2)$$

Όπου:

- L_{BP} είναι το μήκος μεταξύ καθέτων (m).
- D είναι το κοίλο του πλοίου (m).
- C_B είναι ο συντελεστής γάστρας.
- B πλάτος του πλοίου (m).

Τυπικές τιμές του συντελεστή γάστρας (C_B) για διάφορους τύπους πλοίων, δίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 10):

Πίνακας 10: Τυπικές τιμές του συντελεστή γάστρας για διάφορους τύπους πλοίων. (Πηγή: Botha, C., 2000)

| Vessel type | Block coefficient |
|------------------|-------------------|
| Passenger vessel | 0,6 |
| Cargo vessel | 0,75 |
| Trawler | 0,55 |
| Coasters | 0,75 |
| Yachts | 0,4 - 0,5 |
| Tankers | 0,8 - 0,9 |
| Tugs | 0,6 |
| Naval vessels | 0,55 |
| Dredgers | 0,8 |
| Launches | 0,4 |

Με σκοπό την σχεδίαση του συστήματος, είναι απαραίτητο αρχικά να υπολογιστεί το ρεύμα που θα επιβληθεί στην κατασκευή για να επιτευχθεί καθοδική προστασία. Κατά τον προσδιορισμό του συνολικού ρεύματος που απαιτείται, όλες οι μεταλλικές επιφάνειες που είναι βυθισμένες στο θαλασσινό νερό (ηλεκτρολύτη) θα πρέπει να περιλαμβάνονται στον υπολογισμό.

Επομένως το συνολικό ρεύμα προστασίας (I_C) μπορεί να υπολογιστεί (Botha, C., 2000) ως εξής:

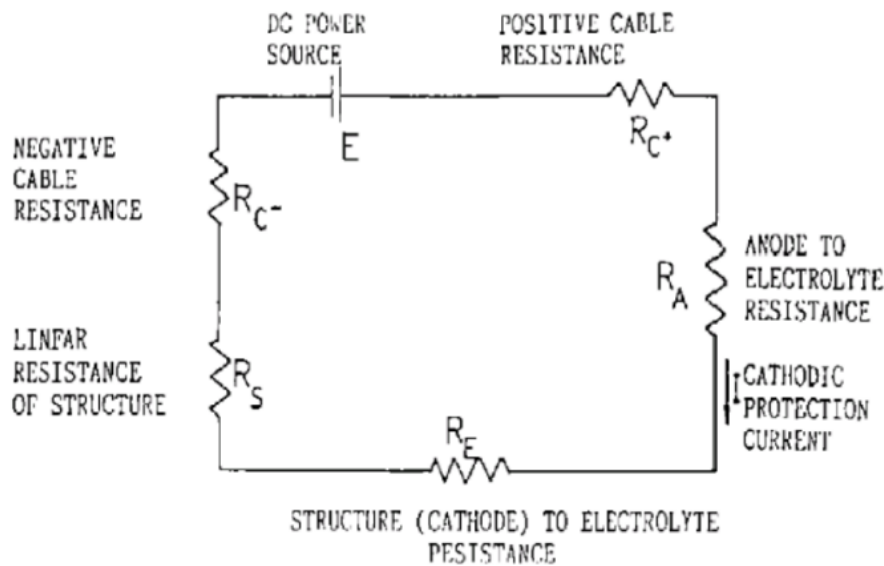
$$I_C = \frac{\text{Βρεχόμενη επιφάνεια (m}^2\text{)} * \text{Πυκνότητα ρεύματος (mA/m}^2\text{)}}{1000} \text{ (A)}$$

Στα συστήματα καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενο ρεύμα θα πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη για το ενδεχόμενο μιας λιγότερο αποδοτικής κατανομής ηλεκτρικού ρεύματος (λόγω μικρότερου αριθμού ανοδίων και παροχής υψηλότερης πυκνότητας ρεύματος). Για το λόγο αυτό, το σύστημα καθοδικής προστασίας θα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι, ώστε να μπορεί να παρέχει ρεύμα (I_T) τουλάχιστον κατά 25% μεγαλύτερο από το υπολογιζόμενο συνολικό ρεύμα προστασίας (I_C), ανάλογα με τη γεωμετρία και το είδος της επίστρωσης της κατασκευής. (European Standard, 2012)

$$I_T \geq 1.25 * I_C$$

3.16.2 Συνολική αντίσταση του κυκλώματος

Ένα σύστημα καθοδικής προστασίας επιβαλλόμενου ρεύματος (Εικόνα 33) μπορεί να περιγραφεί με το ακόλουθο απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα:



Εικόνα 33: Σχηματική απεικόνιση ισοδύναμου κυκλώματος καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενο ρεύμα. (Πηγή: IPS, 1997)

Στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 33) φαίνεται η ολική αντίσταση του κυκλώματος, η οποία αποτελείται από 5 αντιστάσεις συνδεδεμένες μεταξύ τους σε σειρά. Οι αντιστάσεις αυτές αναλύονται παρακάτω. (IPS, 1997)

3.16.2.1 Η αντίσταση των καλωδίων σύνδεσης (R_C^+ και R_C^-)

Τα καλώδια συνδέονται με τον θετικό και τον αρνητικό πόλο της μονάδας τροφοδοσίας. Η αντίσταση των καλωδίων σύνδεσης (R_C^+ και R_C^-) εξαρτάται από το μήκος, την διατομή και την ειδική αντίσταση του αγωγού και μπορεί να υπολογισθεί σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$R_C = \rho * \frac{L}{A} (\Omega)$$

Όπου:

- ρ είναι η ειδική αντίσταση του αγωγού ($\Omega \cdot m$).
- L είναι το μήκος του αγωγού (m).
- A είναι η διατομή του αγωγού (m^2)

3.16.2.2 Η αντίσταση καθόδου ως προς τον ηλεκτρολύτη (R_E)

Η αντίσταση της καθόδου που βυθίζεται στον ηλεκτρολύτη υπολογίζεται σύμφωνα με τον νόμο του Ohm:

$$R_E = \frac{E}{I_T} (\Omega)$$

Όπου:

- E είναι η μεταβολή δυναμικού της δομής σε σχέση με τον ηλεκτρολύτη ώστε να επιτευχθεί καθοδική προστασία (συνήθως 1/3 με 1 V).
- I_T είναι το συνολικό ρεύμα προστασίας που απαιτείται (A).

3.16.2.3 Η αντίσταση ανόδων ως προς τον ηλεκτρολύτη

Η αντίσταση μιας ανόδου είναι συνάρτηση της ειδικής αντίστασης του ηλεκτρολύτη, καθώς επίσης της φύσης και της γεωμετρίας της (υλικό, μορφή και διαστάσεις). Ο υπολογισμός της αντίστασης (R_A) γίνεται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις (ABS, 2017):

Άνοδοι τύπου slender anodes (λεπτές άνοδοι) τοποθετημένες τουλάχιστον 0.1 m από την επιφάνεια της γάστρας:

Για $L \geq 4r$

$$R_A = \frac{\rho}{2 * \pi * L} * \left[\ln \left(\frac{4 * L}{r} \right) - 1 \right] \Omega$$

όπου:

- Το L είναι το μήκος της ανόδου (m)
- Το r είναι η ακτίνα της ανόδου (m)
- Το ρ είναι η ειδική αντίσταση του ηλεκτρολύτη ($\Omega * m$)

Για $L < 4r$

$$R_A = \frac{\rho}{2 * \pi * L} * \left[\ln \left(\frac{2 * L}{r} * \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2 * L} \right)^2} \right) + \frac{r}{2 * L} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2 * L} \right)^2} \right) \right] \Omega$$

Άνοδοι τύπου long anodes (μακριές επίπεδες άνοδοι) ενσωματωμένες στην επιφάνεια της γάστρας με $L \geq 4 \times \text{πλάτος}$ & $L \geq 4 \times \text{πάχος}$

$$R_A = \frac{\rho}{2 * S} \Omega$$

όπου:

- Το ρ είναι η ειδική αντίσταση του ηλεκτρολύτη ($\Omega * m$)
- Το S παριστάνει τον αριθμητικό μέσο όρο μήκους και πλάτους ανόδου (m)

Άνοδοι τύπου short flat plate (κοντή επίπεδη άνοδος) ενσωματωμένη στην επιφάνεια της γάστρας με $L < 4 \times \text{πλάτος}$

$$R_A = 0.315 * \frac{\rho}{\sqrt{A}} \Omega$$

όπου:

- Το ρ είναι η ειδική αντίσταση του ηλεκτρολύτη ($\Omega * m$)
- Το A συμβολίζει την εκτεθειμένη επιφάνεια της ανόδου (m^2)

3.16.2.4 Η αντίσταση της δομής (R_S)

Η αντίσταση της δομής στην περίπτωση των πλοίων μπορεί να αγνοηθεί, καθώς είναι αμελητέα. Σε περιπτώσεις άλλων εφαρμογών, όπου το μήκος της κατασκευής είναι πολλαπλάσιο της διατομής τους, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση της προστασίας σωληνώσεων ή προβλητών, τότε η παραπάνω αντίσταση πρέπει να υπολογίζεται. (IPS, 1997)

3.16.2.5 Υπολογισμός της συνολικής αντίστασης του κυκλώματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι αντιστάσεις είναι συνδεδεμένες σε σειρά και επομένως, για τη ολική αντίσταση του κυκλώματος (R_T) ισχύει ότι:

$$R_T = R_{C^+} + R_{C^-} + R_E + R_A + R_S (\Omega)$$

Όπου:

- R_T συμβολίζει την ολική αντίσταση του κυκλώματος (Ω)
- R_{C^+} και R_{C^-} συμβολίζουν τις αντιστάσεις των καλωδίων σύνδεσης στον θετικό και στον αρνητικό πόλο αντίστοιχα της μονάδας τροφοδοσίας (Ω)
- R_E συμβολίζει την αντίσταση καθόδου στον ηλεκτρολύτη (Ω)
- R_A συμβολίζει την αντίσταση ανόδου στον ηλεκτρολύτη (Ω)
- R_S συμβολίζει την αντίσταση της δομής (Ω)

3.16.3 Απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς και τάση εξόδου της μονάδας τροφοδοσίας

Η απαιτούμενη τάση εξόδου που πρέπει να επιβάλλεται από την μονάδα ανορθωτή/μετασχηματιστή (V_r) υπολογίζεται σύμφωνα με τον νόμο του Ohm:

$$V_r = I_T * R_T (V)$$

Όπου:

- I_T είναι η ένταση του ολικού ρεύματος που παρέχεται (A).
- R_T είναι η ολική αντίσταση του κυκλώματος (Ω).

Αντίστοιχα, η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς (P) που πρέπει να παρέχει η μονάδα τροφοδοσίας υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$P = V_r * I_T (W)$$

Όπου:

- V_r είναι η τάση εξόδου της μονάδας τροφοδοσίας (V).
- I_T είναι η ένταση του ολικού ρεύματος που παρέχεται (A).

Στο εμπόριο διατίθεται πληθώρα μονάδων ανορθωτών/μετασχηματιστών και για ένα σύστημα καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενο ρεύμα θα πρέπει να επιλέγεται η κατάλληλη, η οποία πληροί τις απαιτήσεις, όσον αφορά την τάση εξόδου και την ηλεκτρική ισχύ.

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Σχεδιασμός συστημάτων ICCP στα πλοία

Ο σχεδιασμός συστημάτων καθοδικής προστασίας με επιβολή εξωτερικής τάσης για πλοία είναι ένα σύνθετο έργο που παρουσιάζει διάφορες προκλήσεις. Αρχικά πρέπει να ληφθούν υπόψη όχι μόνο οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υλικών αλλά και οι συνθήκες λειτουργίας, οι οριακές συνθήκες, η βιολογική ρύπανση, οι περιβαλλοντικοί παράγοντες και η γεωμετρική πολυπλοκότητα του πλοίου, γεγονός που καθιστά δύσκολο τον σχεδιασμό με βάση κανόνες ή εμπειρία του παρελθόντος. Για τους παραπάνω λόγους για το σχεδιασμό συστημάτων ICCP χρησιμοποιούνται πειραματικά (experimental) και υπολογιστικά (computational) μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά, είναι απλοποιημένες αναπαραστάσεις της πραγματικής δομής του πλοίου. Στις περισσότερες περιπτώσεις η ακρίβεια και των πειραματικών και υπολογιστικών μεθόδων εξαρτάται από το κατά πόσο αυτές οι μέθοδοι μπορούν να αναπαραστήσουν και να αποδώσουν πιστά την κατασκευή όπως είναι στην πραγματικότητα.

Η μοντελοποίηση είναι μια μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός συστήματος καθοδικής προστασίας και της σημασίας των επιμέρους παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος. Κάθε τύπος μοντελοποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα διαφορετικό μέσο για την αναπαραστάση ενός πραγματικού συστήματος. Αυτό που έχει ιδιαίτερη σημασία σε αυτή την περίπτωση δεν είναι μόνο η τεχνική και θεωρητική προσέγγιση της τεχνικής μοντελοποίησης, αλλά κυρίως η καλή γνώση και η κατανόηση του συστήματος της πραγματικής δομής που πρόκειται να μοντελοποιηθεί, καθώς και της συμπληρωματικής τεχνικής μοντελοποίησης που ενδέχεται να χρησιμοποιηθεί. Όσο καλύτερα γίνεται κατανοητό το πραγματικό σύστημα, τόσο καλύτερες είναι οι επιλογές που μπορούν να γίνουν ακολουθώντας ακόμα και τις πιο απλές τεχνικές μοντελοποίησης. (DeGiorgi V.G., et al, 2005)

4.1 Πειραματική μοντελοποίηση

Η μοντελοποίηση φυσικής κλίμακας (Physical Scale Modeling – PSM) είναι μία τεχνική που βασίζεται στη Φυσική και εφαρμόζεται για το σχεδιασμό συστημάτων ICCP σε πλοία. Η τεχνική PSM χρησιμοποιεί φυσικά μοντέλα μικρής κλίμακας (Εικόνα 34, 35) και παραμέτρους κλιμάκωσης που βασίζονται στη Φυσική της ηλεκτροχημικής απόκρισης, οπότε μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις τιμές του ρεύματος και του δυναμικού στην δομή του πλοίου. (DeGiorgi V.G., et al, 2005)



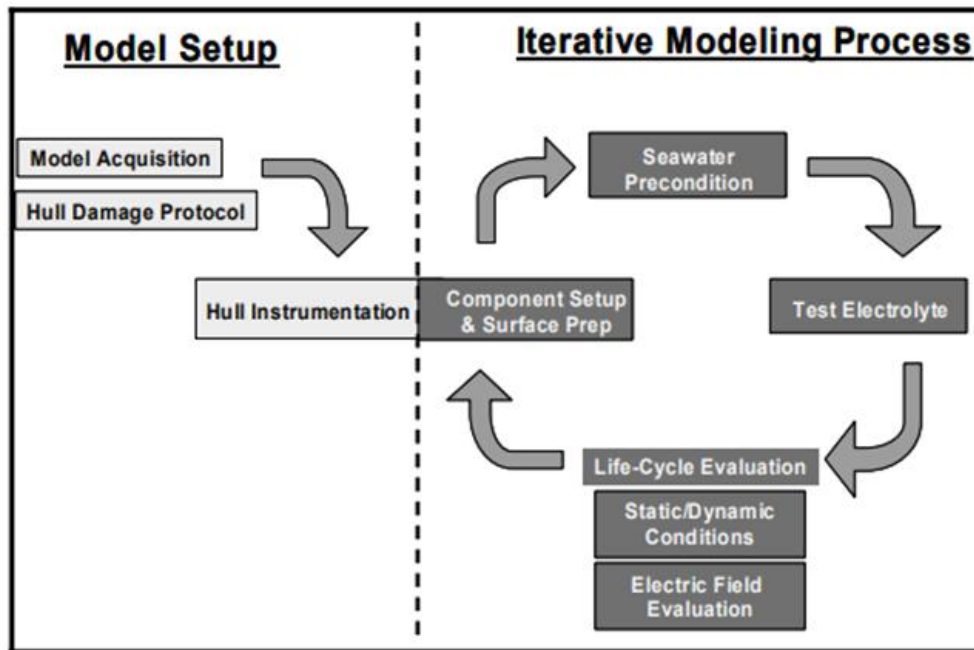
Εικόνα 34: Παράδειγμα ενός μοντέλου μικρής κλίμακας που χρησιμοποιείται στη μοντελοποίηση φυσικής κλίμακας. (Πηγή: Arendt, H.F., 2005).



