



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΔΠΜΣ «ΝΑΥΤΙΚΗ & ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ & ΕΠΙΣΤΗΜΗ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΘΟΔΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΕ ΠΛΩΤΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ
ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ»

Αναστασία Ι. Καλαρά

Επιβλέπων:

Δημήτριος Ι. Παντελής, Καθηγητής ΕΜΠ

Τριμελής επιτροπή:

Καθηγητής Δημήτριος Ι. Παντελής

Καθηγητής Σπυρίδων Α. Μαυράκος

Καθηγητής Νικόλαος Γ. Τσούβαλης

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΔΠΜΣ «ΝΑΥΤΙΚΗ & ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ & ΕΠΙΣΤΗΜΗ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΘΟΔΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΕ ΠΛΩΤΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ
ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ»

Αναστασία Ι. Καλαρά



Επιβλέπων:

Δημήτριος Ι. Παντελής, Καθηγητής ΕΜΠ

Τριμελής επιτροπή:

*Καθηγητής Δημήτριος Ι. Παντελής
Καθηγητής Σπυρίδων Α. Μαυράκος
Καθηγητής Νικόλαος Γ. Τσούβαλης*

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

Στους γονείς μου,

*των οποίων η πίστη στις δυνατότητες μου υπήρξε
αρωγός σε όλους τους στόχους και τα όνειρα μου.*

ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με αφορμή την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου, αρχικά στον επιβλέποντα Καθηγητή μου, κύριο Δημήτριο Ι. Παντελή για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, που αφορά στον τομέα της υπεράκτιας τεχνολογίας. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου και στον Καθηγητή μου κύριο Σπυρίδωνα Α. Μαυράκο που το έκανε πράξη, δίνοντας τη συγκατάθεση του να μελετηθεί υπεράκτια κατασκευή. Θα πρέπει ωστόσο να ευχαριστήσω ιδιαίτερος το Δρ. Θωμά Π. Μαζαράκο που συνέβαλε με ουσιαστικό τρόπο στην επιτυχή εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ θερμά την κυρία Δώρα Τσιούρβα, διπλωματούχο Χημικό Μηχανικό, υποψήφια διδάκτωρ για την πολύτιμη βοήθεια της και ειδικότερα για την ενθάρρυνση και την εμπιστοσύνη της, στο ότι θα μπορούσα να ανταπεξέλθω σε ένα τόσο ιδιαίτερο γνωστικό πεδίο. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και όσους με στήριζαν σε όλη τη διάρκεια των τελευταίων μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Ελπίζω η εργασία αυτή να αποτελέσει ένα μικρό έναυσμα για περαιτέρω ενασχόληση στον άκρως ενδιαφέρον και ταχέως εξελισσόμενο τομέα της προστασίας από τη διάβρωση πλωτών υπεράκτιων εξεδρών εξόρυξης υδρογονανθράκων.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

Αναστασία Ι. Καλαρά

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<i>Εισαγωγή</i>	15
<i>Περίληψη μεταπτυχιακής εργασίας</i>	16
<i>Λέξεις κλειδιά</i>	17
<i>Postgraduate thesis abstract</i>	18
<i>Keywords</i>	19

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

<i>ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ</i>	20
<i>1.1 Εισαγωγή</i>	20
<i>1.2 Το φαινόμενο της διάβρωσης</i>	22
<i>1.3 Οι διάφοροι τύποι διάβρωσης</i>	24
<i>1.4 Παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο της διάβρωσης</i>	27
<i>1.5 Κινητική της διάβρωσης</i>	31
<i>1.6 Η διάβρωση των ναυπηγικών κατασκευών στο θαλάσσιο περιβάλλον</i>	33
<i>1.7 Η διάβρωση υπεράκτιων (offshore) πλατφορμών εξόρυξης υδρογοναθράκων</i>	36
<i>1.8 Προστασία από τη διάβρωση υπεράκτιων πλατφορμών εξόρυξης υδρογοναθράκων</i>	38

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

<i>ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΘΟΔΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ</i>	39
<i>2.1 Ιστορικά στοιχεία</i>	39
<i>2.2 Θεωρία καθοδικής προστασίας (Cathodic Protection, CP)</i>	39
<i>2.3 Βασικές αρχές της καθοδικής προστασίας</i>	40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

<i>ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΘΟΔΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ</i>	44
<i>3.1 Γενικά</i>	44

3.2 Η μέθοδος θυσιαζόμενης εμβαπτιζόμενης ή ενταφιασμένης ανόδου.....	45
3.2.1 Απαιτήσεις υλικού θυσιαζόμενων ανόδων	49
3.3 Η μέθοδος καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενο ρεύμα (<i>Impress Current Cathodic Protection or ICCP</i>)	51
3.3.1 Οι άνοδοι του συστήματος <i>ICCP</i>	55
3.4 Σχεδίαση ενός συστήματος καθοδικής προστασίας	58
3.4.1 Τα δυναμικά προστασίας	58
3.4.2 Η πυκνότητα ρεύματος.....	59
3.5 Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος καθοδικής προστασίας.....	60
3.5.1 Πλεονεκτήματα της μεθόδου θυσιαζόμενων ανόδων.....	61
3.5.2 Πλεονεκτήματα της μεθόδου επιβαλλόμενου ρεύματος.....	61
3.5.3 Η αντίσταση των ανόδων	62
3.6 Κίνδυνοι	64
3.7 Καθοδική προστασία υπεράκτιων πλατφορμών εξόρυξης υδρογονανθράκων	65

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

<i>ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΑΙ ΚΑΘΟΔΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΠΛΩΤΩΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΩΝ ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ</i>	66
4.1 Η διάβρωση σε πλωτές πλατφόρμες εξόρυξης υδρογονανθράκων	66
4.2 Προστασία από τη διάβρωση πλωτών πλατφορμών εξόρυξης υδρογονανθράκων.....	66
4.3 Η πλωτή ημιβυθισμένη εξέδρα εξόρυξης υδρογονανθράκων (<i>semi- submersible rig</i>).....	68
4.4 Εφαρμοζόμενοι μέθοδοι καθοδικής προστασίας σε πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή εξόρυξης υδρογονανθράκων (<i>semi- submersible rig</i>).....	70
4.4.1 Καθοδική προστασία με τη μέθοδο επιβαλλόμενου ρεύματος <i>ICCP</i>	70
4.4.2 Καθοδική προστασία με τη μέθοδο θυσιαζόμενων ανόδων	71
4.5 Εφαρμογή κατάλληλων επιστρωμάτων σε πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή εξόρυξης υδρογονανθράκων (<i>semi- submersible rig</i>).....	74

4.6 Η πλωτή ημιβυθισμένη εξέδρα εξόρυξης υδρογονανθράκων (<i>semi- submersible rig</i>) που εξετάζεται	78
--	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΘΟΔΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΠΛΩΤΗΣ ΗΜΙΒΥΘΙΣΜΕΝΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ

<i>ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ</i>	84
---------------------------------------	----

5.1 Γενικά	84
------------------	----

5.2 Εξωτερική καθοδική προστασία με τη μέθοδο επιβαλλόμενου ρεύματος (<i>ICCP</i>)	86
--	----

5.2.1 Υπολογιστικό μέρος	88
--------------------------------	----

5.2.2 Προτεινόμενο σύστημα καθοδικής προστασίας <i>ICCP</i> (Τεχνική προδιαγραφή)	95
---	----

5.2.3 Ανάλυση των προτεινόμενων εξαρτημάτων του συστήματος <i>ICCP</i>	98
--	----

5.3 Εξωτερική καθοδική προστασία με τη μέθοδο των θυσιαζόμενων ανόδων για την προστασία της βρεχόμενης επιφάνειας της δεδομένης κατασκευής	100
--	-----

5.3.1 Προτεινόμενες θυσιαζόμενες άνοδοι αλουμινίου (<i>Aluminium anodes</i>) για την προστασία της βρεχόμενης μεταλλικής επιφάνειας	101
---	-----

5.3.2 Υπολογιστικό μέρος θυσιαζόμενων ανόδων της εξωτερικής μεταλλικής επιφάνειας	103
---	-----

5.4 Καθοδική προστασία με τη μέθοδο των θυσιαζόμενων ανόδων για την προστασία δεξαμενών	107
---	-----

5.4.1 Προτεινόμενη καθοδική προστασία για τις δεξαμενές έρματος της πλωτής ημιβυθισμένης κατασκευής	107
---	-----

5.4.2 Υπολογιστικό μέρος απαιτούμενων θυσιαζόμενων ανόδων αλουμινίου για δεξαμενές έρματος	109
--	-----

5.4.3 Προτεινόμενη καθοδική προστασία για τις δεξαμενές ποσίμου νερού και νερού εξόρυξης της πλωτής ημιβυθισμένης κατασκευής	113
--	-----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ COMSOL

<i>Multiphysics</i> ® 4.3b	114
----------------------------------	-----

6.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων ΜΠΣ	114
6.2 Το Λογισμικό Comsol Multiphysics 4.3b	114
6.3 Το Λογισμικό Comsol Multiphysics 4.3b, Corrosion Module	115
6.4 Προσομοίωση καθοδικής προστασίας για τη δεδομένη πλωτή ημιβυθισμένη εξέδρα με τη μέθοδο ICCP, μέσω του λογισμικού COMSOL Multiphysics® 4.3b	117
6.4.1 Θεωρία επίλυσης και παράμετροι του προβλήματος	117
6.4.2 Δημιουργία πλέγματος στοιχείων	119
6.4.3 Επίλυση (Solution) και αποτελέσματα	123
6.4.4 Διαδικασία μοντελοποίησης.....	126
6.5 Προσομοίωση καθοδικής προστασίας για τη δεδομένη πλωτή ημιβυθισμένη εξέδρα με τη μέθοδο θυσιαζόμενων ανόδων, μέσω του λογισμικού COMSOL Multiphysics® 4.3b	133
6.5.1 Θεωρία επίλυσης και παράμετροι του προβλήματος	133
6.5.2 Δημιουργία πλέγματος στοιχείων	136
6.5.3 Επίλυση (Solution) και αποτελέσματα	138
6.5.4 Διαδικασία μοντελοποίησης.....	141
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο	
ΓΕΝΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΛΥΣΗΣ.....	148
7.1 Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων	148
7.2 Διερεύνηση σύγκλισης (Convergence Analysis).....	148
7.3 Γενικά αποτελέσματα.....	158
7.3.1 Επίλυση (Solution):	161
7.3.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων	162
Συμπεράσματα	165
Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	167
Βιβλιογραφία - Αναφορές	168

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο**

Σχήμα 1.1: Υπεράκτιες (Offshore) κατασκευές στο διαβρωτικό θαλάσσιο περιβάλλον.....	21
Σχήμα 1.2: Διάβρωση υπεράκτιων κατασκευών (Corrosion of offshore structures)	23
Σχήμα 1.3: Διάβρωση σε υδατικό περιβάλλον	24
Σχήμα 1.4: Σχηματική απεικόνιση των συνηθέστερων μορφών διάβρωσης	26
Σχήμα 1.5: Γραφική παράσταση της ηλεκτροδιακής κινητικής συμπεριφοράς Zn.....	32
Σχήμα 1.6: Διάγραμμα του ρυθμού διάβρωσης του χάλυβα συναρτήσει του pH (Corrosion Rate of Steel vs. pH)	33
Σχήμα 1.7: Γραφική παράσταση από τα αποτελέσματα τριών διαφορετικών μελετών που δείχνουν ρυθμούς διάβρωσης χάλυβα ως συνάρτηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου.....	34
Σχήμα 1.8: Διάγραμμα της σχετικής μείωσης του πάχους του μετάλλου συναρτήσει των ζωνών... 35	
Σχήμα 1.9: Οι κυριότερες τεχνολογίες υπεράκτιων κατασκευών εξόρυξης πετρελαίου “Courtesy Offshore Magazine and Mustang Engineering”	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση των ανοδικών και καθοδικών αντιδράσεων στην επιφάνεια του μετάλλου (Anodic and cathodic reactions at a metal surface)	41
Σχήμα 2.2: Γραφική παράσταση της κινητικής των ανοδικών και καθοδικών αντιδράσεων (Kinetics of anodic and cathodic reactions)	42
Σχήμα 2.3: Αναγωγή του οξυγόνου με ελεγχόμενη διάχυση (Diffusion controlled reduction of oxygen)	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

Σχήμα 3.1: Σχηματική απεικόνιση των μεθόδων καθοδικής προστασίας (αριστερά οι θυσιαζόμενες άνοδοι και δεξιά με επιβαλλόμενο ρεύμα)	44
Σχήμα 3.2: Σχηματικό διάγραμμα της καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενες ανόδους. Στην πράξη, η άνοδος μπορεί να είναι τοποθετημένη ακριβώς πάνω στην κατασκευή	45
Σχήμα 3.3: Σύστημα καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενες ανόδους στο θαλασσινό νερό (Sacrificial Anode CP System in Seawater)	46
Σχήμα 3.4: Απεικόνιση θυσιαζόμενων ανόδων πλωτής υπεράκτιας κατασκευής για εσωτερική και εξωτερική προστασία.....	46
Σχήμα 3.5: Απεικόνιση θυσιαζόμενων ανόδων σε δεξαμενές έρματος (Ballast tanks)	50