Εικόνα 35: Παράδειγμα ενός μοντέλου μικρής κλίμακας που χρησιμοποιείται στη μοντελοποίηση φυσικής κλίμακας. (Πηγή: DeGiorgi, V.G., & Hogan, E. A., 2005)

Αυτός ο τύπος μοντελοποίησης αποτελεί μια πρακτική προσέγγιση του συστήματος και μπορεί να προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για την απόδοση του. Η πειραματική μέθοδος μοντελοποίησης περιλαμβάνει τα εξής στάδια (Εικόνα 36):

- Δημιουργία Μοντέλου: Δημιουργείται ένα μοντέλο σε μικρή κλίμακα, ως αντίγραφο του κύτους του πλοίου. Αυτό το μοντέλο μπορεί να κατασκευαστεί από μέταλλο ή άλλα υλικά παρόμοια με αυτά που είναι κατασκευασμένο το πραγματικό πλοίο .
- Τοποθέτηση και διαμόρφωση ανόδων: Οι άνοδοι τοποθετούνται στο μοντέλο φυσικής κλίμακας σε σημεία που αντιστοιχούν στις θέσεις στις οποίες θα βρίσκονταν στο πραγματικό πλοίο. Ο τύπος και ο αριθμός των ανοδίων επιλέγονται ώστε να ταιριάζουν με το σχεδιασμό του συστήματος ICCP.
- Προσομοίωση ηλεκτρολυτών: Θαλασσινό νερό ή ένας άλλος αγώγιμος ηλεκτρολύτης εισάγεται γύρω από το μοντέλο αναπαριστώντας τη βύθιση του πλοίου στη θάλασσα.
- Εφαρμογή ρεύματος: Εφαρμόζεται ηλεκτρικό ρεύμα στις ανόδους, προσομοιώνοντας τη λειτουργία του συστήματος ICCP. Στόχος είναι η παροχή καθοδικής προστασίας στη δομή του μοντέλου.
- Μέτρηση και ανάλυση: Τοποθετούνται αισθητήρες στην επιφάνεια του μοντέλου για να ληφθούν μετρήσεις από παράγοντες, όπως η τάση, το ρεύμα και ο ρυθμός διάβρωσης. Αυτές οι μετρήσεις είναι καθοριστικές για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος για την πρόληψη της διάβρωσης στη δομή του μοντέλου.
- Προσαρμογή συστήματος: Πραγματοποιούνται προσαρμογές στο σύστημα καθοδικής προστασίας σε πραγματικό χρόνο ή μετά από μια σειρά δοκιμών για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης. Αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν αλλαγή της διαμόρφωσης της ανόδου, προσαρμογή των τιμών του ρεύματος ή τοποθέτηση των ανοδίων σε νέες θέσεις για την επίτευξη ομοιόμορφης προστασίας.
- Περιβαλλοντικοί Παράγοντες: Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μοντέλα φυσικής κλίμακας για τη δοκιμή του συστήματος ICCP υπό διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως σε μεταβαλλόμενες συνθήκες αλατότητας του νερού, της θερμοκρασίας και του pH, για να γίνει πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος σε διαφορετικά σενάρια.
- Παρακολούθηση διάβρωσης: Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μελέτη της εξέλιξης της διάβρωσης στη δομή με την πάροδο του χρόνου για να αξιολογηθεί η απόδοση του συστήματος προστασίας ICCP.
- Επιλογή υλικού και ανόδου: Το μοντέλο επιτρέπει τη δοκιμή διαφορετικών υλικών για την κατασκευή των ανόδων και του πλοίου για τον προσδιορισμό του πιο αποτελεσματικού συνδυασμού τους όσον αφορά την προστασία του πλοίου από τη διάβρωση.
- Επαλήθευση της αποτελεσματικότητας του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες: Τα δεδομένα που συλλέγονται κατά τη μοντελοποίηση φυσικής κλίμακας μπορούν να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για το πώς θα αποδώσει το σύστημα ICCP στο πραγματικό περιβάλλον του πλοίου.



Εικόνα 36: Σχηματικό διάγραμμα της τεχνικής PSM (Πηγή: DeGiorgi et al, 2005).

Η τεχνική PSM είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για το σχεδιασμό συστημάτων ICCP στα πλοία, επειδή παρέχει ένα απτό και ελεγχόμενο περιβάλλον για τη μελέτη και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος. Διεξάγοντας πειράματα σε μια μικρής κλίμακας αναπαράσταση του κύτους του πλοίου χρήσιμες πρακτικές γνώσεις μπορούν να αποκτηθούν και να ληφθούν τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με το σχεδιασμό και τη διαμόρφωση του συστήματος ICCP, διασφαλίζοντας αποτελεσματική αντιδιαβρωτική προστασία για το πραγματικό πλοίο.

4.1.1 Μεθοδολογία σχεδιασμού μοντέλου φυσικής κλίμακας

Ο σχεδιασμός συστημάτων ICCP μέσω της τεχνικής PSM, όσο και των υπολογιστικών τεχνικών ακολουθεί τον νόμο του Ohm (DeGiorgi, V.G., & Hogan, E. A., 2005):

$$E = I * (R_p + R_{OHMIC})$$

Όπου:

- Το E εκφράζει το δυναμικό (V)
- Το I εκφράζει το ρεύμα (A)
- Το R_p αναπαριστά την αντίσταση πόλωσης (Ω)
- Το R_{OHMIC} αναπαριστά την ωμική αντίσταση ηλεκτρολύτη (Ω), οπότε ισχύει:

$$R_{OHMIC} = \frac{\rho * L}{A}$$

- Το ρ εκφράζει την ειδική αντίσταση ηλεκτρολύτη ($\Omega \cdot m$)
- Το L εκφράζει το μήκος πλοίου ή μοντέλου (m)
- Το A αναπαριστά το εμβαδόν επιφάνειας (m^2).

Για την κατασκευή ενός φυσικού μοντέλου του πλοίου χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί κατάλληλη παράμετρος που εκφράζει με ακρίβεια την κλίμακα μεταξύ του μοντέλου και της πραγματικής δομής του πλοίου. Αυτή η παράμετρος είναι ο συντελεστής κλιμάκωσης (k) που υπολογίζεται από την σχέση:

$$\frac{L_S}{L_M} = k$$

Όπου:

- Το L_S είναι το μήκος του πλοίου (m).
- Το L_M είναι το μήκος του μοντέλου (m).

Η σχέση αυτή υποδηλώνει ότι το μήκος του μοντέλου πρέπει να υπολογιστεί με βάση την κλίμακα λαμβάνοντας υπόψη τον παράγοντα k για να αναπαραστήσει σωστά το πραγματικό πλοίο. Ο συντελεστής κλιμάκωσης βοηθάει στη διασφάλιση ότι το μοντέλο αντικατοπτρίζει σε ορισμένη κλίμακα και με ορθό τρόπο τα χαρακτηριστικά της πραγματικής δομής του πλοίου.

Για τον ακριβή υπολογισμό της κλιμάκωσης είναι επιθυμητό να ληφθούν υπόψη οι σχέσεις:

$$E_{SHIP} = E_{MODEL}$$

$$i_{SHIP} = i_{MODEL}$$

- όπου το E εκφράζει το δυναμικό (V)
- Το i εκφράζει την πυκνότητα ρεύματος (A/m^2)

Σε μια σχέση όπου:

$$E_{SHIP} = I_S * \left(\rho_S * \frac{L_S}{A_S} \right) = i_S * (\rho_S * L_S)$$

$$E_{MODEL} = I_M * \left(\rho_M * \frac{L_M}{A_M} \right) = i_M * (\rho_M * L_M)$$

Όπου:

- Το E_{SHIP} και E_{MODEL} εκφράζει το δυναμικό του πλοίου και του μοντέλου αντίστοιχα (V)
- Το I_S και I_M εκφράζει το ρεύμα στο πλοίο και στο μοντέλο αντίστοιχα (A)
- Το ρ_S και ρ_M εκφράζει την ειδική αντίσταση ηλεκτρολύτη που βυθίζεται το πλοίο και την ειδική αντίσταση ηλεκτρολύτη που βυθίζεται το μοντέλο αντίστοιχα ($\Omega \cdot m$)
- Το A_S και A_M εκφράζει το εμβαδόν επιφάνειας του πλοίου και του μοντέλου αντίστοιχα (m^2)
- Το i_S και i_M εκφράζει την πυκνότητα ρεύματος για το πλοίο και το μοντέλο αντίστοιχα (A/m^2)

Για την ακριβή κλιμάκωση του μοντέλου πρέπει να ισχύει:

$$R_{P(SHIP)} = R_{P(MODEL)}$$

- Το $R_{P(SHIP)}$ εκφράζει την αντίσταση πόλωσης του πλοίου (Ω)
- Το $R_{P(MODEL)}$ εκφράζει την αντίσταση πόλωσης του μοντέλου (Ω)

Για τα μοντέλα σε μικρή κλίμακα επίσης ισχύει:

$$\rho_M = \rho_S * k$$

- Το ρ_S και ρ_M εκφράζει την ειδική αντίσταση ηλεκτρολύτη που βυθίζεται το πλοίο και την ειδική αντίσταση ηλεκτρολύτη που βυθίζεται το μοντέλο αντίστοιχα ($\Omega * m$)
- Το k εκφράζει τον συντελεστή κλιμάκωσης

Στην συνέχεια η σχέση γίνεται:

$$E_{SHIP} = E_{MODEL} = i_S * (\rho_S * L_M) * (k) = i_M * (\rho_S * L_M) * (k)$$

$$i_S = i_M$$

Για την μέτρηση του ολικού ρεύματος του μοντέλου του πλοίου, από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι:

$$I_S = I_M * k^2$$

- Το I_S και I_M εκφράζει το ρεύμα στο πλοίο και στο μοντέλο αντίστοιχα (A)
- Το k εκφράζει τον συντελεστή κλιμάκωσης

Οι βασικές παραδοχές στην εξαγωγή της διαδικασίας μοντελοποίησης χρησιμοποιούνται για τον ακριβή υπολογισμό του δυναμικού και του ρεύματος προστασίας για το μοντέλο με βάση τις παραπάνω μαθηματικές σχέσεις μεταξύ του μοντέλου και του πραγματικού πλοίου, όπως εξηγείται στη συνέχεια (DeGiorgi, V.G., & Hogan, E. A., 2005):

- Η πρώτη παραδοχή περιγράφει ότι όταν οι επιφάνειες και η γεωμετρία τους είναι ακριβείς και υπολογισμένες υπό κλίμακα, τότε ισχύει: $A_{SHIP} = A_{MODEL} * (k)^2$. Αυτό σημαίνει ότι οι διαστάσεις του μοντέλου αντιστοιχούν με ακρίβεια στις διαστάσεις του πραγματικού πλοίου, λαμβάνοντας υπόψη τον συντελεστή κλιμάκωσης k .
- Η δεύτερη παραδοχή αναφέρει ότι για την πυκνότητα ρεύματος ισχύει εξ ορισμού η σχέση: $i_{SHIP} = i_{MODEL}$ όταν τα μεγέθη που αναφέρονται στα χαρακτηριστικά του μοντέλου, την αραιότητα του ηλεκτρολύτη και την αντίσταση πόλωσης υπακούουν στον νόμο της κλιμάκωσης. Σε αυτή την περίπτωση, η ποσότητα ρεύματος προστασίας που ρέει προς το μοντέλο πρέπει να είναι ίση με την ποσότητα ρεύματος που ρέει στο πραγματικό πλοίο.
- Η τρίτη παραδοχή αφορά την αντίσταση πόλωσης $R_P = \Delta E / i_C$, η οποία πρέπει να είναι ίση για το μοντέλο και την πραγματική δομή του πλοίου, όπου το ΔE εκφράζει την διαφορά δυναμικού μεταξύ του E_{CORR} και του υπολογισμένου δυναμικού καθοδικής προστασίας $-0,8V$ (έναντι του $Ag/AgCl$ στο θαλασσινό νερό).

Ο σωστός υπολογισμός του μεγέθους του μοντέλου και της ωμικής αντίστασης του ηλεκτρολύτη είναι ζωτικής σημασίας. Επομένως, η σχέση $R_{P(SHIP)} = R_{P(MODEL)}$ είναι κρίσιμη για τους ακριβείς υπολογισμούς που ακολουθούν. Κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας του συστήματος καθοδικής προστασίας, τα μοντέλα βυθίζονται σε φυσικό θαλασσινό νερό (σε

δυναμικό $-0,85\text{ V}$ σε σχέση με το ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl). Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την ανάπτυξη της σωστής καθοδικής μεμβράνης (cathodic film) στις επιφάνειες των καθόδων, έτσι ώστε η απόκριση R_p να είναι ίδια με το κύτος πλήρους κλίμακας. Πειραματικά δεδομένα έδειξαν ότι η καθοδική μεμβράνη, που αποτίθεται κατά την τοποθέτηση του μοντέλου στον ηλεκτρολύτη, προκαλεί το συστατικό R_p να συμπεριφέρεται παρόμοια με το φυσικό θαλασσινό νερό. Αυτό επαληθεύει την ορθότητα της μαθηματικής σχέσης της κλιμάκωσης και επομένως, οι μετρήσεις που αφορούν το μοντέλο παρέχουν σωστές τιμές δυναμικού και κατάλληλα κλιμακούμενη τιμές ρεύματος. Επίσης, με αυτόν τον τρόπο το σύστημα προσαρμόζεται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας (π.χ. ταχύτητα, φθορά επιστρώσεων, αναλογίες ανόδου/κάθodos) εάν του δοθεί ο κατάλληλος χρόνος για την αποκατάσταση της δυναμικής ισορροπίας πριν την εφαρμογή και λειτουργία του συστήματος καθοδικής προστασίας. (DeGiorgi, V.G., & Hogan, E. A., 2005)

4.1.2 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα της χρήσης πειραματικής μοντελοποίησης

Η χρήση της πειραματικής μοντελοποίησης για τη σχεδίαση συστημάτων ICCP σε πλοία διαθέτει αρκετά ισχυρά πλεονεκτήματα, χωρίς ωστόσο να εξαλείφονται εντελώς οι αδυναμίες της μεθόδου.

Τα πλεονεκτήματα που εξασφαλίζει η χρήση πειραματικής μοντελοποίησης είναι:

1. Ρεαλιστική δοκιμή: Τα μοντέλα φυσικής κλίμακας παρέχουν μια πιο ρεαλιστική αναπαράσταση της δομής του πλοίου και μπορούν να αναπαραστήσουν πιστά τις γεωμετρικές πολυπλοκότητες που τυχόν υπάρχουν.
2. Άμεσες παρατηρήσεις: Μπορεί να παρατηρηθεί άμεσα ο τρόπος με τον οποίο το προτεινόμενο σύστημα ICCP αλληλεπιδρά με το φυσικό μοντέλο, παρέχοντας υψηλό επίπεδο εμπιστοσύνης στα αποτελέσματα.
3. Εμπειρικά δεδομένα: Η δοκιμή του μοντέλου φυσικής κλίμακας μπορεί να δώσει εμπειρικά δεδομένα για την απόδοση του συστήματος, τα οποία είναι πολύτιμα για την επικύρωση και τη λήψη αποφάσεων.
4. Περιβαλλοντική προσομοίωση: Τα μοντέλα φυσικής κλίμακας μπορούν να προσομοιώσουν μια σειρά από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η αλατότητα και το pH με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Τα μειονεκτήματα που έχουν αναφερθεί κατά την χρήση της πειραματικής μεθόδου σχεδίασης μοντέλων είναι:

1. Μεγαλύτερη δαπάνη: Η κατασκευή και η συντήρηση φυσικών μοντέλων μπορεί να είναι δαπανηρή, λόγω του κόστους των υλικών, της εργασίας και του εξοπλισμού.
2. Χρονοβόρα διαδικασία: Η δημιουργία και η εγκατάσταση φυσικών μοντέλων μπορεί να πάρει περισσότερο χρόνο σε σύγκριση με το σχεδιασμό και τη δημιουργία ενός υπολογιστικού μοντέλου.
3. Περιορισμένη ευελιξία: Μόλις κατασκευαστεί ένα φυσικό μοντέλο, η πραγματοποίηση αλλαγών στο σχέδιο μπορεί να είναι δύσκολη και δαπανηρή.

4. Ανησυχίες για την ασφάλεια: Οι εργασίες με το ηλεκτρικό ρεύμα όταν πραγματοποιούνται μέσα σε αλμυρό νερό μπορεί να δημιουργήσουν κινδύνους τόσο για την ασφάλεια του προσωπικού όσο και του εξοπλισμού.
5. Προβλήματα που σχετίζονται με την κλίμακα: Η χρήση της κλίμακας του κύτους ενός πλοίου και η κατασκευή ενός φυσικού μοντέλου μπορεί να εμφανίζει αποκλίσεις και να μην αναπαράγει τέλεια τη συμπεριφορά του πραγματικού πλοίου.

4.2 Υπολογιστική μοντελοποίηση

Η υπολογιστική μοντελοποίηση (computational modeling) για το σχεδιασμό ενός συστήματος καθοδικής προστασίας ενός πλοίου με επιβαλλόμενο ρεύμα (ICCP), περιλαμβάνει τη χρήση προσομοιώσεων με τη βοήθεια υπολογιστή και μαθηματικών μοντέλων που αφορούν την σχεδίαση, την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση του συστήματος ICCP. Η τεχνική υπολογιστικής μοντελοποίησης περιλαμβάνει τα εξής:

- Γεωμετρική αναπαράσταση: Το πρώτο βήμα είναι η δημιουργία ενός τρισδιάστατου γεωμετρικού μοντέλου της γάστρας του πλοίου. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει τη δομή του πλοίου, τα εξαρτήματα και τις περιοχές που είναι πιθανά πιο επιρρεπείς στη διάβρωση.
- Μαθηματική διατύπωση: Χρησιμοποιούνται μαθηματικές εξισώσεις και αλγόριθμοι για την αναπαράσταση των ηλεκτροχημικών και φυσικών διεργασιών που εμπλέκονται στο σύστημα ICCP.
- Οριακές συνθήκες: Ορίζονται οι οριακές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων των υλικών και των ιδιοτήτων του κύτους του πλοίου, των ιδιοτήτων των ανόδων, των χαρακτηριστικών του θαλασσινού νερού και των επιθυμητών κριτηρίων προστασίας.
- Υπολογιστικές μέθοδοι: Υπολογιστικές μέθοδοι, όπως η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method - FEM) ή η μέθοδος συνοριακών στοιχείων (Boundary Element Method - BEM), χρησιμοποιούνται για την επίλυση του συστήματος εξισώσεων που αντιπροσωπεύουν το σύστημα ICCP. Η μέθοδος FEM μοντελοποιεί ολόκληρο τον όγκο του κύτους του πλοίου, ενώ η μέθοδος BEM εστιάζει στο σύνορο (όρια) της κατασκευής του κύτους.
- Προσομοίωση της κατανομής του ρεύματος: Ο τρόπος κατανομής του ηλεκτρικού ρεύματος στην γάστρα προσομοιώνεται λαμβάνοντας υπόψη την έξοδο των ανόδων του συστήματος ICCP, την ειδική αντίσταση της δομής του πλοίου και τη γεωμετρία του πλοίου.
- Εκτίμηση δυναμικού και ρυθμού διάβρωσης: Το μοντέλο υπολογίζει το ηλεκτροχημικό δυναμικό σε διάφορα σημεία της γάστρας, επιτρέποντας την αξιολόγηση των επιπέδων προστασίας που μπορεί να παρέχει. Οι εκτιμήσεις του ρυθμού διάβρωσης γίνονται με βάση την κατανομή του δυναμικού, επιτρέποντας τον εντοπισμό των περιοχών που είναι επιρρεπείς στη διάβρωση.
- Βελτιστοποίηση σχεδίασης: Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του συστήματος ICCP. Αυτό περιλαμβάνει προσαρμογή διαφόρων παραμέτρων, όπως η τοποθέτηση ανόδου, η τιμή του ρεύματος εξόδου στην άνοδο και ο αριθμός των ανοδίων για να μπορεί να

εξασφαλιστεί ομοιόμορφη προστασία και να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

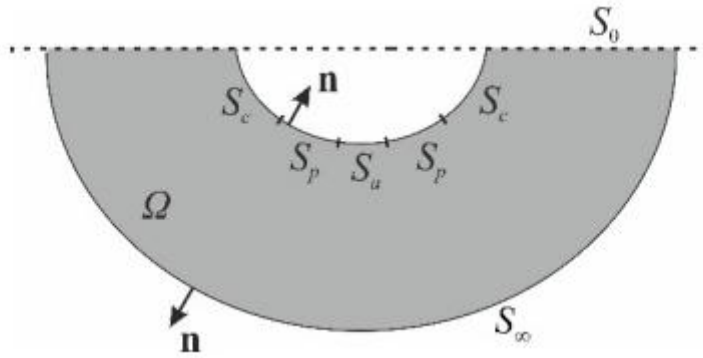
- Απεικόνιση και ανάλυση: Τα αποτελέσματα απεικονίζονται χρησιμοποιώντας γραφικές παραστάσεις για την αξιολόγηση της ομοιομορφίας της προσφερόμενης προστασίας, της κατανομής του δυναμικού και της πυκνότητας ρεύματος σε όλη την επιφάνεια του πλοίου. Η ανάλυση των υπολογιστικών δεδομένων βοηθά στην επιβεβαίωση ότι το σύστημα ICCP αποτρέπει αποτελεσματικά τη διάβρωση.
- Περιβαλλοντικοί παράγοντες: Το μοντέλο μπορεί να ενσωματώσει διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως διακυμάνσεις στη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού, την αλατότητα κ.α. για να αξιολογήσει πώς αυτοί οι παράγοντες μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση του συστήματος ICCP.
- Επαλήθευση και βαθμονόμηση: Το υπολογιστικό μοντέλο μπορεί να επαληθευτεί συγκρίνοντας τις προβλέψεις του με δεδομένα από πραγματικές μετρήσεις. Ενδέχεται να απαιτούνται προσαρμογές ή διορθώσεις βάσει των αποτελεσμάτων επαλήθευσης.
- Πολλαπλά σενάρια: Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξετάζοντας διάφορα σενάρια και συνθήκες λειτουργίας για να διασφαλιστεί ότι το σύστημα ICCP παραμένει αποτελεσματικό υπό διαφορετικές συνθήκες.