Σχήμα 3.6: Απεικόνιση θυσιαζόμενων ανόδων σε πλατφόρμα εξόρυξης πετρελαίου	51
Σχήμα 3.7: Σχηματικό διάγραμμα της καθοδικής προστασίας χρησιμοποιώντας την τεχνική του επιβαλλόμενου ρεύματος (Schematic diagram of cathodic protection using the Impressed - current technique)	51
Σχήμα 3.8: Απεικόνιση της μεθόδου επιβαλλόμενου ρεύματος (ICCP) σε πλωτή υπεράκτια πλατφόρμα.....	52
Σχήμα 3.9: Σύστημα καθοδικής προστασίας με την τεχνική του επιβαλλόμενου ρεύματος (Impressed Current Cathodic Protection System)	53
Σχήμα 3.10: Απεικόνιση ενός πλήρους συστήματος με μονάδα ελέγχου	54
Σχήμα 3.11: Διάγραμμα προσδιορισμού του δυναμικού προστασίας του χάλυβα στο θαλάσσιο νερό (Determination of protection potential for steel in sea water).....	58
Σχήμα 3.12: Σχηματική απεικόνιση θυσιαζόμενων ανόδων απομακρυσμένων ή προσαρτημένων πάνω στην κατασκευή (stand off anodes or flush mounted anodes).....	63
Σχήμα 3.13: Μεταφορά πλωτής ημιβυθισμένης πλατφόρμας.....	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο	
Σχήμα 4.1: 3D Απεικόνιση μιας πλωτής ημιβυθισμένης κατασκευής εξόρυξης πετρελαίου	68
Σχήμα 4.2: Καθοδική προστασία με τη μέθοδο επιβαλλόμενου ρεύματος ICCP σε πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή (semi - submersible rig)	71
Σχήμα 4.3: Καθοδική προστασία με τη μέθοδο θυσιαζόμενων ανόδων σε πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή (semi-submersible rig)	72
Σχήμα 4.4: Θυσιαζόμενες άνοδοι για υπεράκτιες εφαρμογές (Sacrificial anodes for offshore application)	73
Σχήμα 4.5: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος επικαλύψεων	75
Σχήμα 4.6: Η πλωτή ημιβυθισμένη πλατφόρμα εξόρυξης πετρελαίου (μέσω λογισμικού πακέτου comsol Multiphysics® 4.3b)	79
Σχήμα 4.7: Η πλωτή ημιβυθισμένη πλατφόρμα εξόρυξης πετρελαίου στο operating design draft (μέσω λογισμικού πακέτου comsol Multiphysics® 4.3b).....	79
Σχήμα 4.8: Σχέδιο γενικής διάταξης (πρόοψη) πλωτής ημιβυθισμένης πλατφόρμας εξόρυξης πετρελαίου	81
Σχήμα 4.9: Σχέδιο γενικής διάταξης (πλάγια όψη) πλωτής ημιβυθισμένης πλατφόρμας εξόρυξης πετρελαίου	82
Σχήμα 4.10: Σχέδιο γενικής διάταξης (κάτοψη) πλωτής ημιβυθισμένης πλατφόρμας εξόρυξης πετρελαίου	83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

Σχήμα 5.1: Διάταξη ενός πλήρους συστήματος ICCP.....	87
Σχήμα 5.2: Διατακτικό σχέδιο εξαρτημάτων του συστήματος ICCP.....	96
Σχήμα 5.3: Διαγραμματικό σχέδιο καλωδίωσης του συστήματος ICCP.....	97
Σχήμα 5.4: Σχηματική απεικόνιση των εξαρτημάτων του συστήματος ICCP της εταιρείας Wilson Walton International	99
Σχήμα 5.5: Σχηματική απεικόνιση θυσιαζόμενων ανόδων της εξωτερικής μεταλλικής επιφάνειας CORAL® A-type της εταιρείας Skarpenord Corrosion AS	101
Σχήμα 5.6: Σχηματική απεικόνιση θυσιαζόμενων ανόδων δεξαμενών έρματος της εταιρείας Cathwell AS.....	108

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο

Σχήμα 6.1: Μοντέλα με ανάλυση πλέγματος Coarser & Finer.....	120
Σχήμα 6.2: Είδη στοιχείων πλέγματος (element type).....	120
Σχήμα 6.3: Το πλέγμα (mesh) του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε (κατασκευή και ηλεκτρολύτης)	121
Σχήμα 6.4: Το πλέγμα (mesh analysis: Extremely fine) στην πλωτή κατασκευή.....	122
Σχήμα 6.5: Απεικόνιση κατανομής του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στην εξωτερική επιφάνεια της ημιβυθισμένης κατασκευής	123
Σχήμα 6.6: Απεικόνιση κατανομής του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στην εξωτερική επιφάνεια του ποντογιού της ημιβυθισμένης κατασκευής	124
Σχήμα 6.7: Απεικόνιση κατανομής του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στην εξωτερική επιφάνεια των κυλίνδρων της ημιβυθισμένης κατασκευής	124
Σχήμα 6.8: Απεικόνιση κατανομής του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στην εξωτερική επιφάνεια των bracing της ημιβυθισμένης κατασκευής.....	125
Σχήμα 6.9: Απεικόνιση κατανομής της πυκνότητας του ρεύματος του ηλεκτρολύτη στην εξωτερική επιφάνεια της ημιβυθισμένης κατασκευής.....	125
Σχήμα 6.10: Απεικόνιση της γεωμετρίας για τη δεδομένη πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή.....	126
Σχήμα 6.11: Απεικόνιση της μισής γεωμετρίας για τη δεδομένη πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή μαζί με τον ηλεκτρολύτη	128
Σχήμα 6.12: Απεικόνιση στοιχείων του πλέγματος (element size parameters, mesh: Extremely fine) από το λογισμικό	131
Σχήμα 6.13: Απεικόνιση της επίλυσης από το λογισμικό.....	132

Σχήμα 6.14: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων της κατανομής δυναμικού του ηλεκτρολύτη από το λογισμικό	132
Σχήμα 6.15: Σχηματική απεικόνιση της πόλωσης των θυσιαζόμενων ανόδων (μπλε καμπύλη) και της αντίδρασης αναγωγής του οξυγόνου στην επιφάνεια του χάλυβα (κόκκινη καμπύλη)	133
Σχήμα 6.16: Η ανάλυση πλέγματος του μοντέλου (πλωτή κατασκευή και ηλεκτρολύτης) που χρησιμοποιήθηκε (μνήμη RAM ηλεκτρονικού υπολογιστή 2GB).....	137
Σχήμα 6.17: Η ανάλυση πλέγματος: Λεπτή (fine) στην κατασκευή	137
Σχήμα 6.18: Το δυναμικό του ηλεκτρολύτη στις θυσιαζόμενες ανόδους και στην πλωτή κατασκευή.....	138
Σχήμα 6.19: Το δυναμικό του ηλεκτρολύτη στο ποντόνι της πλωτής κατασκευής και στις θυσιαζόμενες ανόδους	139
Σχήμα 6.20: Το δυναμικό του ηλεκτρολύτη στους κυλίνδρους της πλωτής κατασκευής και στις θυσιαζόμενες ανόδους	139
Σχήμα 6.21: Η πυκνότητα ρεύματος του ηλεκτρολύτη στις θυσιαζόμενες ανόδους	140
Σχήμα 6.22: Απεικόνιση της μισής γεωμετρίας για τη δεδομένη πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή μαζί με τον ηλεκτρολύτη (transparency).....	143
Σχήμα 6.23: Απεικόνιση της μισής γεωμετρίας για τη δεδομένη πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή (transparency).....	143
Σχήμα 6.24: Απεικόνιση της επίλυσης από το λογισμικό (μνήμη RAM ηλεκτρονικού υπολογιστή 2GB).....	147
Σχήμα 6.25: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων της κατανομής δυναμικού του ηλεκτρολύτη από το λογισμικό	147
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο	
Σχήμα 7.1: Η κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στις ανόδους και στην πλωτή κατασκευή (Mesh: Finer).....	150
Σχήμα 7.2: Η κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στις ανόδους και στην πλωτή κατασκευή (Mesh: Fine).....	151
Σχήμα 7.3: Η κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στις ανόδους και στην πλωτή κατασκευή (Mesh: Normal).....	152
Σχήμα 7.4: Η κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στις ανόδους και στην πλωτή κατασκευή (Mesh: Coarse)	153
Σχήμα 7.5: Η κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στις ανόδους και στην πλωτή κατασκευή (Mesh: Coarser).....	154