Η υπολογιστική μοντελοποίηση για το σχεδιασμό του συστήματος ICCP σε ένα πλοίο επιτρέπει την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος, την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και τη διασφάλιση της αποτελεσματικής αποτροπής της διάβρωσης. Παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για το πώς λειτουργεί το σύστημα και πως ανταποκρίνεται σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες, συμβάλλοντας στη διατήρηση της ακεραιότητας και της ασφάλειας των μεταλλικών κατασκευών του πλοίου με την πάροδο του χρόνου.

4.2.1 Εφαρμογή μαθηματικών εξισώσεων

Έστω μια δομή (πραγματικό πλοίο) επιφανείας S βυθισμένη σε έναν ομογενή ηλεκτρολύτη αντίστασης Ω (θαλασσινό νερό) με όριο το S_0 (που αντιστοιχεί στην ανοιχτή θάλασσα που περιβάλλει το πλοίο) και ηλεκτρικής αγωγιμότητας σ (δηλαδή της ικανότητας του θαλασσινού νερού να μεταφέρει το ηλεκτρικό ρεύμα). Οπότε στην περίπτωση εφαρμογής ενός συστήματος ICCP στο πλοίο, το S παριστάνει τη βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας του πλοίου και S_0 είναι το πεδίο ορισμού που είναι η ανοιχτή θάλασσα που περιβάλλει το πλοίο. Η επιφάνεια χωρίζεται σε καθοδικές περιοχές (S_c), ανοδικές περιοχές (S_a), και μονωμένες περιοχές (S_p) (Εικόνα 37). Κάθε περιοχή αντιπροσωπεύει ένα συγκεκριμένο στοιχείο του συστήματος ICCP και του κύτους του πλοίου. Για την επιφάνεια S ισχύει η μαθηματική σχέση (De Giorgi V.G., et al, 2005):

$$S = S_c + S_a + S_p$$



Εικόνα 37: Απεικόνιση της λύσης ενός προβλήματος καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενο ρεύμα (ICCP) που αφορά μια δομή βυθισμένη σε έναν ημι-άπειρα εκτεταμένο ηλεκτρολύτη (semi-infinite extended electrolyte) (Πηγή: Kalovelonis, D., et al, 2020)

Ο όγκος που περιβάλλει τη δομή δεν περιέχει ηλεκτρικές πηγές και το ολικό ρεύμα εντός του συστήματος πρέπει να ισούται με το ολικό ρεύμα έξω από το σύστημα. Επομένως η διατήρηση του φορτίου συνεπάγεται ότι (Kalovelonis D., et al, 2020):

$$\nabla * J = 0$$

Όπου:

- Το J είναι το διάνυσμα πυκνότητας ρεύματος
- Το ∇ είναι ο διαφορικός τελεστής απόκλισης του διανύσματος

Δηλαδή η εξίσωση $\nabla * J = 0$ δείχνει ότι η απόκλιση του διανύσματος της πυκνότητας ρεύματος είναι ίση με μηδέν, γεγονός που δηλώνει την διατήρηση του ηλεκτρικού φορτίου. Με άλλα λόγια, δηλώνει ότι το ολικό ηλεκτρικό ρεύμα που ρέει σε οποιαδήποτε κλειστή επιφάνεια είναι ίσο με το ολικό ρεύμα που ρέει έξω, υποδηλώνοντας τη διατήρηση του φορτίου εντός αυτής της περιοχής.

Σύμφωνα με τον νόμο του Ohm σε συνθήκες σταθερής κατάστασης, η πυκνότητα του ρεύματος είναι ανάλογη με την κλίση του ηλεκτρικού δυναμικού. (Kalovelonis D., et al, 2020; Zamani, N. G., 1988)

$$J = \sigma E = -\sigma \nabla \varphi$$

Όπου:

- Το σ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη.
- Το φ είναι το ηλεκτρικό δυναμικό.
- Το E είναι το ηλεκτρικό πεδίο.

Με τον συνδυασμό των δύο παραπάνω εξισώσεων και υπό την προϋπόθεση ότι ο ηλεκτρολύτης έχει ομογενή σύνθεση σε όλο τον χώρο, η μερική διαφορική εξίσωση Laplace για τον προσδιορισμό της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού διαμορφώνεται ως εξής:

$$\nabla^2 \varphi = 0$$

4.2.1.1 Συνοριακές συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες αναφέρονται στις συνθήκες που επιβάλλονται στα όρια μιας περιοχής στην οποία λύνεται μια διαφορική εξίσωση ή ένα πρόβλημα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ορίζονται συνοριακές συνθήκες στις ανοδικές περιοχές (S_o), καθοδικές περιοχές (S_c), και μονωμένες περιοχές (S_p), που αποτελούν μέρη της επιφάνειας S που ορίζει το πεδίο ορισμού Ω . Στην περίπτωση του συστήματος ICCP σε ένα πλοίο, η επιφάνεια είναι η βρεγμένη επιφάνεια του κύτους του πλοίου, και το οριοθετημένο πεδίο ορισμού είναι η ανοιχτή θάλασσα που περιβάλλει το πλοίο.

Κάθε επιφάνεια συστατικού του S αντιμετωπίζεται με συγκεκριμένο τρόπο στην ανάλυση συστημάτων ICCP. Οι ανοδικές περιοχές αντιπροσωπεύουν τις ανόδους του συστήματος ICCP και μπορούν να μοντελοποιηθούν είτε ως πηγή σταθερού ρεύματος (q_A) είτε ως πηγή σταθερής τάσης (Φ_A). (DeGiorgi V.G., et al, 2005; DeGiorgi, V. G. 1970; DeGiorgi, V. G., & Wimmer, S. A., 2005):

$$\frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial n_{(x, y)}} = q_A$$

$$\Phi(x, y) = \Phi_A$$

Όπου:

- Όπου $\Phi(x, y)$ είναι το ηλεκτρικό δυναμικό στο σημείο (x, y)
- $\partial \Phi(x, y) / \partial n_{(x, y)}$ είναι ο ρυθμός μεταβολής του ηλεκτρικού δυναμικού σε σχέση με την κανονική κατεύθυνση (n) στο σημείο (x, y) .

Το ηλεκτρικό ρεύμα προς τις ανόδους μπορεί να υπόκειται σε μεταβολές κατά την πάροδο του χρόνου. Η προσέγγιση που ακολουθείται είναι να δημιουργούνται ξεχωριστές λύσεις για κάθε χρονική στιγμή, διασφαλίζοντας ότι οι αλλαγές στο ηλεκτρικό ρεύμα δεν ενσωματώνονται στο μοντέλο. Οι άνοδοι δεν θεωρούνται ως ηλεκτρικές πηγές, αλλά ως συνοριακές συνθήκες σταθερής τιμής, διατηρώντας έτσι την εγκυρότητα της χρήσης της εξίσωσης Laplace για λύσεις σταθερής κατάστασης. Η εξίσωση Laplace, που συνήθως χρησιμοποιείται για λύσεις σταθερής κατάστασης, διατηρεί σταθερές τιμές στις ανόδους. Με αυτό τον τρόπο, το σύστημα μπορεί να αναλύεται υπό συνθήκες σταθερής κατάστασης για κάθε χρονική στιγμή. Δηλαδή, σε κάθε χρονικό σημείο, χρησιμοποιείται ένα συγκεκριμένο μοντέλο ή σύνολο εξισώσεων για να περιγράψει τη συμπεριφορά του συστήματος ICCP. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει μια πιο ακριβή αναπαράσταση του τρόπου με τον οποίο το σύστημα ανταποκρίνεται σε διάφορες συνθήκες με την πάροδο του χρόνου. Δημιουργώντας ξεχωριστές λύσεις για διαφορετικές χρονικές στιγμές, το μοντέλο διασφαλίζει ότι οι μεταβολές στο ηλεκτρικό ρεύμα δεν επηρεάζουν ή δεν ενσωματώνονται στο μοντέλο για άλλη χρονική στιγμή.

Η ηλεκτρική ροή σε ένα σημείο της επιφάνειας του καθοδικού υλικού S_c είναι συναρτημένη της καθοδικής πόλωσης (f_c):

$$\frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial n_{(x, y)}} = f_c$$

- Όπου f_c είναι η συνάρτηση για την καθοδική πόλωση.

Γενικά, εάν η τιμή του δυναμικού είναι γνωστή, το ρεύμα μπορεί να προσδιοριστεί και αντιστρόφως εάν η τιμή του ρεύματος είναι γνωστή, τότε μπορεί να προσδιοριστεί το δυναμικό.

Στις ηλεκτρικά μονωμένες επιφάνειες S_p , όπως ισχύει συνήθως για την περίπτωση βαμμένων επιφανειών, η ροή είναι σταθερή στο χρόνο και ίση με μηδέν:

$$\frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial n_{(x, y)}} = 0$$

4.2.2 Εφαρμογή συνοριακών στοιχείων (BEM)

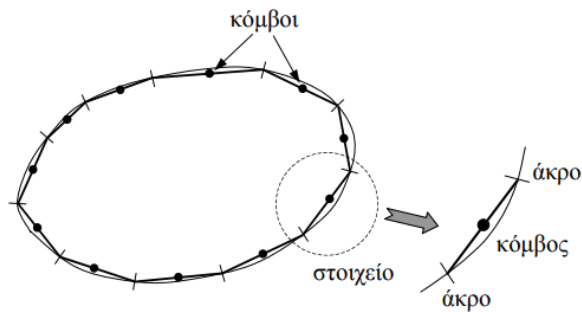
Η μέθοδος συνοριακών στοιχείων (Boundary Element Method - BEM) είναι μια αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιείται στην υπολογιστική μοντελοποίηση για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στον τομέα της υπολογιστικής Ηλεκτροχημείας. Συγκεκριμένα, η τεχνική BEM μπορεί να εφαρμοστεί για τη μοντελοποίηση και ανάλυση των ηλεκτροχημικών διεργασιών που σχετίζονται με την προστασία από τη διάβρωση των πλοίων, όπως για τη σχεδίαση συστημάτων καθοδικής προστασίας επιβαλλόμενου ρεύματος (ICCP) σε πλοία. (DeGiorgi V.G., et al, 2005; Santana Diaz, E., & Adey, R., 2002)

Γενικά, η τεχνική BEM είναι κατάλληλη για την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με πολύπλοκες γεωμετρίες και δομές, όπως αυτές που υπάρχουν στα πλοία. Η σωστή μοντελοποίηση αυτών των δομών είναι απαραίτητη για την ακριβή προσομοίωση των πλοίων. Στο πλαίσιο του σχεδιασμού του συστήματος ICCP, το κύτος του πλοίου και οι σχετικές γεωμετρίες θα πρέπει να παριστάνονται με ακρίβεια στο μοντέλο, κάτι που εξασφαλίζεται λόγω της ικανότητας της τεχνικής BEM. (DeGiorgi V.G., et al, 2005)

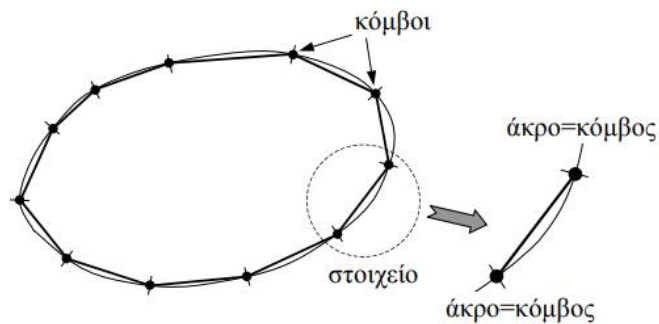
Συγκεκριμένα, η τεχνική BEM αντιμετωπίζει το πρόβλημα αναζητώντας τη λύση σε δύο περιοχές: την εσωτερική και την οριακή (εξωτερική). Η επιφάνεια του κύτους και το περιβάλλον (θαλασσινό νερό) θα αποτελούν το εξωτερικό μέρος (εξωτερικό όριο), ενώ το εσωτερικό μέρος θα αντιπροσωπεύει τη δομή του πλοίου. (DeGiorgi V.G., et al, 2005; Pfeiffer, R. A., et al, 2019)

Στο πλαίσιο της BEM για την αριθμητική επίλυση προβλημάτων, χρησιμοποιούνται τρεις βασικοί τύποι συνοριακών στοιχείων: το σταθερό στοιχείο (Εικόνα 38), το γραμμικό στοιχείο (Εικόνα 39) και το παραβολικό (ή τετραγωνικό) στοιχείο (Εικόνα 40). Το σταθερό στοιχείο χαρακτηρίζεται από την προσέγγιση του συνόρου με ένα ευθύγραμμο τμήμα, ενώ η συνοριακή ποσότητα θεωρείται σταθερή και ίση με την τιμή του κομβικού σημείου στο μέσο του τμήματος. Το γραμμικό στοιχείο προσεγγίζει επίσης το σύνορο με ευθύγραμμο τμήμα, αλλά η συνοριακή ποσότητα μεταβάλλεται γραμμικά μεταξύ των τιμών των κόμβων στα άκρα. Τέλος, το παραβολικό στοιχείο χρησιμοποιεί παραβολικό τόξο για την προσέγγιση του συνόρου, και η κατανομή της συνοριακής ποσότητας είναι παραβολική, καθοριζόμενη από τις τιμές τριών κόμβων, δύο στα άκρα και ένα στο μέσο. Αυτοί οι τύποι

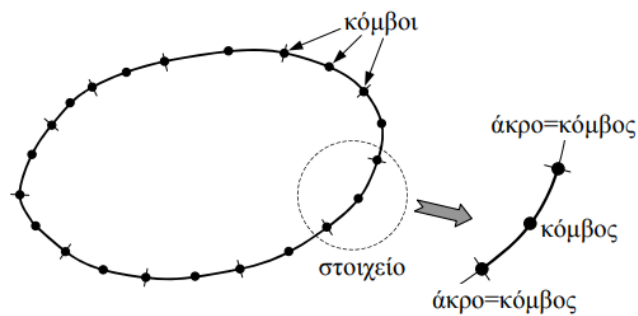
συνοριακών στοιχείων επιτρέπουν την αποδοτική προσέγγιση της λύσης του προβλήματος δυναμικού με αριθμητικές μεθόδους. (Κατσιακαδέλης, Ι., 2012)



Εικόνα 38: Διακριτοποίηση γεωμετρίας με σταθερά στοιχεία. (Πηγή: Κατσιακαδέλης, Ι., 2012)