Σχήμα 7.6: Η κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στις ανόδους και στην πλωτή κατασκευή (Mesh: Extra Coarse)	155
Σχήμα 7.7: Η κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στις ανόδους και στην πλωτή κατασκευή (Mesh: Extremely Coarse)	156
Σχήμα 7.8: Στατιστικά στοιχεία της ανάλυσης πλέγματος από το λογισμικό	159
Σχήμα 7.9: Το μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος που εφαρμόστηκε	160
Σχήμα 7.10: Η ποιότητα των στοιχείων του πλέγματος που εφαρμόστηκε.....	160
Σχήμα 7.11: Η κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στις ανόδους και στην πλωτή κατασκευή.....	162

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ*ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο*

Πίνακας 1.1: Ο ρυθμός διάβρωσης χάλυβα για διαφορετικές συνθήκες έκθεσης 35

*ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο*

Πίνακας 3.1: Η γαλβανική σειρά ορισμένων μετάλλων στο θαλασσινό νερό 47

Πίνακας 3.2: Η γαλβανική σειρά ορισμένων μετάλλων από την εταιρία Cathwell σε δεδομένες συνθήκες 48

Πίνακας 3.3: Παράμετροι λειτουργίας θυσιαζόμενων ανόδων από διαφορετικά υλικά 50

Πίνακας 3.4: Υλικά των ανόδων του συστήματος ICCP (Impressed-current anode materials) 56

Πίνακας 3.5: Ιδιότητες ανόδων επιβαλλόμενης τάσης (Properties of impressed-current anodes) 57

Πίνακας 3.6: Απαιτούμενο δυναμικό για την καθοδική προστασία (Potential required for cathodic protection) 59

Πίνακας 3.7: Απαιτούμενες πυκνότητες ρεύματος για την προστασία του χάλυβα (Current densities required to protect steel) 60

Πίνακας 3.8: Οι ιδιότητες των θυσιαζόμενων ανόδων (Properties of sacrificial anodes) 60

Πίνακας 3.9: Η μέση αντίσταση διαφόρων υλικών (Average resistivities of some materials) 62

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

Πίνακας 4.1: Ταξινόμηση του τύπου της πλωτής ημιβυθισμένης κατασκευής εξόρυξης πετρελαίου “ generation ” 69

Πίνακας 4.2: Εφαρμοζόμενες επικαλύψεις εξωτερικών ζωνών υπεράκτιων πλωτών κατασκευών (μέσω λογισμικού πακέτου comsol Multiphysics® 4.3b)..... 76

Πίνακας 4.3: Κύριες διαστάσεις κατασκευής..... 80

Πίνακας 4.4: Στοιχεία της κατασκευής για τη μελέτη καθοδικής προστασίας..... 80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

Πίνακας 5.1: Ελάχιστες απαιτήσεις προστασίας από διάβρωση των εξωτερικών μεταλλικών επιφανειών, Lloyd's Register, Corrosion Control, Rules and Regulations for the Classification of Mobile Offshore Units..... 85

Πίνακας 5.2: Προτεινόμενες ελάχιστες πυκνότητες ρεύματος καθοδικής προστασίας του χάλυβα χωρίς επικαλύψεις κινητών κατασκευών (Recommended minimum current densities for cathodic protection of bare steel of mobile structures), Bureau Veritas Information Note NI 423 89

Πίνακας 5.3: Προτεινόμενες αρχικές και τελικές πυκνότητες ρεύματος (A/m^2) καθοδικής προστασίας του χάλυβα χωρίς επικαλύψεις στο θαλασσινό νερό, συναρτήσει του βάθους και του κλίματος της περιοχής βασισμένο στη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού (Recommended initial and final design current densities (A/m^2) for seawater exposed bare metal surfaces, as a function of depth and 'climatic region' based on surface water temperature DNV-RP-B401)..... 90

Πίνακας 5.4: Προτεινόμενες μέσες πυκνότητες ρεύματος (A/m^2) καθοδικής προστασίας του χάλυβα χωρίς επικαλύψεις στο θαλασσινό νερό, συναρτήσει του βάθους και του κλίματος της περιοχής βασισμένο στη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού (Recommended mean design current densities (A/m^2) for seawater exposed bare metal surfaces, as a function of depth and 'climatic region' based on surface water temperature) DNV-RP-B401 90

Πίνακας 5.5: Πυκνότητες ρεύματος προστασίας για λόγους μελέτης (Current density values for design purposes), Lloyd's Register, Corrosion Control, Rules and Regulations for the Classification of Mobile Offshore Units 90

Πίνακας 5.6: Οδηγίες για το συντελεστή αστοχίας λεπτού φιλμ επικαλύψεων (γενικά), Guidance on thin film coating breakdown (general), Bureau Veritas Information Note NI 423 91

Πίνακας 5.7: Συνιστώμενες σταθερές a και b για τον υπολογισμό των συντελεστών αστοχίας των επικαλύψεων (Recommended constants a and b for calculation of paint coating breakdown factors), DNV-RP-B401 91

Πίνακας 5.8: Πίνακας των εξαρτημάτων του συστήματος ICCP..... 95

Πίνακας 5.9: Κατάλογος θυσιαζόμενων ανόδων της εξωτερικής μεταλλικής επιφάνειας CORAL® A-type της εταιρείας Skarpenord Corrosion AS 101

Πίνακας 5.10: Κατάλογος θυσιαζόμενων ανόδων δεξαμενών έρματος της εταιρείας Cathwell AS..... 108

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο

Πίνακας 6.1: Οι κινητικοί παράμετροι του ηλεκτροδίου (electrode kinetics parameters)..... 118

Πίνακας 6.2: Οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση..... 135

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο

Πίνακας 7.1: Η παραμετρική ανάλυση των αποτελεσμάτων σε όλες τις δυνατές αναλύσεις πλέγματος 157

Πίνακας 7.2 : Όρια δυναμικού (προστασίας) χάλυβα ως προς Ag /AgCl στο θαλασσινό νερό (*Steel potential limits versus Ag/AgCl sea water*)..... 164

Εισαγωγή

Η διαρκής αύξηση της υπεράκτιας δραστηριότητας που σχετίζεται με την εξερεύνηση και την παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου σε όλο και μεγαλύτερα βάθη, ώθησε στην ανεύρεση νέων τύπων πλοίων και θαλασσίων κατασκευών που θα εξυπηρετούσαν τις νέες αυτές ανάγκες. Με τη θεαματική ανάπτυξη της υπεράκτιας τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια και την εισαγωγή των νέων αυτών θαλασσίων κατασκευών έπρεπε να αναζητηθούν λύσεις για τη διασφάλιση της ορθής λειτουργίας και της ακεραιότητας αυτών των αρκετά πολυδάπανων πλωτών βιομηχανιών.