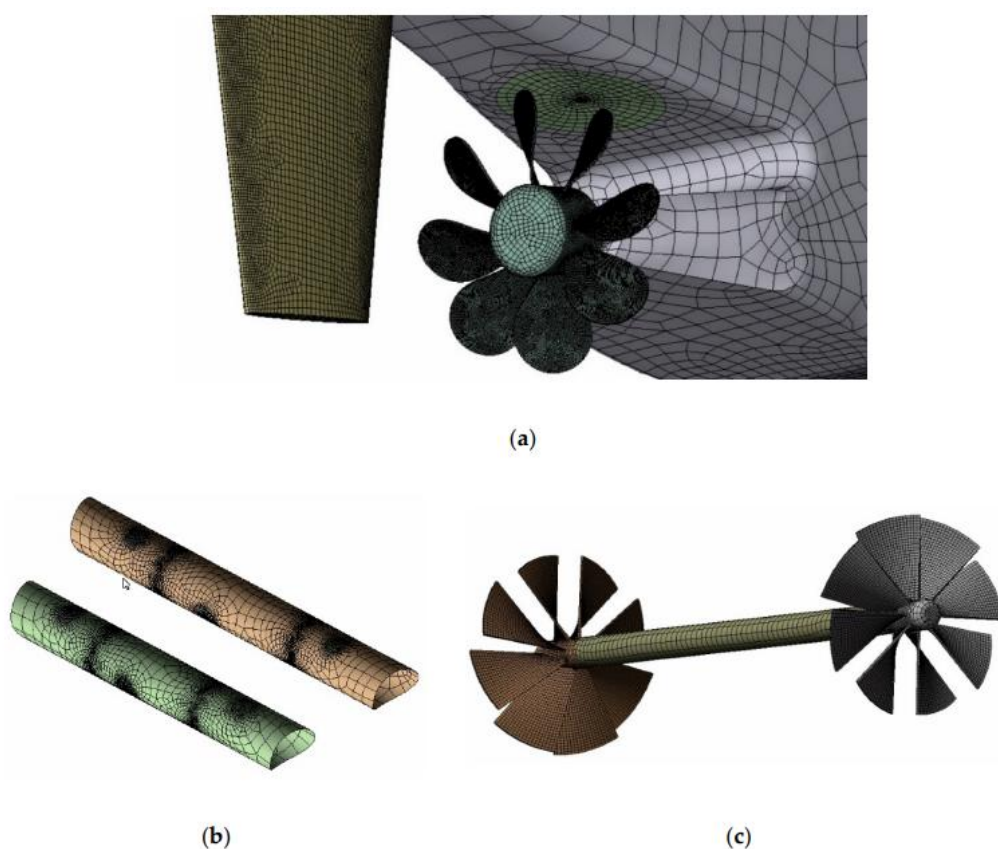
Εικόνα 39: Διακριτοποίηση γεωμετρίας με γραμμικά στοιχεία. (Πηγή: Κατσιακαδέλης, Ι., 2012)



Εικόνα 40: Διακριτοποίηση γεωμετρίας με παραβολικά (ή τετραγωνικά) στοιχεία. (Πηγή: Κατσιακαδέλης, Ι., 2012)

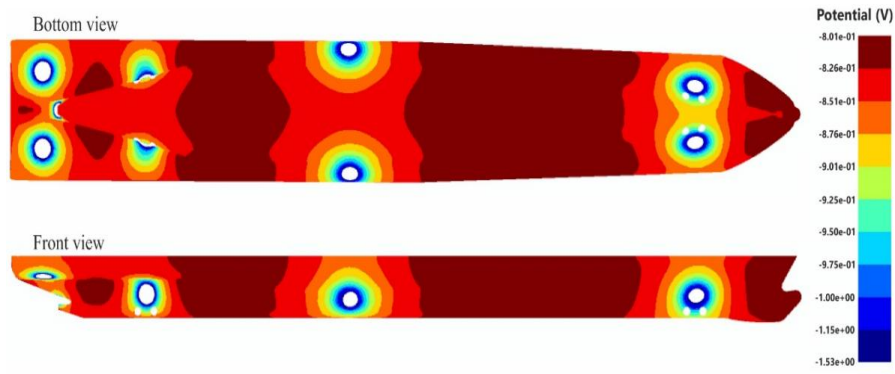
Η τεχνική BEM χρησιμοποιεί ένα πλέγμα (mesh) στο όριο και λαμβάνονται υπόψη οι ιδιότητες του υλικού σε κάθε σημείο πλέγματος. Για τον σχεδιασμό ενός συστήματος ICCP, χρειάζεται να προσδιοριστούν οι ιδιότητες του υλικού του κύτους του πλοίου και του περιβάλλοντος νερού. Τα όρια S και S_∞ διακρίνονται σε τετραγωνικά επιφανειακά στοιχεία. Κάθε στοιχείο έχει έναν συγκεκριμένο αριθμό γεωμετρικών και λειτουργικών κόμβων, που

σχηματίζουν το πλέγμα διακριτοποίησης (discretization mesh) (Εικόνα 41). Η πηγή επιβαλλόμενου ρεύματος στα συστήματα ICCP συνήθως μοντελοποιείται ως συνοριακή συνθήκη στην επιφάνεια του πλοίου. Αυτό σημαίνει ότι η μαθηματική αναπαράσταση ή προσομοίωση της εξωτερικής πηγής ρεύματος, η οποία εφαρμόζεται για την προστασία της δομής του πλοίου από τη διάβρωση, αντιμετωπίζεται ως μια συνοριακή συνθήκη που επηρεάζει την επιφάνεια του πλοίου. Η συγκεκριμένη προσέγγιση μοντελοποίησης λαμβάνει υπόψη και ενσωματώνει τις τυχόν επιδράσεις του επιβαλλόμενου ρεύματος στη δομή του πλοίου για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων και των αναλύσεων, επιτρέποντας μια πιο ακριβή αναπαράσταση της συμπεριφοράς του συστήματος ICCP.

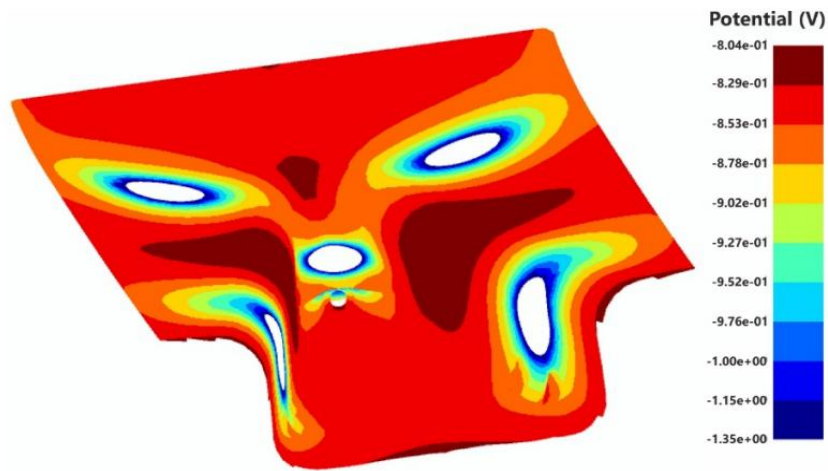


Εικόνα 41: Πλέγμα διακριτοποίησης συνοριακών στοιχείων πλοίου. (α) Περιοχή πρύμνης (β) Προωστήρες (Thrusters), (γ) άξονας ελίκων των προωστήρων (thrusters). (Πηγή: Kalovelonis D., et al, 2020)

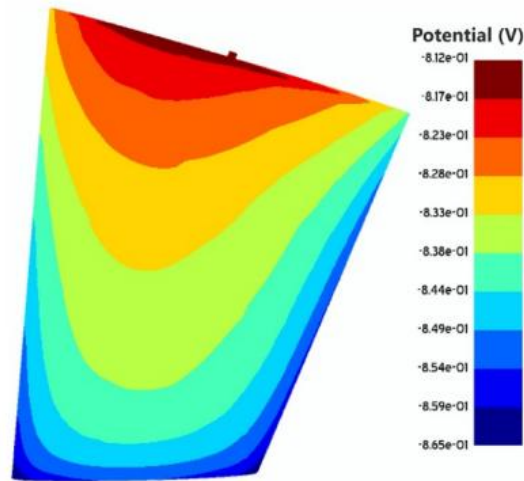
Στην συνέχεια μετά τη διατύπωση του, το πρόβλημα λύνεται αριθμητικά, διακριτοποιώντας το όριο και εφαρμόζοντας κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. Η διαδικασία περιλαμβάνει την επίλυση ενός συστήματος εξισώσεων για τον προσδιορισμό της κατανομής ηλεκτρικού δυναμικού στην επιφάνεια του πλοίου. Μόλις ολοκληρωθεί η προσομοίωση BEM, λαμβάνονται τα αποτελέσματα, τα οποία αναλύονται και αξιολογείται η αποτελεσματικότητα του συστήματος ICCP. Η ανάλυση περιλαμβάνει την εξέταση της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού στην επιφάνεια του πλοίου και τη διασφάλιση ότι το αποτέλεσμα πληροί τα κριτήρια αντιδιαβρωτικής προστασίας (Εικόνα 42 - 45).



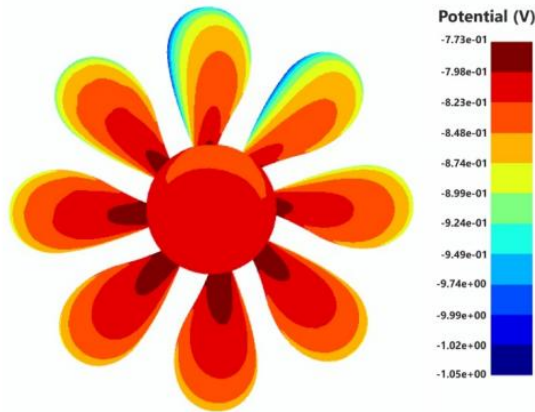
Εικόνα 42: Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στην επιφάνεια πλοίου. (Πηγή: Kalovelonis, D., et al, 2020)



Εικόνα 43: Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στην περιοχή της πρύμνης. (Πηγή: Kalovelonis, D., et al, 2020)



Εικόνα 44: Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στο πηδάλιο. (Πηγή: Kalovelonis, D., et al, 2020)



Εικόνα 45: Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στην έλικα. (Πηγή: Kalovelonis, D., et al, 2020)

Επιπρόσθετα η τεχνική BEM μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατ' επανάληψη για τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων. Διάφορες παράμετροι του συστήματος ICCP, όπως η πυκνότητα ρεύματος και η θέση των ανοδίων, μπορούν να επαναπροσδιοριστούν έτσι ώστε να επιτευχθεί η πιο αποτελεσματική προστασία από τη διάβρωση. Είναι σημαντικό να επαληθευτεί το μοντέλο BEM έναντι πειραματικών ή πραγματικών δεδομένων για να διασφαλιστεί η ακρίβεια και η αξιοπιστία του στην πρόβλεψη της απόδοσης του συστήματος ICCP.

Συμπερασματικά, με την εφαρμογή της μεθόδου Boundary Element (BEM) στην υπολογιστική μοντελοποίηση για το σχεδιασμό συστήματος ICCP σε ένα πλοίο, μπορεί να αναλυθούν με ακρίβεια οι ηλεκτροχημικές διεργασίες στο κύτος του πλοίου, να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα του συστήματος ICCP και να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός του για την εξασφάλιση μιας αξιόπιστης καθοδικής προστασίας. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει τη λεπτομερή ανάλυση μιας σύνθετης γεωμετρίας και των συνοριακών συνθηκών, γεγονός που την καθιστά ένα πολύτιμο εργαλείο για την πρόληψη της διάβρωσης του πλοίου.

4.2.2.1 Οφέλη και περιορισμοί της τεχνικής BEM

Τα οφέλη της εφαρμογής της τεχνικής BEM για το σχεδιασμό συστήματος καθοδικής προστασίας ICCP είναι:

1. Ακρίβεια σε σύνθετες γεωμετρίες: Η τεχνική BEM υπερέχει στην ακριβή μοντελοποίηση δομών που διαθέτουν πολύπλοκες γεωμετρίες, καθιστώντας τη κατάλληλη για πλοία με ανάλογες κατασκευές.
2. Αποτελεσματική διακριτοποίηση πλέγματος: Η τεχνική BEM απαιτεί συνήθως ένα πλέγμα μόνο στο όριο, καθιστώντας πιο αποτελεσματικούς τους υπολογισμούς σε σύγκριση με άλλες μεθόδους που απαιτούν ογκομετρικό πλέγμα (Volumetric mesh). Το ογκομετρικό πλέγμα αποτελεί ένα τρισδιάστατο (3D) πλέγμα που καλύπτει ολόκληρο τον όγκο μιας δομής. Αντίθετα, ένα πλέγμα που αναφέρεται μόνο στα όρια ή τις επιφάνειες της δομής χαρακτηρίζεται ως διακριτοποίηση πλέγματος. Αυτό θεωρείται πλεονέκτημα για τη μέθοδο BEM, καθώς η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί κυρίως τα όρια μιας δομής για τους υπολογισμούς, και όχι ένα πυκνό 3D πλέγμα που καλύπτει ολόκληρο τον όγκο του πλοίου. (Pfeiffer, R. A., et al, 2019)

3. Συνοριακές συνθήκες: Η τεχνική BEM είναι ικανή να αντιμετωπίζει, να λαμβάνει υπόψη και να επιλύει τις συνοριακές συνθήκες χωρίς να απαιτεί περαιτέρω σύνθετες προσεγγίσεις ή προσθήκη επιπλέον παραμέτρων, απλοποιώντας τη μοντελοποίηση των πηγών ρεύματος και την κατανομή του στην επιφάνεια του πλοίου.
4. Παραμετρικές μελέτες: Η τεχνική BEM επιτρέπει μελέτες, που περιλαμβάνουν μεταβολές στις παραμέτρους του συστήματος, δίνοντας τη δυνατότητα στους σχεδιαστές να αξιολογήσουν τον αντίκτυπο αυτών των αλλαγών στην αποτελεσματικότητα της καθοδικής προστασίας.
5. Συμβατότητα με σύνθετα ηλεκτροχημικά μοντέλα: Η τεχνική BEM μπορεί να ενσωματώσει εξελιγμένα ηλεκτροχημικά μοντέλα στους υπολογισμούς για να επιτύχει την καταγραφή των ηλεκτροχημικών φαινομένων στην επιφάνεια του πλοίου με μεγάλη ακρίβεια.

Οι περιορισμοί που προκύπτουν κατά την εφαρμογή της τεχνικής BEM είναι:

1. Εντατικοί πόροι για μεγάλα μοντέλα: Η τεχνική BEM μπορεί να απαιτεί αρκετό χρόνο και μεγάλη υπολογιστική ισχύ όταν πρόκειται να αναλύσει πολύ μεγάλα μοντέλα και τότε η επίλυση του συστήματος εξισώσεων μπορεί να απαιτεί σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους.
2. Εξάρτηση ακρίβειας από εισαγωγή παραμέτρων μοντέλου: Η ακρίβεια των προσομοιώσεων BEM βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ακρίβεια των παραμέτρων που εισάγονται, συμπεριλαμβανομένων των ιδιοτήτων του υλικού και των περιβαλλοντικών συνθηκών.
3. Παροδικές επιδράσεις: Το BEM ενδέχεται να απαιτεί τη χρονική επέκταση ή την παραδοχή πρόσθετων συνθηκών για την ακριβή μοντελοποίηση παραγόντων και διαδικασιών που η επίδραση τους δεν είναι μόνιμη αλλά παροδική και εξαρτώνται από το χρόνο.

4.2.3 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα της χρήσης υπολογιστικής μοντελοποίησης

Όπως συμβαίνει και με την πειραματική μέθοδο μοντελοποίησης, έτσι και στην περίπτωση της εφαρμογής της μεθόδου υπολογιστικής μοντελοποίησης για τη σχεδίαση συστήματος ICCP σε πλοία, αναφέρονται πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης μεθόδου υπολογιστικής μοντελοποίησης είναι τα εξής:

1. Οικονομική διαδικασία: Η υπολογιστική μοντελοποίηση είναι γενικά πιο οικονομική από τη μοντελοποίηση φυσικής κλίμακας, επειδή δεν απαιτεί την κατασκευή φυσικών μοντέλων ή εκτεταμένο εξοπλισμό.
2. Ευελιξία: Οι αλλαγές στη σχεδίαση μπορούν εύκολα να πραγματοποιηθούν και να δοκιμαστούν σε ένα εικονικό περιβάλλον, επιτρέποντας συχνές και γρήγορες επαναλήψεις και βελτιστοποίηση.
3. Ασφάλεια: Δεν υπάρχουν ανησυχίες, που σχετίζονται με την εργασία με το χειρισμό ηλεκτρικών στοιχείων ή χημικών ουσιών, γεγονός που την καθιστά ασφαλέστερη ως μέθοδο.

4. Περιβαλλοντικός αντίκτυπος: Η υπολογιστική μοντελοποίηση δεν έχει άμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθιστώντας την πιο φιλική προς το περιβάλλον.
5. Χρονική αποτελεσματικότητα: Η ρύθμιση και η εκτέλεση προσομοιώσεων μπορεί να είναι ταχύτερη σε σχέση με την κατασκευή φυσικών μοντέλων.

Ως μειονεκτήματα της χρήσης μεθόδου υπολογιστικής μοντελοποίησης αναφέρονται τα παρακάτω:

1. Βασίζεται σε υποθέσεις: Τα μοντέλα βασίζονται σε μαθηματικές υποθέσεις και προσεγγίσεις, οι οποίες μπορεί να μην αποτυπώνουν πλήρως την πολυπλοκότητα του πραγματικού προβλήματος.
2. Ανάγκη επαλήθευσης: Η ακρίβεια του μοντέλου πρέπει να επιβεβαιωθεί σύμφωνα με τα δεδομένα των πραγματικών συνθηκών, τα οποία μπορεί να είναι απαιτητικά και μπορεί να απαιτούν επιπλέον φυσικές δοκιμές.
3. Πολυπλοκότητα: Η δημιουργία ακριβών υπολογιστικών μοντέλων μπορεί να είναι περίπλοκη και μπορεί να απαιτεί εξειδικευμένο λογισμικό και αντίστοιχα υψηλή εξειδίκευση του σχεδιαστή.
4. Περιορισμένος ρεαλισμός: Το εικονικό περιβάλλον μπορεί να μην αναπαράγει πλήρως τις συνθήκες του πραγματικού περιβάλλοντος/συνθηκών, καθώς ορισμένοι παράγοντες μπορεί να είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν με ακρίβεια.

4.3 Σύγκριση των διαφορετικών μεθόδων πειραματικής και υπολογιστικής μοντελοποίησης

Η υπολογιστική μοντελοποίηση και η μοντελοποίηση φυσικής κλίμακας είναι δύο ξεχωριστές μεθοδολογίες. Οι διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων μοντελοποίησης αναφέρονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 11):

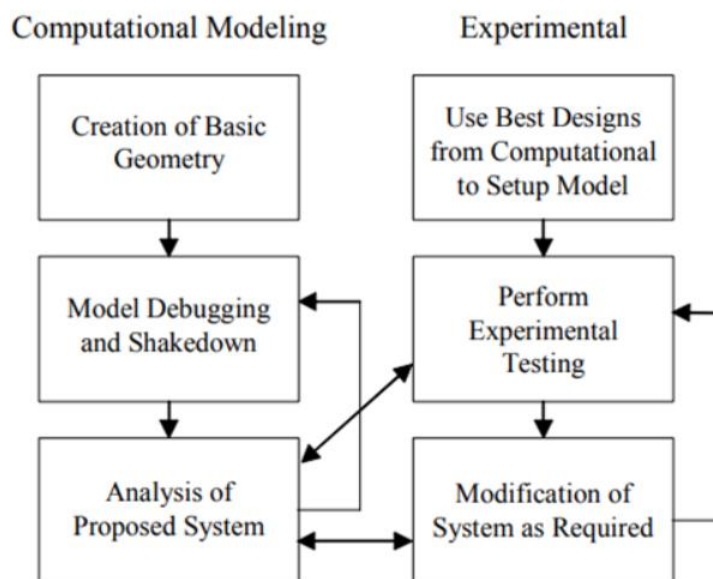
Πίνακας 11: Ιδιότητες πειραματικής και υπολογιστικής μοντελοποίησης.

| Πειραματική μοντελοποίηση | Υπολογιστική μοντελοποίηση |
|--|---|
| 1. Περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός φυσικού, απτού μοντέλου που αναπαράγει μια έκδοση του πραγματικού συστήματος ή περιβάλλοντος σε σμίκρυνση. | 1. Χρησιμοποιεί μαθηματικές εξισώσεις, προσομοιώσεις με τη βοήθεια υπολογιστή και εικονικά περιβάλλοντα για την αναπαράσταση και την ανάλυση ενός συστήματος. |
| 2. Το μοντέλο κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας πραγματικά υλικά και εξαρτήματα για την προσομοίωση των φυσικών ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς του συστήματος. | 2. Δεν περιλαμβάνει φυσική, απτή αναπαράσταση του συστήματος, με τη χρήση υλικών, αλλά βασίζεται σε δεδομένα και αλγόριθμους. |
| 3. Προσφέρει υψηλό βαθμό φυσικού ρεαλισμού αναπαράγοντας τις φυσικές ιδιότητες και τις αλληλεπιδράσεις του συστήματος όσο το δυνατόν περισσότερο. | 3. Παρέχει μια εικονική αναπαράσταση που μπορεί να μην αποτυπώνει πλήρως τις φυσικές περιπλοκές και πολυπλοκότητες του πραγματικού συστήματος. |
| 4. Επιτρέπει την άμεση παρατήρηση και τη φυσική δοκιμή υπό ρεαλιστικές συνθήκες. | 4. Βασίζεται σε μαθηματικές αφαιρέσεις και υποθέσεις για την προσομοίωση του συστήματος. |
| 5. Συνήθως απαιτεί περισσότερη προσπάθεια και κόστος για την τροποποίηση και την επανάληψη του φυσικού μοντέλου. | 5. Προσφέρει ευελιξία για γρήγορες επαναλήψεις σχεδίασης και προσαρμογές παραμέτρων σε εικονικό περιβάλλον. |
| 6. Οι αλλαγές στο μοντέλο ενδέχεται να απαιτούν προσαρμογές σε φυσικά στοιχεία. | 6. Επιτρέπει τη γρήγορη εξερεύνηση ενός ευρέος φάσματος σεναρίων και σχεδίων. |
| 7. Δημιουργεί εμπειρικά δεδομένα απευθείας από φυσικές δοκιμές, παρέχοντας υψηλό βαθμό εμπιστοσύνης στα αποτελέσματα. | 7. Βασίζεται σε προσομοιωμένα δεδομένα, τα οποία μπορεί να χρειαστεί να επικυρωθούν με πραγματικές παρατηρήσεις ή μετρήσεις. |
| 8. Προσφέρει ένα μέσο επικύρωσης της ακρίβειας των υπολογιστικών μοντέλων συγκρίνοντας φυσικά και προσομοιωμένα αποτελέσματα. | 8. Η ακρίβεια του μοντέλου εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων εισόδου και τους μαθηματικούς αλγόριθμους. |
| 9. Θεωρείται πιο ακριβή μέθοδος λόγω του κόστους που σχετίζεται με την κατασκευή και τη συντήρηση φυσικών μοντέλων. | 9. Γενικά θεωρείται πιο αποδοτική μέθοδος από οικονομική άποψη για τις αρχικές φάσεις σχεδιασμού και εξερεύνησης. |
| 10. Απαιτούνται πιο χρονοβόρες ρυθμίσεις και μεγαλύτερες περίοδοι δοκιμών, καθιστώντας τη μέθοδο λιγότερο αποδοτική από άποψη χρόνου για προκαταρκτικό σχεδιασμό και διερεύνηση. | 10. Προϋποθέτει ταχύτερη ρύθμιση και εκτέλεση προσομοιώσεων, καθιστώντας την πιο αποδοτική μέθοδο από άποψη χρόνου για τις αρχικές αξιολογήσεις. |

Συμπερασματικά, η υπολογιστική μέθοδος μοντελοποίησης είναι μια εικονική μαθηματική προσέγγιση που προσφέρει ευελιξία και ταχύτητα, αλλά μπορεί να μην έχει τον ρεαλισμό της πειραματικής μεθόδου μοντελοποίησης φυσικής κλίμακας. Αντίθετα η μοντελοποίηση φυσικής κλίμακας παρέχει μια ρεαλιστική, απτή αναπαράσταση ενός συστήματος, αλλά μπορεί να είναι δαπανηρή και χρονοβόρα. Η επιλογή μεταξύ αυτών των μεθόδων εξαρτάται από τους συγκεκριμένους στόχους, τους περιορισμούς και τις απαιτήσεις ενός δεδομένου έργου. Η συνδυαστική μέθοδος σχεδιασμού (combined design method) αποτελεί μια πιο αποτελεσματική μέθοδο σχεδίασης, αξιοποιώντας τα δυνατά σημεία των δύο μεθόδων.

4.4 Συνδυαστική μέθοδος σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός πολύπλοκων συστημάτων όπως είναι τα συστήματα ICCP στα πλοία, αποτελεί από μόνος του μια διεπιστημονική πρόκληση. Για να εφαρμοστούν αποτελεσματικά οι υπολογιστικές ή οι πειραματικές τεχνικές, πρέπει να υπάρχει μια θεμελιώδης κατανόηση του πώς λειτουργεί το σύστημα προστασίας ICCP στον πραγματικό κόσμο. Τόσο η πειραματική όσο και η υπολογιστική προσέγγιση προσφέρουν μοναδικές γνώσεις για την απόδοση του συστήματος αυτού, ωστόσο και στις δυο περιπτώσεις μπορεί να υπάρχουν περιορισμοί. Η συνδυαστική χρήση πειραματικών και υπολογιστικών μεθόδων έχει ως αποτέλεσμα μια ολιστική σχεδιαστική προσέγγιση, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 46), η οποία περιλαμβάνει την ταχεία και συνεχή μετάδοση πληροφοριών μεταξύ των δυο προσεγγίσεων. (De Giorgi V.G., et al, 2005)



Εικόνα 46: Συνδυαστική προσέγγιση σχεδιασμού για συστήματα προστασίας ICCP ενός πλοίου. (Πηγή: De Giorgi V.G., et al, 2005).

Η υπολογιστική μοντελοποίηση θεωρείται κατά κύριο λόγο ως ένα μέσο μείωσης του αριθμού των πειραματικών επαναλήψεων που απαιτούνται στον κύκλο σχεδιασμού. Οι πρόσφατες εξελίξεις στις υπολογιστικές τεχνικές και η αυξημένη εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα της υπολογιστικής μοντελοποίησης για συστήματα ICCP έθεσαν τα θεμέλια για μια ολοκληρωμένη συνδυαστική αξιοποίηση διαφορετικών μεθόδων. Η υπολογιστική μοντελοποίηση μπορεί να χρησιμεύσει ως ένα εργαλείο για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό και μπορεί να αξιοποιηθεί για τη δημιουργία του προκαταρκτικού σχεδιασμού της διαδικασίας δοκιμών στο μοντέλο φυσικής κλίμακας. Οι θεμελιώδεις παράμετροι της πειραματικής μοντελοποίησης, όπως είναι η κλίμακα του μοντέλου και του ηλεκτρολύτη, μπορούν να προσδιοριστούν υπολογιστικά. (De Giorgi V.G., et al, 2005; DeGiorgi, V. G., et al, 1970; Yao, P., & Wu, J., 2008)

Συμπερασματικά, η συνδυαστική μέθοδος μοντελοποίησης αξιοποιεί τόσο την υπολογιστική, όσο και την πειραματική μέθοδο μοντελοποίησης και μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη στο σχεδιασμό συστημάτων ICCP στα πλοία. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει

την αξιοποίηση όλων των ευεργετικών ιδιοτήτων των δύο μεθόδων, ενώ παράλληλα περιορίζονται οι αδυναμίες τους. Τα κυριότερα οφέλη από τη χρήση της συνδυαστικής μεθόδου μοντελοποίησης είναι τα εξής:

1. Αποτελεσματικότητα: Η συνδυαστική προσέγγιση βελτιστοποιεί τη χρήση υπολογιστικής και φυσικής μοντελοποίησης, καθιστώντας τη διαδικασία πιο αποτελεσματική. Η υπολογιστική μοντελοποίηση χρησιμοποιείται για τον αρχικό σχεδιασμό και την ταχεία εξερεύνηση, ενώ η μοντελοποίηση φυσικής κλίμακας διασφαλίζει ότι το σύστημα ICCP συμπεριφέρεται, όπως αναμένεται σε ένα πραγματικό περιβάλλον, αντιμετωπίζοντας τις ανησυχίες σχετικά με την ακρίβεια του μοντέλου και τις πιθανά περίπλοκες αλληλεπιδράσεις που εμπλέκονται.
2. Περιορισμός κόστους και χρόνου: Η υπολογιστική μοντελοποίηση επιταχύνει την αρχική φάση σχεδιασμού και διερεύνησης, ενώ η φυσική μοντελοποίηση χρησιμοποιείται για τη στοχευόμενη επικύρωση και τελειοποίηση του συστήματος προστασίας ICCP. Αυτός ο τρόπος μπορεί να είναι πιο οικονομικός και χρονικά πιο αποδοτικός σε σχέση με την αποκλειστική χρήση μοντέλων φυσικής κλίμακας.
3. Ασφάλεια και περιβαλλοντικά ζητήματα: Η χρήση μοντέλων φυσικής κλίμακας μπορεί να αντιμετωπίσει προβλήματα ασφάλειας και περιβάλλοντος, που σχετίζονται με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας σε θαλασσινό νερό, καθώς αυτά τα ζητήματα αντιμετωπίζονται σε μικρότερη κλίμακα.
4. Συνολικά δεδομένα: Η συνδυαστική μέθοδος προσέγγισης παρέχει ολοκληρωμένα δεδομένα, τόσο από την υπολογιστική όσο και από την πειραματική μοντελοποίηση, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος ICCP. Στη συνέχεια, η μοντελοποίηση φυσικής κλίμακας μπορεί να επαληθεύσει τα υπολογιστικά μοντέλα, κάτι που είναι κρίσιμο για τη διασφάλιση ποιότητας του συστήματος.
5. Βελτιστοποίηση: Η επαναληπτική φύση της συνδυαστικής προσέγγισης επιτρέπει τη συνεχή βελτίωση του σχεδιασμού του συστήματος ICCP, με αποτέλεσμα ένα αποτελεσματικό σύστημα που αποδίδει καλά στο πραγματικό περιβάλλον του πλοίου. Οι δοκιμές φυσικής κλίμακας επαληθεύουν το σχέδιο κάτω από διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες, διασφαλίζοντας ότι το σύστημα ICCP είναι αποτελεσματικό στην πλειοψηφία των περιπτώσεων.

Συμπερασματικά, συνδυάζοντας τις παραπάνω μεθοδολογίες μπορεί να αναπτυχθεί ένα ισχυρό και αποτελεσματικό σύστημα ICCP για ένα πλοίο, το οποίο έχει ελεγχθεί διεξοδικά, επικυρωθεί και βελτιστοποιηθεί. Αυτό ενισχύει την εμπιστοσύνη στην απόδοση και την αξιοπιστία του συστήματος. Η συνδυασμένη προσέγγιση χρησιμοποιεί αποτελεσματικά τα πλεονεκτήματα τόσο της υπολογιστικής όσο και της πειραματικής μεθόδου μοντελοποίησης φυσικής κλίμακας, προσφέροντας μια ολιστική λύση για το σχεδιασμό συστημάτων ICCP στα πλοία. Εξισορροπεί την αποδοτικότητα κόστους και χρόνου της υπολογιστικής μοντελοποίησης με τον ρεαλισμό, την ασφάλεια και τις περιβαλλοντικές εκτιμήσεις της φυσικής μοντελοποίησης. Η διαδικασία διασφαλίζει ότι ο τελικός σχεδιασμός του συστήματος ICCP είναι αξιόπιστος και ικανός να παρέχει αποτελεσματική καθοδική προστασία στις μεταλλικές κατασκευές του πλοίου.

5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

“Scale effects and verification of modeling of ship cathodic protection systems”. Βασίζεται στο άρθρο V.G. DeGiorgi et al, (1998). Engineering Analysis with Boundary Elements **22**, 41-49.

5.1 Εισαγωγή

Στην ερευνητική αυτή εργασία εξετάζεται η απόδοση ενός συστήματος ICCP σε ένα πλοίο κλάσης CVN (Aircraft Carrier Nuclear – powered) του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ. Η ακρίβεια της υπολογιστικής προσομοίωσης αξιολογείται συγκρίνοντάς την με τα αποτελέσματα ενός πειραματικού μοντέλου φυσικής κλίμακας. Η μελέτη περιλαμβάνει τις περιπτώσεις όπου υπάρχει καταστροφή του χρώματος στον ελάχιστο και στο μέγιστο βαθμό. Η απόδοση του συστήματος ICCP αξιολογείται τόσο σε στατικές όσο και σε δυναμικές συνθήκες λειτουργίας του πλοίου.

5.2 Μεθοδολογία

Μελετήθηκε η γεωμετρία ενός πλοίου της κατηγορίας κύτους κλάσης CVN. Το σύστημα ICCP που εξετάστηκε αποτελείται από 17 ανόδους, 3 ανεξάρτητα τροφοδοτικά και ηλεκτρόδια αναφοράς. Τα ζεύγη ανοδίων τοποθετούνται συμμετρικά κατά μήκος της γάστρας, και συνδέονται με ανεξάρτητα τροφοδοτικά. Αρχικά, δύο ζεύγη ανοδίων (4 άνοδοι) στην πλήρη συνδέονται σε ένα τροφοδοτικό. Επιπλέον, τέσσερα ζεύγη ανοδίων (8 άνοδοι) στο μεσαίο τμήμα του πλοίου συνδέονται σε ένα δεύτερο τροφοδοτικό. Τέλος, δύο ζεύγη ανοδίων και μια μονή άνοδος (5 άνοδοι) βρίσκονται στην περιοχή της πρύμνης και συνδέονται με ένα τρίτο τροφοδοτικό.

Το σύστημα ICCP ελέγχεται από απλούς βρόχους ανατροφοδότησης (feed back loops) που αποτελούνται από ηλεκτρόδια. Παρέχεται ρεύμα που επαρκεί για τη διατήρηση μιας καθορισμένης τιμής δυναμικού στο ηλεκτρόδιο αναφοράς. Υπενθυμίζεται ότι τα τροφοδοτικά, που είναι τοποθετημένα στο εμπρόσθιο και μέσο τμήμα της κατασκευής, έχουν από ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς το καθένα. Το τροφοδοτικό, που είναι τοποθετημένο στο πρυμναίο τμήμα, έχει ένα ζεύγος ηλεκτροδίων αναφοράς που είναι τοποθετημένα συμμετρικά. Η προβλεπόμενη ένδειξη ηλεκτροδίου αναφοράς για την ανάλυση είναι - 0,85 V μετρημένη σε σχέση με ένα ηλεκτρόδιο Ag/AgCl.

Εξετάστηκαν δύο οριακές περιπτώσεις καταστροφής της επίστρωσης της γάστρας του πλοίου. Η μια περίπτωση αντιστοιχεί σε μια ελάχιστου βαθμού καταστροφή στο 2,8 % της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας και η δεύτερη σε μια καταστροφή στο μέγιστο βαθμό δηλαδή στο 15% της βρεχόμενης επιφάνειας.

Οι παραπάνω επιφάνειες μελετήθηκαν σε δυο συνθήκες ροής (δηλαδή σε στατικές και δυναμικές συνθήκες του νερού γύρω από το πλοίο), σε συνδυασμό με καθεμιά από τις παραπάνω περιπτώσεις καταστροφής της βαφής. Οι στατικές συνθήκες αντιστοιχούν στην περίπτωση ακινησίας ή ελλιμενισμού του πλοίου, ενώ η δυναμική κατάσταση ροής αντιστοιχεί στις συνθήκες πλεύσης. Σε όλες τις περιπτώσεις το ηλεκτρικό δυναμικό των ανοδίων θεωρείται σταθερό, και δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος. Η συνολική αντίσταση του συστήματος, βασισμένη στην πόλωση του υλικού, την αγωγιμότητα του θαλασσινού νερού και τη γεωμετρία της κατασκευής, καθορίζει το

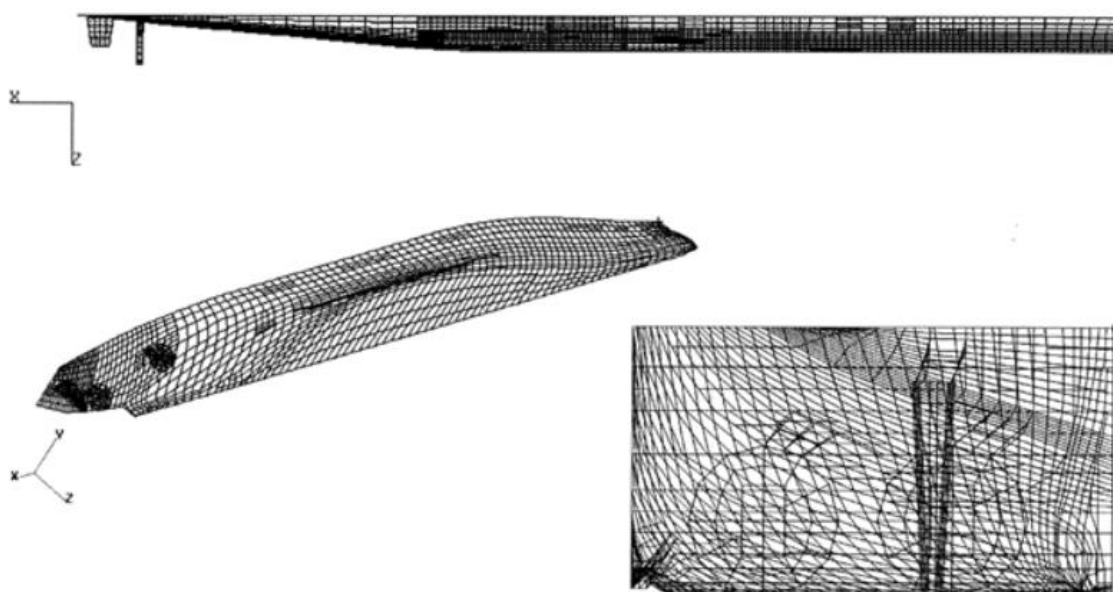
συνολικό ρεύμα που παράγεται. Υπολογίστηκε ότι τα επίπεδα ηλεκτρικού δυναμικού αυξήθηκαν μέχρις ότου να επιτευχθεί ο απαιτούμενος στόχος ηλεκτρικού δυναμικού - 0,85 V σε σχέση με τα ηλεκτρόδια αναφοράς Ag/AgCl.