Το θαλάσσιο περιβάλλον είναι ιδιαίτερα «επιθετικό» για όλα τα πλοία και τις υπεράκτιες μεταλλικές κατασκευές. Η προστασία των επιφανειών ακόμα και με τις καλύτερες και ακριβότερες επικαλύψεις από μόνη της δεν είναι αρκετή, αφού η εφαρμοσμένη επίστρωση είναι πολύ ευάλωτη σε μηχανικές βλάβες και αλλοιώσεις. Οι τεράστιες οικονομικές επιπτώσεις από κάθε μορφή διάβρωσης επέβαλλαν την ανάγκη για ανάπτυξη κατάλληλων μεθόδων προστασίας και πρόληψης από τη διάβρωση.

Η καθοδική προστασία (Cathodic Protection, CP) είναι μία από τις πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους προστασίας της μεταλλικής κατασκευής από διάβρωση, αφού αυτή μπορεί να αποτρέψει ή να μειώσει τη διάβρωση σε οποιοδήποτε μέταλλο ή κράμα που εκτίθεται σε ένα επιθετικό περιβάλλον. Θεωρείται ενδεχομένως, η σημαντικότερη μέθοδος ελέγχου του φαινομένου της διάβρωσης και είναι η μόνη από τις μεθόδους που μπορεί να προσφέρει ολοκληρωμένη προστασία ή να καταστήσει ένα αποδεκτό επίπεδο προστασίας. Το σύστημα καθοδικής προστασίας πρέπει να συνδυάζεται με ένα κατάλληλο σύστημα επικαλύψεων, το οποίο μειώνει την απαιτούμενη πυκνότητα ρεύματος, βελτιώνει την κατανομή του ρεύματος και με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή προστασία.

Περίληψη μεταπτυχιακής εργασίας

Οι υπεράκτιες κατασκευές σε όλη τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής τους έρχονται συνεχώς αντιμέτωπες με το φαινόμενο της διάβρωσης που προκαλείται από το θαλάσσιο περιβάλλον. Για το λόγο αυτό ακριβώς, εξευρίσκονται όλο και πιο καινοτόμες μέθοδοι αντιμετώπισης αυτού του καίριου προβλήματος παγκοσμίως. Οι μέθοδοι της καθοδικής προστασίας αποτελούν το σημαντικότερο τρόπο προστασίας έναντι της διάβρωσης των θαλασσιών κατασκευών. Η μέθοδος των θυσιαζόμενων ανόδων (Sacrificial Anodes Cathodic Protection, SACP) εφαρμόζεται ευρέως σε πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου, ενώ η μέθοδος του επιβαλλόμενου ρεύματος (Impressed Current Cathodic Protection, ICCP) αποτελεί τον πλέον απαραίτητο τρόπο προστασίας για όλες τις πλωτές κατασκευές μεγάλου μεγέθους.

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση σε καύσιμη ύλη, κατά κύριο λόγο πετρέλαιο και φυσικό αέριο, οδήγησε όλο και περισσότερο στην αναζήτηση νέων φυσικών κοιτασμάτων από τη στεριά στη θάλασσα. Αρχικά σε μικρά, αλλά γρήγορα σε όλο και μεγαλύτερα θαλάσσια βάθη, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί η ανάγκη για κατασκευή υπεράκτιων κατασκευών, που να επιτρέπουν την εξόρυξη σε βάθη μεγαλύτερα ακόμη και των 3000m. Η ανάγκη αυτή, έδωσε ώθηση στις υπεράκτιες δραστηριότητες, εξελίσσοντας την υπεράκτια τεχνολογία και επιστήμη. Η πολυδάπανη αυτή πλωτή βιομηχανία έπρεπε επίσης, όπως γίνεται και στα πλοία, να προστατευτεί από το απειλητικό φαινόμενο της διάβρωσης.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας μελετώνται οι σημαντικότερες μέθοδοι καθοδικής προστασίας για μια πλωτή ημιβυθισμένη (semi-submersible) πλατφόρμα εξόρυξης υδρογονανθράκων. Πιο αναλυτικά, εξετάζεται η μέθοδος των θυσιαζόμενων ανόδων (SACP) και η μέθοδος του επιβαλλόμενου ρεύματος (ICCP), καθώς και τα προβλήματα από την εφαρμογή τους. Παρουσιάζονται επίσης υπολογισμοί του ποσού των ανόδων που απαιτούνται στη μέθοδο των θυσιαζόμενων ανόδων, καθώς και του απαιτούμενου ρεύματος προστασίας στη μέθοδο ICCP. Η πρόβλεψη της κατανομής του δυναμικού και του ρεύματος αποτελούν σημαντικά εργαλεία για την πρόβλεψη της εξέλιξης της διάβρωσης, καθώς και τον εντοπισμό των σημείων που αναμένεται να είναι ευπαθή σε διάβρωση.

Η ολοκληρωμένη πρόταση καθοδικής προστασίας για μια πλωτή ημιβυθισμένη (semi-submersible) εξέδρα εξόρυξης υδρογονανθράκων διαμορφώθηκε με τη χρήση του υπολογιστικού λογισμικού COMSOL Multiphysics® Corrosion Module, που βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Ουσιαστικά με το λογισμικό αυτό επιτυγχάνεται απευθείας προσδιορισμός των βέλτιστων προτεινόμενων συστημάτων καθοδικής προστασίας. Περιλαμβάνει δηλαδή την προσομοίωση του συστήματος καθοδικής προστασίας με τη μέθοδο του επιβαλλόμενου ρεύματος (ICCP) και την προσομοίωση της καθοδικής προστασίας με τη μέθοδο των θυσιαζόμενων ανόδων (SACP), ώστε να ανιχνευτούν περιοχές της κατασκευής που είναι ευαίσθητες σε επιταχυνόμενη διάβρωση.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική δομείται σε τρεις βασικές ενότητες. Στην πρώτη ενότητα (κεφάλαια 1-4) παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της καθοδικής προστασίας στο θαλάσσιο περιβάλλον, επικεντρώνοντας το ενδιαφέρον στις υπεράκτιες κατασκευές (offshore). Στη δεύτερη ενότητα (κεφάλαιο 5) παρουσιάζεται μια πλήρης μελέτη καθοδικής προστασίας για δεδομένη υπάρχουσα υπεράκτια κατασκευή σε πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες και συνθήκες λειτουργίας. Η τρίτη ενότητα (κεφάλαια 6-7) αφορά την επίλυση του προβλήματος μέσω της προσομοίωσης του συστήματος καθοδικής προστασίας με τη βοήθεια ενός υπολογιστικού πακέτου που βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Λέξεις κλειδιά

Διάβρωση, καθοδική προστασία, υπεράκτιες κατασκευές, πλωτή ημιβυθισμένη πλατφόρμα εξόρυξης υδρογονανθράκων, η μέθοδος των θυσιαζόμενων ανόδων (SACP), η μέθοδος του επιβαλλόμενου ρεύματος (ICCP), προσομοίωση, λογισμικό με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), COMSOL Multiphysics® Corrosion Module.