5.3 Διαδικασία υπολογιστικής και πειραματικής μοντελοποίησης

Το συγκεκριμένο υπολογιστικό μοντέλο λαμβάνει υπόψη τη γεωμετρία του μισού κύτους CVN και του συστήματος ICCP. Περιλαμβάνει λεπτομερή μοντελοποίηση της γάστρας, της καρίνας (παρατροπίδιο, bilge keel), των ελίκων και των πηδαλίων. Οι έλικες μοντελοποιούνται ως συμπαγείς δίσκοι, και λαμβάνεται υπόψη το πάχος τους. Χρησιμοποιούνται τρία διαφορετικά υλικά: α) κράμα νικελίου-αλουμινίου-μπρούτζου (NAB) για την προπέλα, β) χάλυβας για τις περιοχές της γάστρας με το κατεστραμμένο χρώμα, και γ) πλήρως μονωμένο υλικό για τις βαμμένες επιφάνειες. Η μοντελοποίηση περιλαμβάνει μη γραμμικές συνθήκες πόλωσης για το κράμα NAB και τον χάλυβα.

Η γάστρα CVN περιβάλλεται από μια μεγάλη αλλά πεπερασμένη περιοχή θαλασσινού νερού, που εκτείνεται σε απόσταση ίση με δέκα φορές το μήκος του πλοίου τύπου CVN. Ο όγκος του θαλασσινού νερού που περιλαμβάνει αυτή η περιοχή αντιστοιχεί σε ειδική αντίσταση με σταθερή τιμή που θεωρείται ίση με $20 \Omega \cdot \text{cm}$ στο υπολογιστικό μοντέλο.

Η αναπαράσταση του πλέγματος βασίστηκε σε προηγούμενη ερευνητική εργασία, και τα αρχικά πειράματα ολοκληρώθηκαν ως μέρος της διαδικασίας δημιουργίας του πλέγματος CVN. Δεν υπήρξε επίσημη μελέτη βελτίωσης του πλέγματος για το πλοίο CVN. Τα στοιχεία του πλέγματος θεωρείται πως έχουν τετραγωνική γεωμετρία. Το τελικό πλέγμα για την επαλήθευση αποτελείται από 1884 στοιχεία και 7996 σημεία πλέγματος (Εικόνα 47).



Εικόνα 47: Πλέγμα οριακών στοιχείων ενός πλοίου κλάσης CVN του Ναυτικού των ΗΠΑ. (Πηγή: DeGiorgi V.G., et al, 1998)

Η μοντελοποίηση φυσικής κλίμακας είναι μια πειραματική τεχνική, όπου η γραμμική διάσταση της δομής και η αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη χρησιμοποιούν τον ίδιο παράγοντα κλιμάκωσης. Αυτή η μέθοδος μοντελοποίησης χρησιμοποιεί τιμές πυκνότητας ρεύματος, διαφοράς δυναμικού, δυναμικών πόλωσης και πτώσης τάσης στον ηλεκτρολύτη, που είναι ισοδύναμες με εκείνες της πραγματικής κατασκευής του πλοίου. Επιπλέον το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των τιμών υπό συνθήκες ροής εφαρμόζοντας τις πραγματικές ταχύτητες πλεύσης. Παρόλο που τα ηλεκτρικά πεδία μπορεί να είναι υψηλότερα στο θεωρητικό μοντέλο, οι πραγματικές πυκνότητες ρεύματος μπορούν να υπολογιστούν από τα αποτελέσματα του μοντέλου της φυσικής κλίμακας.

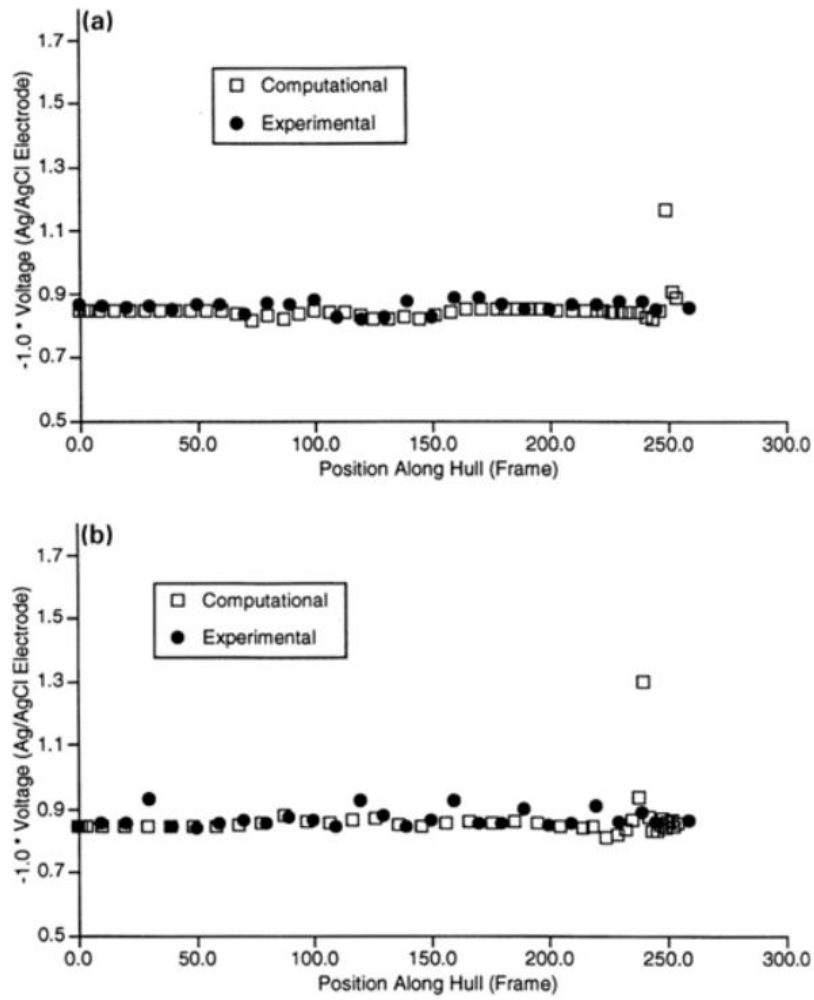
Ο συντελεστής κλιμάκωσης που χρησιμοποιείται εξαρτάται από το μέγεθος του μοντέλου και την αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη, που εφαρμόζονται στην πειραματική διάταξη. Σημειώνεται ότι η μοντελοποίηση σε φυσική κλίμακα προσφέρει πλεονεκτήματα, όπως τη δυνατότητα αναπαράστασης πολύπλοκων γεωμετριών, τη δυνατότητα ενσωμάτωσης υλικών ή και του συνδυασμού τους για την πρόβλεψη γαλβανικών αλληλεπιδράσεων του συστήματος με τα υλικά που χρησιμοποιούνται.

Στη μελέτη περίπτωσης, ένα μοντέλο φυσικής κλίμακας του κύτους CVN και του συστήματος ICCP υποβλήθηκε σε δοκιμές στις εγκαταστάσεις Key West του Naval Research Laboratory. Συλλέχθηκαν λεπτομερείς πληροφορίες για το ρεύμα και το δυναμικό μέσω ενσωματωμένων αισθητήρων σε διάφορες περιπτώσεις κατεστραμμένης βαφής και συνθηκών λειτουργίας.

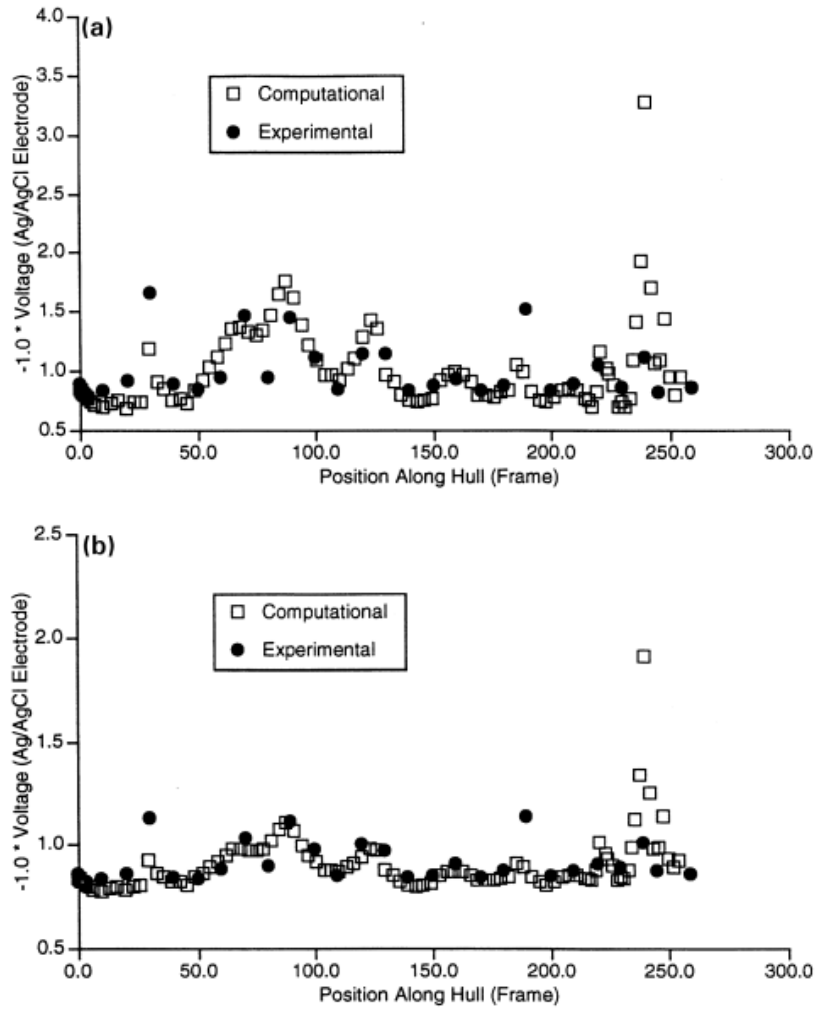
5.4 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα ξεχωριστού ενδιαφέροντος αφορούν το προφίλ δυναμικού της επιφάνειας του κύτους που προσδιορίζεται με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου και του ηλεκτρικού ρεύματος που απαιτείται για να επιτευχθεί αυτό το δυναμικό σε σχέση με το ηλεκτρόδιο αναφοράς. Σημειώνεται ότι το δυναμικό υπολογίζεται για όλα τα σημεία της επιφάνειας του κύτους.

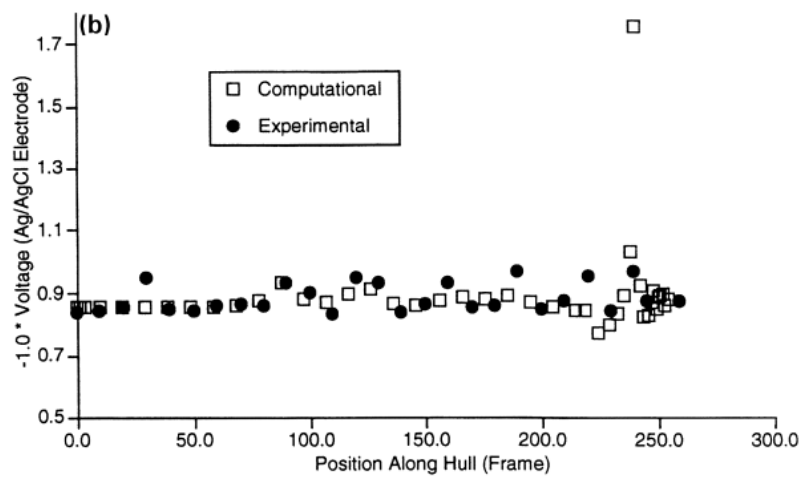
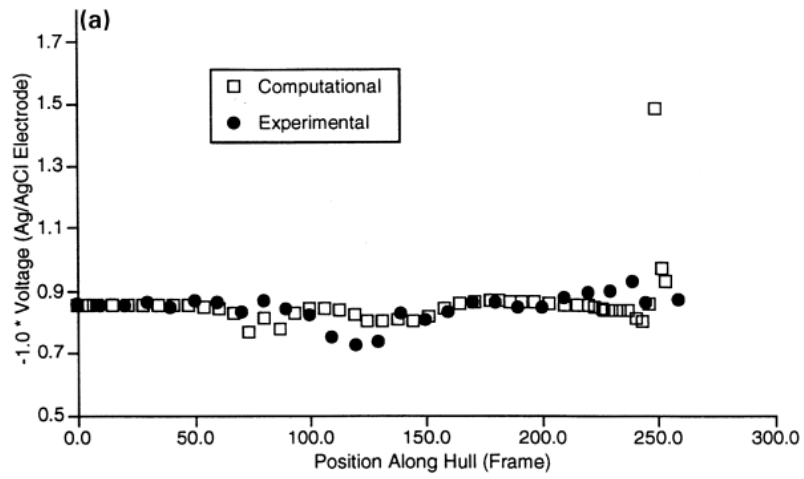
Τα προφίλ ηλεκτρικού δυναμικού κατά μήκος της κεντρικής γραμμής του κύτους και κατά μήκος της επιφάνειας της γάστρας σε βάθος 3m παρουσιάζονται παρακάτω (Εικόνα 48 – 51). Οι μετρήσεις γίνονται κατά μήκος της γάστρας σε ορισμένες θέσεις (πλαίσια - φρακτές), όπου η αρχή τους αντιστοιχεί σε ένα επίπεδο κάθετο στο πιο εμπρόσθιο σημείο της γάστρας στην ίσαλο γραμμή.



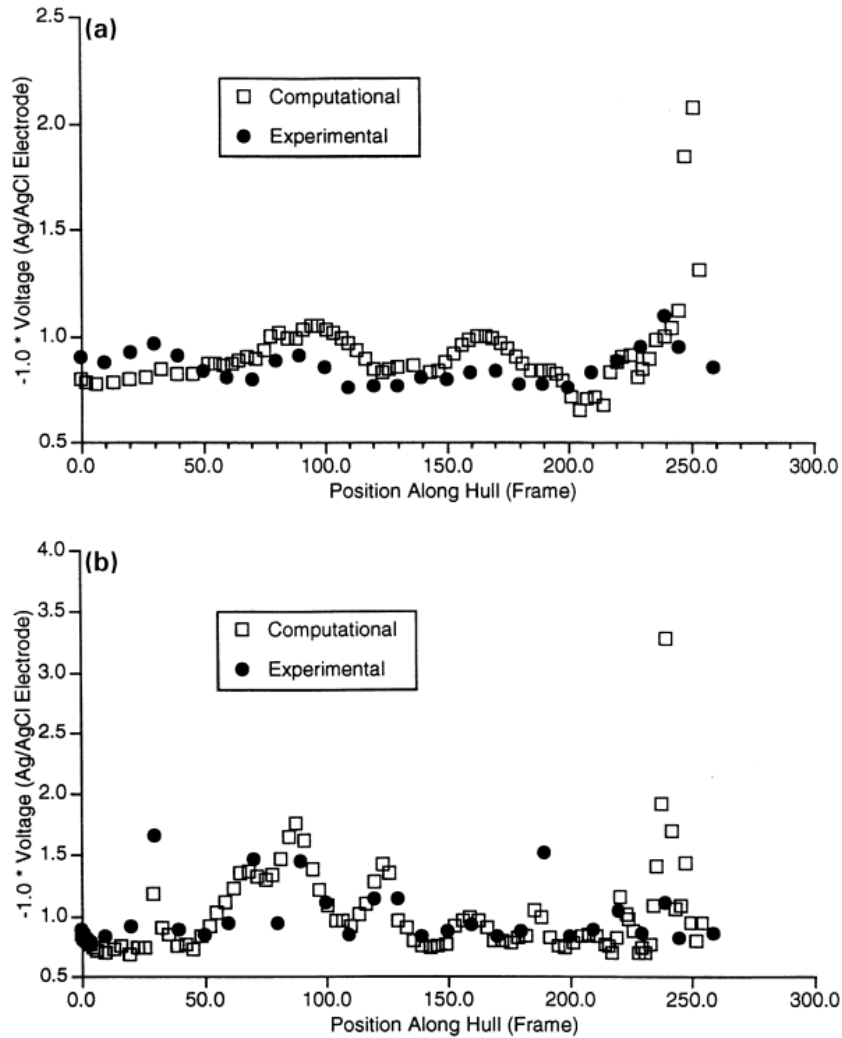
Εικόνα 48: Προφίλ ηλεκτρικού δυναμικού (α) κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της γάστρας και (β) κατά μήκος της επιφάνειας της γάστρας σε βάθος 3 m. Μελέτη σε στατικές συνθήκες μιας περιοχής βαφής ελάχιστα κατεστραμμένης. (Πηγή: DeGiorgi V.G., et al, 1998)



Εικόνα 49: Προφίλ ηλεκτρικού δυναμικού (α) κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της γάστρας και (β) κατά μήκος της επιφάνειας της γάστρας σε βάθος 3 m. Μελέτη σε στατικές συνθήκες μιας περιοχής βαφής κατεστραμμένης στο μέγιστο βαθμό. (Πηγή: DeGiorgi V.G., et al, 1998)



Εικόνα 50: Προφίλ ηλεκτρικού δυναμικού (α) κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της γάστρας και (β) κατά μήκος της επιφάνειας της γάστρας σε βάθος 3 m. Μελέτη σε δυναμικές συνθήκες μιας περιοχής βαφής ελάχιστα κατεστραμμένης. (Πηγή: DeGiorgi V.G., et al, 1998)



Εικόνα 51: Προφίλ ηλεκτρικού δυναμικού (α) κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της γάστρας και (β) κατά μήκος της επιφάνειας της γάστρας σε βάθος 3 m. Μελέτη σε δυναμικές συνθήκες μιας περιοχής βαφής κατεστραμμένης στο μέγιστο βαθμό. (Πηγή: DeGiorgi V.G., et al, 1998)

Τα αποτελέσματα της απαιτούμενης τιμής ρεύματος για τη διατήρηση του επιθυμητού δυναμικού σε σχέση με τα ηλεκτρόδια αναφοράς παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 12). Υπολογίστηκε η συνολική ζήτηση ρεύματος για διάφορους συνδυασμούς περιπτώσεων καταστροφής στο χρώμα και συνθηκών ροής/πλεύσης. Οι διακυμάνσεις στην ζήτηση ρεύματος μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων διαφέρουν ανάλογα με τις συνθήκες βαφής και ροής/πλεύσης.

Πίνακας 12: Ζήτηση ρεύματος από σύστημα ICCP για ένα πλοίο κλάσης CVN με 17 ανόδους και 3 τροφοδοτικά (ηλεκτρόδιο αναφοράς = - 0,85 V Ag/AgCl). (Πηγή: DeGiorgi V.G., et al, 1998)

| Parameter | Current (A) | | |
|------------------------|-------------|--------|--------|
| | NAB | Steel | Total |
| Static—minimum damage | | | |
| Computational | 61.8 | 29.8 | 91.6 |
| Experimental | 50.1 | 31.8 | 81.9 |
| Static—maximum damage | | | |
| Computational | 77.3 | 527.7 | 605.1 |
| Experimental | 54.0 | 650.0 | 704.1 |
| Dynamic—minimum damage | | | |
| Computational | 118.9 | 71.7 | 190.6 |
| Experimental | 204.1 | 110.6 | 314.7 |
| Dynamic—maximum damage | | | |
| Computational | 189.8 | 1528.2 | 1718.0 |
| Experimental | 228.2 | 1609.5 | 1837.7 |

Μια πιο λεπτομερής σύγκριση της συνολικής ποσότητας ζήτησης ρεύματος φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 13), όπου το ρεύμα ζήτησης για την εξασφάλιση πλήρους καθοδικής προστασίας υπολογίστηκε για κάθε τροφοδοτικό ξεχωριστά.

Πίνακας 13: Ζήτηση ρεύματος τροφοδοσίας για ένα προτεινόμενο σύστημα ICCP σε πλοίο κλάσης CVN με 17 ανόδους και 3 τροφοδοτικά (ηλεκτρόδιο αναφοράς = - 0,85 V Ag/AgCl). (Πηγή: DeGiorgi V.G., et al, 1998)

| Parameter | Current (A) | |
|------------------------|---------------|--------------|
| | Computational | Experimental |
| Power supply | | |
| Static—minimum damage | | |
| Fore | Off | Off |
| Mid | 40.4 | 32.6 |
| Aft | 51.2 | 48.4 |
| Total | 91.6 | 81.9 |
| Static—maximum damage | | |
| Fore | 74.2 | 80.6 |
| Mid | 295.4 | 373.9 |
| Aft | 235.4 | 250.0 |
| Total | 605.0 | 704.1 |
| Dynamic—minimum damage | | |
| Fore | Off | Off |
| Mid | 89.6 | 109.1 |
| Aft | 101.0 | 206.0 |
| Total | 190.6 | 314.7 |
| Dynamic—maximum damage | | |
| Fore | 289.4 | 286.9 |
| Mid | 871.6 | 949.2 |
| Aft | 557.0 | 602.7 |
| Total | 1718.0 | 1837.7 |

Δύο συνθήκες αναλύονται λεπτομερώς στους Πίνακες 14 και 15. Εξετάζονται οι συνθήκες ελάχιστης ροής και δυναμικής ροής με μέγιστη ζημιά βαφής, καθώς λαμβάνονται υπόψη το αυξημένο επίπεδο εκτεθειμένου μετάλλου στην σχετικά ομοιόμορφη κατανομή κατά μήκος της γάστρας, καθώς και οι περιοχές των προπελών στο πρωραίο και πρυμναίο τμήμα του πλοίου.

Πίνακας 14: Ζήτηση ρεύματος ανά υλικό/εξάρτημα για ένα προτεινόμενο σύστημα ICCP σε πλοίο κλάσης CVN με 17 ανόδους και 3 τροφοδοτικά (μελέτη σε στατικές συνθήκες μιας επιφάνειας βαφής κατεστραμμένης στο μέγιστο βαθμό και με χρήση ηλεκτροδίου αναφοράς = - 0,85 V Ag/AgCl). (Πηγή: DeGiorgi V.G., et al, 1998)

| Material/component | Current (A) | |
|--------------------|---------------|--------------|
| | Computational | Experimental |
| NAB | | |
| Propellers | 77.3 | 54.0 |
| Fore | 39.3 | 23.5 |
| Aft | 38.0 | 30.5 |
| Steel | | |
| Docking blocks | 58.6 | 59.4 |
| Rudder | 27.7 | 16.0 |
| Bilge keel | 102.4 | 117.2 |
| Waterline | 65.6 | 85.2 |
| Struts | 31.5 | 31.5 |
| Hull | 241.9 | 340.9 |
| Total | 605.0 | 704.1 |

Πίνακας 15: Ζήτηση ρεύματος ανά υλικό/εξάρτημα για ένα προτεινόμενο σύστημα ICCP σε πλοίο κλάσης CVN με 17 ανόδους και 3 τροφοδοτικά (μελέτη σε δυναμικές συνθήκες μιας επιφάνειας βαφής κατεστραμμένης στο μέγιστο βαθμό και με χρήση ηλεκτροδίου αναφοράς = - 0,85 V Ag/AgCl). (Πηγή: DeGiorgi V.G., et al, 1998)

| Material/component | Current (A) | |
|--------------------|---------------|---------------|
| | Computational | Experimental |
| NAB | | |
| Propellers | 189.8 | 228.2 |
| Fore | 90.7 | 103.5 |
| Aft | 99.1 | 124.7 |
| Steel | | |
| Docking blocks | 185.2 | 181.8 |
| Rudder | 85.0 | 43.0 |
| Bilge keel | 174.4 | 290.8 |
| Waterline | 206.8 | 229.8 |
| Struts | 85.8 | 104.4 |
| Hull | 791.0 | 759.5 |
| Total | 1718.0 | 1837.7 |

5.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα βασίζονται στο προφίλ του ηλεκτρικού δυναμικού (Εικόνα 48 - 51) της επιφάνειας του κύτους. Το δυναμικό υπολογίζεται για κάθε σημείο της επιφάνειας. Ωστόσο

οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μόνο σε ορισμένο αριθμό σημείων κατά τη διάρκεια πειραμάτων σε μοντέλο φυσικής κλίμακας και ως εκ τούτου η σύγκριση των τιμών του ηλεκτρικού δυναμικού έγινε με βάση τα δεδομένα των μετρήσεων.

Σε γενικές γραμμές τα υπολογιστικά αποτελέσματα συγκλίνουν με τα πειραματικά. Ωστόσο είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η πειραματική μέτρηση έγινε σε ορισμένα σημεία, ενώ η υπολογιστική ανάλυση παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού δυναμικού για όλα τα σημεία της επιφάνειας του πλοίου. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, αλλά γενικά τα υπολογιστικά αποτελέσματα φαίνεται να βρίσκονται σε συμφωνία με τα πειραματικά.

Επίσης με βάση τον Πίνακα 12, που αφορά τα αποτελέσματα του ηλεκτρικού ρεύματος που απαιτείται για τη διατήρηση του δυναμικού σε σταθερές τιμές σε σχέση με τα ηλεκτρόδια αναφοράς, φαίνεται ότι οι διακυμάνσεις στη ζήτηση ρεύματος μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων εξαρτώνται από τις συνθήκες βαφής και ροής. Συγκεκριμένα τα αποτελέσματα σε στατικές συνθήκες του πλοίου διαφέρουν κατά 11,8% και 14,1% για περιπτώσεις όπου η επιφάνεια βαφής έχει καταστραφεί στον ελάχιστο και το μέγιστο βαθμό αντίστοιχα. Οι διαφορές που υπολογίστηκαν για τις δυναμικές συνθήκες ροής του πλοίου είναι 34,5% και 6,5% αντίστοιχα.

Μια σημαντική διαπίστωση αποτελεί το γεγονός ότι υπάρχει καλή συμφωνία στις τιμές ζήτησης ρεύματος για όλες τις περιπτώσεις εκτός από την περίπτωση της δυναμικής ροής όταν το χρώμα της επιφάνειας είναι σε ελάχιστο βαθμό κατεστραμμένο. Μια διακύμανση της τάξης 34,5% εμφανίζεται στη ζήτηση του ρεύματος προστασίας των ελίκων από NAB. Οι παραπάνω παρατηρήσεις υπογραμμίζουν την επίδραση τόσο της κατάστασης της βαφής της επιφάνειας, όσο και της ροής στην ζήτηση ηλεκτρικού ρεύματος για τη διατήρηση του δυναμικού σε σχέση με τα ηλεκτρόδια αναφοράς σε μια καθορισμένη τιμή (-0,85 V έναντι Ag/AgCl RE). Η καλή συμφωνία μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών τιμών στις τιμές της συνολικής ζήτησης ρεύματος ενισχύει την αξιοπιστία της μεθόδου της υπολογιστικής μοντελοποίησης, ενώ η ύπαρξη διακυμάνσεων υποδεικνύει την ανάγκη για περαιτέρω βελτίωση του μοντέλου για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Μάλιστα, η διαπίστωση ότι οι έλικες από κράμα NAB συνεισφέρουν σημαντικά στη διακύμανση του συνολικού ρεύματος καταδεικνύει τον ιδιαίτερο ρόλο των συγκεκριμένων τμημάτων του συστήματος. Αυτό το συμπέρασμα ανοίγει τον δρόμο για περαιτέρω μελέτες και βελτιώσεις, ιδίως για την αντιμετώπιση των απαιτήσεων σχετικά με το ρεύμα προστασίας των ελίκων τύπου NAB, με μεγάλη ακρίβεια. Το γεγονός ότι οι διαφορές μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων ποικίλλουν ανάλογα με τις συνθήκες βαφής και κίνησης ή ακινησίας του πλοίου υπογραμμίζει τη σημασία της ανάγκης λεπτομερούς ανάλυσης του περιβάλλοντος λειτουργίας του πλοίου. Αυτή η επισήμανση είναι κρίσιμη και δείχνει τη σημασία σχεδιασμού ακόμα πιο εξειδικευμένων μοντέλων, που θα λαμβάνουν υπόψη τις συνθήκες λειτουργίας του πλοίου, που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος ICCP.

Μια πιο λεπτομερής ανάλυση των συνολικών ρευμάτων παρουσιάζεται στην Πίνακα 13, όπου το ρεύμα προστασίας αναφέρεται σε κάθε τροφοδοτικό του συστήματος ξεχωριστά. Σε στατικές συνθήκες ροής, η μεγαλύτερη διακύμανση παρατηρείται στην περιοχή του

μέσου του πλοίου. Οι αποκλίσεις μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για την περιοχή του μέσου του πλοίου είναι 23,9% για στατική ροή με ελάχιστη ζημιά βαφής, 21,0% για στατική ροή με μέγιστη ζημιά βαφής και 28,2% για δυναμική ροή με μέγιστη ζημιά βαφής. Για την κατάσταση δυναμικής ροής με ελάχιστη ζημιά βαφής, η μέγιστη απόκλιση έχει μετακινηθεί και παρατηρείται διακύμανση 51,0 % στην περιοχή της πρύμνης του πλοίου. Αυτή είναι η περιοχή όπου κυριαρχεί το εκτεθειμένο μέταλλο NAB των ελίκων. Αυτό καταδεικνύει τη σημαντική επίδραση των συνθηκών ροής και του βαθμού καταστροφής της βαφής στο ηλεκτρικό ρεύμα, που απαιτείται για καθοδική προστασία, ειδικά στις περιοχές όπου το μέταλλο NAB των ελίκων είναι περισσότερο εκτεθειμένο.

Η λεπτομερής ανάλυση της ζήτησης ρεύματος υπό συνθήκες στατικής ροής-μέγιστης ζημιάς βαφής, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 14, αποκαλύπτει ενδιαφέρουσες πληροφορίες για τις αποκλίσεις μεταξύ του μοντέλου φυσικής κλίμακας και του υπολογιστικού μοντέλου. Σημειωτέον, η μεγαλύτερη διακύμανση στη συνολική ζήτηση ρεύματος προστασίας παρατηρείται σταθερά στο μέσο τμήμα, τονίζοντας την ανάγκη για πρόσθετη προσοχή στη λεπτομέρεια της μοντελοποίησης της καρίνας (παρατροπίδιο, bilge keel).

Μετά από πιο προσεκτική εξέταση των μεμονωμένων εξαρτημάτων, οι πιο σημαντικές διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων του υπολογιστικού και πειραματικού μοντέλου εντοπίζονται στο πηδάλιο και στις προπέλες. Το πηδάλιο παρουσιάζει σημαντική διακύμανση 17,7 A ή 73,0%, ενώ οι έλικες παρουσιάζουν συνολική διακύμανση 23,3 A ή 43,1%. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η διακύμανση δεν είναι ομοιόμορφη στις δύο προπέλες, με τη μέγιστη διαφορά να εμφανίζεται στην προπέλα που είναι τοποθετημένη στο πρωραίο τμήμα. Η εγγύτητα αυτών των χαρακτηριστικών και οι διαφορετικές συνθέσεις υλικών τους υποδηλώνουν ένα πιθανό αποτέλεσμα συνδυασμού υλικών που επηρεάζει την απόκριση πόλωσης στη μοντελοποίηση φυσικής κλίμακας και στην υπολογιστική μοντελοποίηση.

Επιπλέον, τα χαλύβδινα τμήματα της ίσαλου πλεύσης και της γάστρας παρουσιάζουν την επόμενη μεγαλύτερη διαφορά στο απαιτούμενο ρεύμα προστασίας, αφού περιλαμβάνουν περιοχές που απαρτίζονται από την καρίνα (παρατροπίδιο, bilge keel). Η βελτίωση της μοντελοποίησης του bilge keel με μεγαλύτερη ακρίβεια μπορεί να οδηγήσει σε πιο ακριβή αποτελέσματα μεταξύ των υπολογιστικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων για αυτές τις εκτεθειμένες περιοχές.

Θετικά, η συνολική διαφορά ηλεκτρικού ρεύματος των 99,1 A ή 14,1% κρίνεται πολύ καλή. Αυτή η συνολική εκτίμηση δείχνει ότι, παρά τις διακυμάνσεις που παρατηρούνται σε συγκεκριμένες συνιστώσες και περιοχές, η συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων του υπολογιστικού μοντέλου και του μοντέλου φυσικής κλίμακας είναι γενικά ικανοποιητική. Αυτή η λεπτομερής ανάλυση υπογραμμίζει τη σημασία της βελτίωσης του υπολογιστικού μοντέλου, ιδιαίτερα στην περιοχή του παρατροπιδίου (καρίνας, bilge keel), και τονίζει την ανάγκη για ακριβή περιγραφή των υλικών στις περιοχές της έλικας και του πηδαλίου. Η επίτευξη καλύτερης συμφωνίας μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων είναι ζωτικής σημασίας για τον ολοκληρωμένο υπολογισμό του ηλεκτρικού δυναμικού και των απαιτήσεων ρεύματος προστασίας στις δεδομένες συνθήκες.

Ο Πίνακας 15 παρέχει μια λεπτομερή εξέταση των συνθηκών δυναμικής ροής στην περίπτωση της μέγιστης καταστροφής στο χρώμα. Σε αυτή την περίπτωση, η μέγιστη διαφορά έχει μετατοπιστεί από το μεσαίο τμήμα του πλοίου στην περιοχή της πρύμνης. Παρόμοια με την κατάσταση στατικής ροής με τη μέγιστη ζημιά στο χρώμα, η μέγιστη διακύμανση παρατηρείται ανάμεσα στις έλικες και στο πηδάλιο. Τα αποτελέσματα του απαιτούμενου ρεύματος προστασίας ανάμεσα στην υπολογιστική και πειραματική μέθοδο μοντελοποίησης διαφέρουν κατά 42,0 A για το πηδάλιο, με την πειραματικά υπολογισμένη τιμή να εμφανίζεται σχεδόν διπλάσια σε μέγεθος. Αυτό δείχνει ότι η απόκριση πόλωσης που χρησιμοποιείται για τον χάλυβα είναι λανθασμένη όσον αφορά την αναπαράσταση της συμπεριφοράς του υλικού του πηδαλίου. Η διαφορά στην ζήτηση ρεύματος προστασίας στην προπέλα που κυμαίνεται στην τάξη των 131,4 A ή 16,8 % δείχνει μια σχετικά καλή συμφωνία μεταξύ των δύο μοντέλων. Επομένως, η συνολική διαφορά του απαιτούμενου ρεύματος προστασίας των 119,7 A ή 6,5 % μπορεί να θεωρηθεί πολύ ικανοποιητική.