Postgraduate thesis abstract

Offshore structures throughout their operational lifetime are constantly confronted with the phenomenon of corrosion caused by the marine environment. For this reason, more and more innovative methods are found for coming up against such a crucial problem worldwide. Cathodic protection methods are the most important way to protect marine structures against corrosion. Sacrificial anodes cathodic protection method (SACP) is widely applied on oil rigs, while impressed current cathodic protection method (ICCP) is the most appropriate way of protection for all large floating structures.

The continuously increasing demand for fuel, mainly oil and gas, led even more in search of new natural resources from land to the sea. Initially at shallow but quickly at deeper water depths, as a result there was a major need for construction of offshore structures, allowing extraction even at depths of 3000m. This need gave impetus to offshore activities, evolving offshore technology and science. This expensive floating industry also, as performed for ships, ought to be protected from the sinister phenomenon of corrosion.

In this postgraduate thesis cathodic protection methods for a semi-submersible drilling platform are examined. Specifically, sacrificial anodes cathodic protection method (SACP) and impressed current cathodic protection method (ICCP) are to be studied and the problems of their application, as well. Furthermore, calculations are presented regarding the amount of anodes required for sacrificial anodes' method of and the required current for ICCP process. Prediction of potential and current distribution are important tools for predicting corrosion evolution and also identification of the areas likely to be susceptible to corrosion.

An accomplish cathodic protection proposal for a semi-submersible platform was modulated by using the computational software package COMSOL Multiphysics® Corrosion Module, based on the finite element method (FEM). Virtually, this is achieved by identifying the best proposed cathodic protection system. This software also includes i.e. simulation of the cathodic protection system by impressed current (ICCP) and simulation of cathodic protection by sacrificial anodes, to detect regions of the structure that are susceptible to accelerated corrosion.

The present master thesis is composed of three main sections. In the first section (chapters 1-4) the main principles of cathodic protection in a marine environment are presented, focusing on offshore structures. The second section (chapter 5) presents a comprehensive study of cathodic protection for an existing offshore structure in real environmental conditions and operating conditions. The third section (Chapters 6-7) resolving the problem through simulation of cathodic protection system using a computer package based on the finite element method and exports results.

Keywords

Corrosion, cathodic protection, offshore structures, semi-submersible drilling platform, sacrificial anodes cathodic protection method (SACP), impressed current cathodic protection method (ICCP), simulation, finite element method software (FEM), COMSOL Multiphysics® Corrosion Module.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

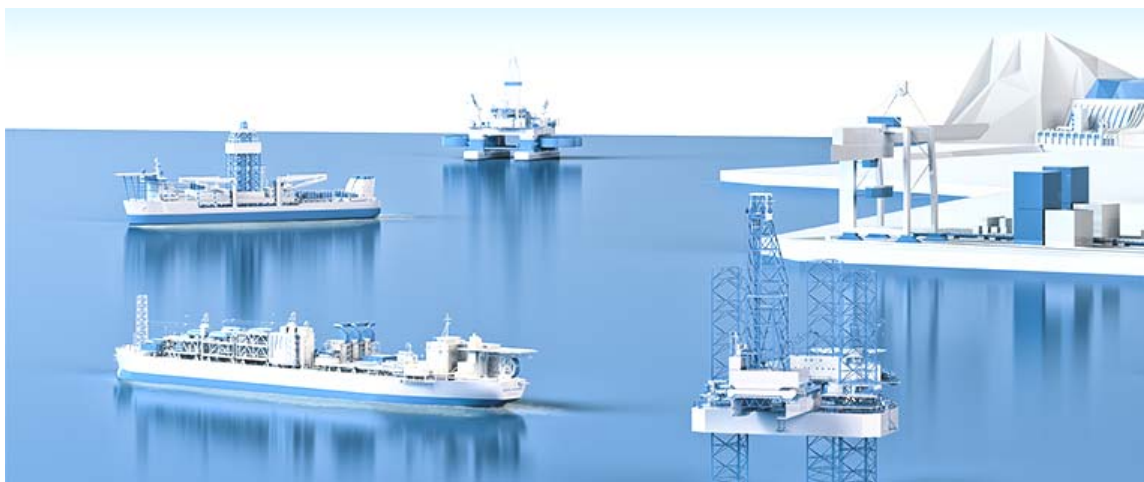
ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

1.1 Εισαγωγή

Η διάβρωση των θαλασσίων κατασκευών αποτελεί ένα τεράστιο ζήτημα με μεγάλες οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις παγκοσμίως. Για πολλές ανεπτυγμένες χώρες, το κόστος από τη διάβρωση είναι ιδιαίτερα υψηλό και μπορεί να ανέρχεται ακόμα και στο 3.5 έως 4.5% του ακαθάριστου εθνικού προϊόντος. Αυτή η οικονομική επιβάρυνση αντιπροσωπεύει τις μετρήσιμες ζημιές που σχετίζονται με τη διάβρωση, αλλά οι απώλειες που δεν μπορούν να προσδιοριστούν ποσοτικά, αποτελούν επίσης μέρος του κόστους για τη βιομηχανία και την κοινωνία. Τα μεγέθη αυτά αφορούν μόνο στο άμεσο κόστος διάβρωσης και προστασίας, που ουσιαστικά είναι το κόστος για την προστασία και για την αντικατάσταση των κατασκευών που διαβρώθηκαν. Το ότι τα μεγέθη είναι τόσο υψηλά γίνεται αντιληπτό από το γεγονός ότι η ποσότητα του σιδήρου που καταστρέφεται από διάβρωση κάθε χρόνο εκτιμάται στο 1/4 ή 1/3 της ετήσιας παραγωγής. Το έμμεσο κόστος της διάβρωσης είναι επίσης σημαντικό, αφού περιλαμβάνει τις απώλειες στην παραγωγικότητα λόγω των δυσλειτουργιών, των διακοπών λειτουργίας, των καθυστερήσεων, των αστοχιών κ.α. Η μελέτη του φαινομένου της διάβρωσης μπορεί να βοηθήσει τη βιομηχανία να προβλέψει και να αποτρέψει τέτοιες απώλειες.