Η μετατόπιση της μέγιστης διαφοράς από το μέσο τμήμα στην πρύμνη του πλοίου κάτω από δυναμικές συνθήκες πλεύσης υπογραμμίζει τη σημασία της εξέτασης ολόκληρου του κύτους του πλοίου και των στοιχείων του για την εκτίμηση της καταστροφής στο χρώμα και της απόκρισης του εφαρμοζόμενου δυναμικού πόλωσης. Η αυξημένη απόκλιση που παρατηρήθηκε στο πηδάλιο υποδηλώνει ότι οι συγκεκριμένες ιδιότητες του υλικού και η αλληλεπίδραση με τις συνθήκες ροής δεν αποτυπώνονται με ακρίβεια με το υπολογιστικό μοντέλο. Περαιτέρω βελτίωση, ιδιαίτερα στην αναπαράσταση των υλικών του πηδαλίου, είναι απαραίτητη για μια πιο ακριβή πρόβλεψη των απαιτήσεων.

Ενώ η συμφωνία ανάμεσα στις δυο μεθόδους όσον αφορά τη συνολική απαίτηση ρεύματος κρίνεται ικανοποιητική, είναι απαραίτητο να αντιμετωπιστούν οι εντοπισμένες αποκλίσεις για μια ολοκληρωμένη κατανόηση της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού και των απαιτήσεων της καθοδικής προστασίας. Αυτή η ανάλυση υπογραμμίζει την πολυπλοκότητα της καταγραφής με μεγάλη ακρίβεια της επίδρασης των συνθηκών ροής, ειδικά γύρω από περιοχές που είναι επιρρεπείς σε μεγάλες υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις.

Συμπερασματικά, τα υπολογιστικά και πειραματικά προφίλ ηλεκτρικού δυναμικού παρουσιάζουν παρόμοια μοτίβα και μεγέθη. Οι λεπτομερείς συγκρίσεις των κατανομών ρεύματος αποκαλύπτουν δύο κύριες αιτίες αποκλίσεων μεταξύ των τιμών που υπολογίζονται με διαφορετικά μοντέλα, που είναι: οι γεωμετρικές απλοποιήσεις και η παράλειψη των πιθανών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των υλικών στις αποκρίσεις πόλωσης που χρησιμοποιούνται στο υπολογιστικό μοντέλο. Οι υπολογιστικές τιμές θα εξαρτώνται πάντα άμεσα από την ακρίβεια των τιμών πόλωσης που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση και δεν μπορούν σε καμία περίπτωση να προβλέψουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υλικών που χρησιμοποιούνται. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές σε συνδυασμό με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και την ανάμειξη των υλικών θα πρέπει να σημειώνονται ξεχωριστά κατά τους υπολογισμούς.

5.6 Συμπεράσματα

Στην παρούσα ερευνητική εργασία εξετάστηκαν τέσσερις βασικές συνθήκες σχεδίασης που συνέδεαν στατικές και δυναμικές ροές με ελάχιστες και μέγιστες καταστάσεις ζημίας

χρώματος. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων από την υπολογιστική μοντελοποίηση με αυτά από την πειραματική μοντελοποίηση απέδειξε ότι τα ηλεκτρικά δυναμικά προφίλ για όλες τις συνθήκες σχεδίασης μπορούν να αποτυπωθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια μέσω της υπολογιστικής μοντελοποίησης. Σε γενικές γραμμές, οι απαιτήσεις του συνολικού ρεύματος όσο και του ρεύματος που απαιτείται για τα εξαρτήματα του πλοίου έδειξαν καλή συμφωνία μεταξύ των δυο μεθόδων. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου εμφανίζονται μεγάλες αποκλίσεις, απαιτείται μια πιο εκτενής ανάλυση της υπολογιστικής μοντελοποίησης ώστε να ληφθούν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Οι διαφορές μεταξύ των υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων οφείλονταν κυρίως: α) στην απλοποίηση της γεωμετρίας του μοντέλου και β) στον χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων των υλικών κατά την υπολογιστική μοντελοποίηση. Στην πρώτη περίπτωση, μια πιο λεπτομερής μοντελοποίηση μπορεί να οδηγήσει σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, που αφορούν τις δύο προπέλες και την καρίνα του πλοίου. Στην δεύτερη περίπτωση, ένας πιο ακριβής χαρακτηρισμός των υλικών του υπολογιστικού μοντέλου μπορεί να συμβάλει σε μια πιο αξιόπιστη αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης των υλικών και στην απόκριση πόλωσης, που εμφανίζονται όταν εφαρμόζεται μια εξωτερική τάση.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μια εκτενής μελέτη σχετικά με τη μέθοδο καθοδικής προστασίας με εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση (ή ρεύμα) (Impressed Current Cathodic Protection - ICCP) στα πλοία. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε λεπτομερής ανάλυση των δύο διαφορετικών μεθοδολογιών σχεδίασης των συστημάτων ICCP στα πλοία. Αυτές οι μεθοδολογίες περιλαμβάνουν την υπολογιστική και την πειραματική μοντελοποίηση, προσφέροντας μια εκτενή και ολοκληρωμένη αναφορά των τρόπων προσέγγισης και ανάλυσης, που εφαρμόστηκαν στο πλαίσιο της έρευνας.

Επιπλέον, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε εκτενής ανασκόπηση της σύγχρονης διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας, επιλέχθηκε και παρουσιάστηκε αναλυτικά μια σχετική μελέτη. Αυτή περιλαμβάνει έρευνα και σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την υπολογιστική και πειραματική μοντελοποίηση ενός πλοίου του πολεμικού ναυτικού των Ηνωμένων Πολιτειών με γάστρα κλάσης CVN. Τα συμπεράσματα από αυτή τη μελέτη συνέβαλαν σε μια εμπειριστατωμένη και σφαιρική κατανόηση των αποτελεσμάτων, ενισχύοντας έτσι τον συνολικό κορμό των γνώσεων που υπήρχαν στον τομέα αυτόν.

Η εργασία έδειξε ότι η ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού συστήματος ICCP απαιτεί μια εμπειριστατωμένη προσέγγιση που βασίζεται στην εκτενή μελέτη και κατανόηση των ηλεκτροχημικών ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό. Η αναλυτική διερεύνηση αυτών των ιδιοτήτων είναι ουσιώδης για να ληφθούν υπόψη όλοι οι πιθανοί παράγοντες και οι αλληλεπιδράσεις που επηρεάζουν την απόκριση πόλωσης των υλικών. Ειδικότερα, η κατανόηση της απόκρισης πόλωσης ενός υλικού αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για τη σχεδίαση αποτελεσματικών συστημάτων ICCP σε πλοία. Αναφέρεται στην αντίδραση του υλικού σε εφαρμοσμένες τάσεις ή ρεύματα και είναι ζωτικής σημασίας για την ακριβή μοντελοποίηση και πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ICCP συστημάτων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Η πειραματική μοντελοποίηση προσφέρει τη δυνατότητα να μελετηθεί η αντίδραση του υλικού σε διάφορες συνθήκες και να επιβεβαιωθούν οι προβλέψεις που προκύπτουν από τα υπολογιστικά μοντέλα. Επίσης η πειραματική μοντελοποίηση παρέχει τη δυνατότητα για την ανάπτυξη και βελτίωση των υπολογιστικών μοντέλων μέσω της σύγκρισης των προβλεπόμενων αποτελεσμάτων σε σχέση με τα πραγματικά πειραματικά δεδομένα. Αντίστοιχα, η υπολογιστική μοντελοποίηση επιτρέπει την πρόβλεψη αποτελεσμάτων μέσα από την προσομοίωση διαφόρων σεναρίων και συνθηκών λειτουργίας χωρίς την ανάγκη για πραγματικές δοκιμές. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει στους μηχανικούς και τους ερευνητές να εξετάσουν τις επιπτώσεις των διαφόρων παραμέτρων στην απόκριση των ICCP συστημάτων και να βελτιστοποιήσουν τον σχεδιασμό τους για μέγιστη απόδοση και αποτελεσματικότητα χωρίς να δαπανώνται υλικά, χρόνος και πόροι. Ωστόσο, η υπολογιστική προσέγγιση πρέπει να στηρίζεται, να επαληθεύεται από πειραματικά δεδομένα και να επιβεβαιώνει την ακρίβεια και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Τέλος, αποδεικνύεται ότι η συνδυασμένη προσέγγιση της πειραματικής και της υπολογιστικής μοντελοποίησης μπορεί να εξασφαλίζει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για τον σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την αξιολόγηση αποτελεσματικών συστημάτων ICCP σε πλοία, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση της απόδοσής τους και την προστασία των μεταλλικών κατασκευών από τη διάβρωση.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ABYC. (2013). ABYC E-2 CATHODIC PROTECTION. 613 Third Street, Suite 10, Annapolis, MD 21403: American Boat & Yacht Council, Inc. Retrieved from <http://www.pcmarinesurveys.com/E-2%20Cathodic%20protection.pdf>
- ABS. (2017). Guidance Notes on Cathodic Protection of Ships. Spring, TX 77389 United States: American Bureau of Shipping. Retrieved from <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/offshore/306-cathodicprotection-offshore-structures/cathodic-protection-offshore-gn-dec18.pdf>
- Arendt, H. F. (2005). Impressed current cathodic protection. *Materials and Corrosion*, 56(4), 271-277. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/maco.200403834>
- Ashworth, V. (2010). 4.18. Principles of cathodic protection. *Shreir's Corros*; Elsevier: New York, NY, USA, 2747-2762.
- Basham, D. L., Wright, J. W., Ferguson, K. I., & Moy, G. W. (2003). Operation and Maintenance of Cathodic Protection Systems. Unified Facilities Criteria (UFC), Department of Defence USA, 1-220.
- British Standard (1991). Cathodic Protection Part 1. Code of Practice for Land and Marine Applications," Section 4. Application to buried structures". BS 7361, 39.
- Bohnes, H. & Funk, D. (1997). Impressed Current Anodes. In W. Von Baeckmann, W. Schwenk, & W. Prinz (Eds.), *Handbook of Cathodic Corrosion Protection* (Chapter 7, pp. 207-224). Elsevier. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/B978-0-88415-056-5.X5000-X>
- Bohnes, H., & Richter, B. (1997). Cathodic protection of ships. In W. Von Baeckmann, W. Schwenk, & W. Prinz (Eds.), *Handbook of Cathodic Corrosion Protection* (Chapter 17, pp. 391-414). Elsevier. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/B978-0-88415-056-5.X5000-X>
- Botha, C. (2000). Cathodic protection for ships. *Marine Technology*, 31-35.
- Bushman, J. B., & Engineer, P. P. C. (2010). Corrosion and cathodic protection theory. Bushman & Associates Inc., Medina.
- DeGiorgi, V. G. (1970). A review of computational analyses of ship cathodic protection systems. *WIT Transactions on Modelling and Simulation*, 19. Retrieved from <https://doi.org/10.2495/BE970811>
- DeGiorgi, V. G., Thomas II, E. D., Lucas, K. E., & Kee, A. (1970). A combined design methodology for impressed current cathodic protection systems. *WIT Transactions on Modelling and Simulation*, 15. Retrieved from <https://doi.org/10.2495/BT960331>
- DeGiorgi, V. G., Thomas III, E. D., & Lucas, K. E. (1998). Scale effects and verification of modeling of ship cathodic protection systems. *Engineering analysis with boundary elements*, 22(1), 41-49. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0955-7997\(98\)80012-X](https://doi.org/10.1016/S0955-7997(98)80012-X)
- DeGiorgi, V. G., & Wimmer, S. A. (2005). Geometric details and modeling accuracy requirements for shipboard impressed current cathodic protection system modeling. *Engineering analysis with boundary elements*, 29(1), 15-28. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2004.09.006>

- DeGiorgi, V. G., & Hogan, E. A. (2005). Experimental vs. computational system analysis. WIT Transactions on Engineering Sciences, 48. Retrieved from <https://doi.org/10.2495/ECOR050041>
- DeGiorgi, V. G., Hogan, E., Lucas, K. E., & Wimmer, S. A. (2005). Shipboard impressed current cathodic protection system (ICCP) analysis. Modeling of Cathodic Protection Systems, 13. Retrieved from <https://doi.org/10.2495/1-85312-889-9/02>
- European Standard (2012). Protection cathodique des coques de bateaux_NF EN 16222, national standard.
- Francis, P. E. (2007). Cathodic Protection. National Physical Laboratory, 1.
- Googan, C. (2021). The cathodic protection potential criteria: Evaluation of the evidence. Materials and Corrosion, 72(3), 446-464. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/maco.202011978>
- Headquarters, U.S. Army Corps of Engineers (HQUSACE). (1999). Operation and maintenance of public works cathodic protection systems. Technical Bulletin 420-49-29, Public Works Technical Bulletin, Alexandria, VA: Department of the Army.
- IPS. (1997). IPS-E-TP-820 - ENGINEERING STANDARD FOR ELECTROCHEMICAL PROTECTION ORIGINAL EDITION.
- Jirapure, S.C., & Borade, A.B., (2014). INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES & RESEARCH TECHNOLOGY Naval Corrosion - Causes and Prevention.
- Kakuba, G. (2005). The impressed current cathodic protection system. Master's Thesis, Technische Universiteit of Eindhoven.
- Kalovelonis, D. T., Rodopoulos, D. C., Gortsas, T. V., Polyzos, D., & Tsinopoulos, S. V. (2020). Cathodic protection of a container ship using a detailed BEM model. Journal of Marine Science and Engineering, 8(5), 359. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/jmse8050359>
- Mainier, F. B., & Perassolli, V. (2014). Ship hull corrosion caused by default and lack of maintenance on the impressed current cathodic protection. IOSR Journal of Engineering, 4(2), 34-39. Retrieved from <https://doi.org/10.9790/3021-04223439>
- Mathiazhagan, A. (2010). Design and Programming of Cathodic Protection for ships. Retrieved from <https://doi.org/10.7763/IJCEA.2010.V1.36>
- Mrdović, L., & Ivošević, Š. (2023). Applications Impressed Current Cathodic Protection of the Ship Hull. In 2023 27th International Conference on Information Technology (IT) (pp. 1-4). IEEE. Retrieved from [10.1109/IT57431.2023.10078679](https://doi.org/10.1109/IT57431.2023.10078679)
- Oh, J. S., & Kim, J. D. (2004). A new protection strategy of impressed current cathodic protection for ship. KSME international journal, 18, 592-596.
- Petronas Technical Standard (PTS). (2003) Manual for cathodic protection (Standard No. PTS 30.10.73.10). Retrieved from <https://documents.pub/document/pts-30107310-cathodic-protection.html>
- Pfeiffer, R. A., Young, J. C., Adams, R. J., & Gedney, S. D. (2019). Higher-order simulation of impressed current cathodic protection systems. Journal of Computational Physics, 394, 522-531. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.06.008>
- Putra, N., Bura, R. O., Aritonang, S., Navalino, D., & Widjayanto, J. (2019). The analysis of failure and reliability factors of impressed current cathodic protection

- (ICCP) design toward underwater line of warship (Case study in kri kcr-40 type). *Engineering and Applied Science Letters*, 2(4), 45-56. Retrieved from <https://doi.org/10.30538/psrp-easl2019.0030>
- Santana Diaz, E., & Adey, R. (2002). Optimisation of the performance of an ICCP system by changing current supplied and position of the anode. *International series on advances in boundary elements*, 475-485. Retrieved from [10.2495/BE020441](https://doi.org/10.2495/BE020441)
 - Seal, A. (2017). Factors influencing rate of corrosion. Retrieved from <https://www.sealxpert.com/factors-influencing-rate-of-corrosion>
 - Schwenk, W. (1997). Fundamentals and Concepts of Corrosion and Electrochemical Corrosion Protection. In W. Von Baeckmann, W. Schwenk, & W. Prinz (Eds.), *Handbook of Cathodic Corrosion Protection* (Chapter 2, pp. 27-76). Elsevier. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/B978-0-88415-056-5.X5000-X>
 - Szabó, S., & Bakos, I. (2006). Impressed current cathodic protection. *Corrosion Reviews*, 24(1-2), 39-62. Retrieved from <https://doi.org/10.1515/CORRREV.2006.24.1-2.39>
 - Tezdogan, T., & Demirel, Y. K. (2014). An overview of marine corrosion protection with a focus on cathodic protection and coatings. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, 65(2), 49-59.
 - Vasilescu, M. V., Panaitescu, M., & Panaitescu, F. V. (2019). Marine Impressed Current Cathodic Protection System. *Hidraulica*, (4), 45-62.
 - Veritas, D. N. & Lloyd, G. (2017). Corrosion protection of ships. CLASS GUIDELINE DNVGL-CG-0288.
 - Von Baeckmann, W. (1997). The History of Corrosion Protection. In W. Von Baeckmann, W. Schwenk, & W. Prinz (Eds.), *Handbook of Cathodic Corrosion Protection* (Chapter 1, pp. 1-25). Elsevier. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/B978-0-88415-056-5.X5000-X>
 - Von Baeckmann, W. & Kamperman, H. (1997). Impressed Current Equipment and Transformer – Rectifiers. In W. Von Baeckmann, W. Schwenk, & W. Prinz (Eds.), *Handbook of Cathodic Corrosion Protection* (Chapter 8, pp. 225-242). Elsevier. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/B978-0-88415-056-5.X5000-X>
 - Xu, L., Xin, Y., Ma, L., Zhang, H., Lin, Z., & Li, X. (2021). Challenges and solutions of cathodic protection for marine ships. *Corrosion Communications*, 2, 33-40. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.corcom.2021.08.003>
 - Yao, P., & Wu, J. (2008). Investigation of Design Methodology for Impressed Current Cathodic Protection Optimum System. *Corrosion Science and Technology*, 7(4), 197-200.
 - Zamani, N. G. (1988). Boundary element simulation of the cathodic protection system in a prototype ship. *Applied Mathematics and Computation*, 26(2), 119-134. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/0096-3003\(88\)90046-X](https://doi.org/10.1016/0096-3003(88)90046-X)
 - Κατσικαδέλης, Ι. (2012). ΣΥΝΟΠΙΑΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ, θεωρία και Εφαρμογές. Αθήνα, Εκδόσεις Συμμετρία.
 - Καρύδης, Π. Α. (2002). Επιθεώρηση, Συντήρηση & Επισκευή της Μεταλλικής Κατασκευής του Πλοίου. 2ηεκδ., Αθήνα, Εκδόσεις ΕΜΠ.