Το θαλάσσιο περιβάλλον προκαλεί φθορά, τόσο της χαλύβδινης επιφάνειας, όσο και άλλων μεταλλικών μερών των πλοίων και των θαλασσίων κατασκευών. Η διάβρωση προκαλεί την υποβάθμιση των ιδιοτήτων του μεταλλικού υλικού λόγω χημικών ή ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Οι συνέπειες του φαινομένου της διάβρωσης για τα πλοία και τις θαλάσσιες κατασκευές είναι πολλαπλές. Πιο αναλυτικά επέρχεται μείωση του πάχους, μείωση της αντοχής του μετάλλου και αύξηση των εφαρμοζόμενων τάσεων. Επίσης δημιουργείται αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας και συνεπώς αύξηση της αντίστασης τριβής του σκάφους, δηλαδή μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για την πρόωση.

Η διάβρωση είναι ένα σοβαρό πρόβλημα για τις πλωτές υπεράκτιες κατασκευές (βλέπε σχήμα 1.1), λόγω των ακραίων συνθηκών λειτουργίας και την ύπαρξη έντονων διαβρωτικών συνθηκών. Το ακραίο περιβάλλον λειτουργίας καθιστά την προστασία από τη διάβρωση των σταθερών υπεράκτιων πλατφορμών, των πλωτών υπεράκτιων πλατφορμών και των μονάδων παραγωγής και αποθήκευσης υδρογονανθράκων (Floating Production Storage and Offloading, FPSOs) ένα ιδιαίτερα δύσκολο έργο. Για τη διασφάλιση επαρκούς προστασίας από τη διάβρωση κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής αυτών των κατασκευών, πλήθος παραμέτρων πρέπει να συνυπολογιστούν.



Σχήμα 1.1: Υπεράκτιες (Offshore) κατασκευές στο διαβρωτικό θαλάσσιο περιβάλλον^{[36], [40]}

1.2 Το φαινόμενο της διάβρωσης ^{[1],[3],[4]}

Έχουν δοθεί διάφοροι ορισμοί για την περιγραφή του φαινομένου της διάβρωσης. Η πιο διαδεδομένη ερμηνεία του όρου είναι η ακόλουθη:

«Ως διάβρωση ορίζεται η αλληλεπίδραση ενός μετάλλου με το περιβάλλον του, που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων του μετάλλου και που συχνά μπορεί να καταλήξει στην υποβάθμιση της λειτουργίας του μετάλλου, του περιβάλλοντος ή του τεχνικού συστήματος, που αυτά αποτελούν τμήμα του (ISO 8044,1986)» .

Ένας επιπλέον ορισμός, ο οποίος προέκυψε από συζητήσεις στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ομοσπονδίας Διάβρωσης, της Διεθνούς Επιτροπής θαλάσσιας Διάβρωσης και Ρύπανσης των Υφάλων και Διεθνών Συνεδρίων διατυπώνεται ως εξής :

«Διάβρωση λέγεται κάθε αυθόρμητη, κατ' επέκταση εκβεβιασμένη, ηλεκτροχημικής, κατ' επέκταση χημικής, κατ' επέκταση μηχανικής, κατ' επέκταση βιολογικής φύσης αλλοίωση της επιφάνειας των μετάλλων και των κραμάτων που οδηγεί σε απώλεια υλικού».

Ο ίδιος ορισμός ισχύει, εκτός από τα μεταλλικά (μέταλλα και κράματα) και σε μη μεταλλικά υλικά, με την παρατήρηση ότι σε αυτά υπερέχει η αλλοίωση φυσικής ή χημικής φύσης ως προς την ηλεκτροχημική (π.χ. πολυμερή) και μεγαλώνει η αλλοίωση βιολογικής φύσης (π.χ. ξύλο, πέτρα).

Σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο, κάθε υλικό που έχει κατασκευαστεί με μία σειρά διεργασιών και είναι επομένως ενεργειακά αναβαθμισμένο υλικό σε σχέση με τις πρώτες ύλες του, έχει την προδιάθεση αν αφεθεί ελεύθερο στο περιβάλλον, να υποβαθμιστεί ενεργειακά. Τα μέταλλα αναγόμενα στη μεταλλική τους μορφή είναι συνήθως ενεργειακά αναβαθμισμένα υλικά σε σχέση με τις πρώτες ύλες τους, οπότε έχουν την τάση να επανέλθουν στη φυσική και σταθερή οξειδωμένη τους μορφή, η οποία βρίσκεται σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη από ότι τα καθαρά μέταλλα. Συγκεκριμένα υπάρχει η τάση να ενωθούν με το οξυγόνο και να μετατραπούν σε οξειδία ή ενδεχομένως και σε άλλες ενώσεις από τις οποίες προήλθαν, με ταυτόχρονη απομάκρυνση θερμότητας. Η αυθόρμητη αυτή προδιάθεση κυρίως των μεταλλικών υλικών να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση από την οποίαν προήλθαν αποτελεί τη βασική αιτία της διάβρωσης.

Η διάβρωση θεωρείται φαινόμενο θερμοδυναμικά αυθόρμητο σε οποιοσδήποτε συνθήκες. Η διάβρωση που χαρακτηρίζεται ως αυθόρμητη, πραγματοποιείται σε φυσικό περιβάλλον στον αέρα, σε γλυκό ή θαλασσινό νερό ή στο έδαφος. Σε έντονο διαβρωτικό περιβάλλον (όπως υψηλή θερμοκρασία, ραδιενέργεια, ανοδική ηλεκτρική φόρτιση, χημικές ουσίες, κ.λ.π.) η διαδικασία της διάβρωσης επιταχύνεται και σε αυτή την περίπτωση η διάβρωση χαρακτηρίζεται ως εκβιασμένη. Το φαινόμενο της διάβρωσης είναι κυρίως ηλεκτροχημικό. Κατά τη διάβρωση το μεταλλικό υλικό υπό την επίδραση του περιβάλλοντος

χάνει ηλεκτρόνια, τα οποία δεσμεύονται από το οξυγόνο του περιβάλλοντος. Υπάρχει δηλαδή αύξηση του σθένους του μετάλλου κατά την ηλεκτροχημική αντίδραση:



Το φαινόμενο της διάβρωσης είναι επιφανειακό, ουσιαστικά εντοπίζεται στην εκτεθειμένη προς το περιβάλλον επιφάνεια του μετάλλου. Ως επιφάνεια του μετάλλου δεν εννοείται μόνο η γεωμετρική, αλλά η πραγματική, που περιλαμβάνει και τις επιφανειακές ανωμαλίες, τους πόρους, τα ενεργά κέντρα καθώς και τους ενεργούς δρόμους από αταξίες δομής. Μόνο μια τέτοια επιφάνεια είναι έδρα των φαινομένων της διάβρωσης και μόνο δια μέσου της διεπιφάνειας “πραγματική επιφάνεια σώματος - διαβρωτικό περιβάλλον” πραγματοποιείται μεταφορά μάζας και ενέργειας. Είναι δυνατό να σχηματίζονται στην επιφάνειά του ενώσεις με έντονη πρόσφυση σε αυτή, με αποτέλεσμα το συνολικό βάρος να παραμένει σταθερό ή ακόμα και να αυξάνει. Έτσι ως απώλεια υλικού εννοείται η απώλεια ως προς την αρχική μορφή του υλικού και όχι απαραίτητα η απώλεια μάζας του.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του φαινομένου της διάβρωσης είναι η πολυπλοκότητα του και η συχνά μη προβλέψιμη φύση του, ο τοποχρονικός και τοποχημικός χαρακτήρας του, η ευαισθησία του στις διάφορες συνθήκες και στην εναλλαγή τους, η ποικιλία των μορφών του, που μαζί με την ποικιλία των μεθόδων προστασίας που υπάρχουν και με την ποικιλία των συνθηκών εφαρμογής τους καθιστούν κάθε περίπτωση διάβρωσης ιδιαίτερο πρόβλημα. Έτσι παλαιότερη πείρα από παραπλήσια ή και στην ίδια περίπτωση είναι απλώς υποβοηθητική. Δηλαδή για κάθε πρόβλημα χρειάζεται να εξαχθούν τα δεδομένα της διάβρωσης από το συνδυασμό των μακροσκοπικών παρατηρήσεων, των θερμοδυναμικών και των κινητικών δεδομένων. Παρακάτω φαίνονται οι επιπτώσεις από τη διάβρωση σε υπεράκτιες κατασκευές (βλέπε σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2: Διάβρωση υπεράκτιων κατασκευών (*Corrosion of offshore structures*)

1.3 Οι διάφοροι τύποι διάβρωσης^{[1],[5],[8]}

Η διάβρωση θα μπορούσε να ταξινομηθεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, έτσι διακρίνεται σε διάβρωση χαμηλής θερμοκρασίας και σε διάβρωση υψηλής θερμοκρασίας, σε υγρή ή απλώς διάβρωση και σε ξηρή διάβρωση ή οξειδωση. Υγρή ή απλώς διάβρωση συμβαίνει παρουσία υδατικού περιβάλλοντος, δηλαδή σε υδατικά διαλύματα ή υγρασία και αφορά στις περισσότερες μορφές διάβρωσης. Το πιο κοινό παράδειγμα αποτελεί η διάβρωση του χάλυβα από το νερό (βλέπε σχήμα 1.3). Ξηρή διάβρωση ή οξειδωση: συμβαίνει απουσία υγρής φάσης σε ξηρό αέριο περιβάλλον. Ατμοί και αέρια αποτελούν την αιτία της διάβρωσης στην περίπτωση αυτή. Η ξηρή διάβρωση συνδέεται με υψηλές θερμοκρασίες.



Σχήμα 1.3: Διάβρωση σε υδατικό περιβάλλον

Η διάβρωση των μετάλλων μπορεί να διακριθεί στη χημική διάβρωση, όπου τα μέταλλα βρίσκονται εκτεθειμένα σε οξυγόνο ή σε όξινο ή αλκαλικό περιβάλλον, στην ηλεκτροχημική διάβρωση, δηλαδή την ηλεκτρόλυση, στη μηχανική (φυσική) διάβρωση, όπου με την τριβή προκαλείται φθορά της επιφάνειας με απομάκρυνση μικρών σωματιδίων με μηχανικό τρόπο και στη βιολογική διάβρωση η οποία προκαλείται από την παρουσία μικροοργανισμών (βακτηρίδια).

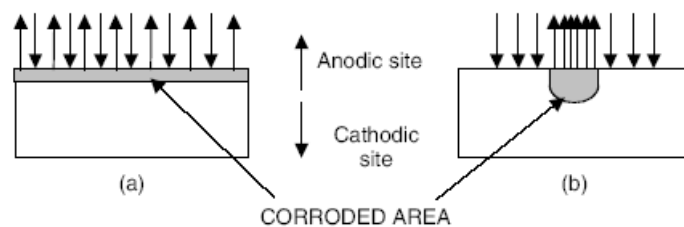
Η ηλεκτρόλυση είναι το φυσικό φαινόμενο της διάβρωσης μεταλλικών επιφανειών, που δημιουργείται από τη ροή ιόντων από αρνητικά φορτισμένα μέταλλα προς θετικά φορτισμένα μέταλλα όταν αυτά βρίσκονται συνδεδεμένα στο ίδιο περιβάλλον. Έτσι δημιουργείται μεταξύ των μετάλλων μια διαφορά δυναμικού η οποία εμφανίζεται σαν ηλεκτρική τάση. Η τάση αυτή είναι ανάλογη με τη ροή των προαναφερομένων ιόντων και όσο μεγαλύτερη γίνεται τόσο μεγαλύτερο είναι το φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης.

Όλα τα είδη διάβρωσης εμπίπτουν σε μία από τις ακόλουθες κατηγορίες σύμφωνα με τη Ευρωπαϊκή ομοσπονδία διάβρωσης:

- ❖ Διάβρωση στον αέρα (ξηρό, υγρό, καθαρό, ή ρυπασμένο),
- ❖ Διάβρωση μέσα ή πάνω στο έδαφος (ξηρό, υγρό ή ρυπασμένο),
- ❖ Διάβρωση σε γλυκό νερό (μέσα, πάνω ή σε γειτνίαση, καθαρό, ή ρυπασμένο),
- ❖ Διάβρωση σε θαλασσινό νερό (μέσα, πάνω ή σε γειτνίαση, καθαρό, ή ρυπασμένο),
- ❖ Διάβρωση με καυσαέρια ή θερμά αέρια (ξηρά ή με υγρασία),
- ❖ Χημική διάβρωση (με χημικά μέσα),
- ❖ Πυρηνική διάβρωση (σε υγρό ή ξηρό περιβάλλον).

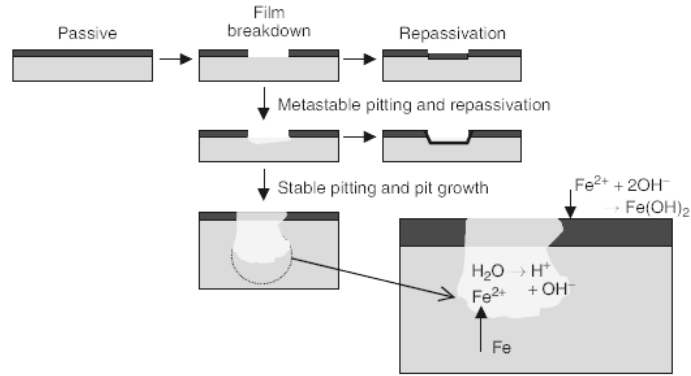
Συνηθέστερα είδη υγρής διάβρωσης

- ❖ Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση (Uniform or general corrosion), σχήμα 1.4 (α)
- ❖ Γαλβανική διάβρωση (Galvanic corrosion), σχήμα 1.4 (ε)
- ❖ Διάβρωση με βελονισμούς (Pitting corrosion), σχήμα 1.4 (c)
- ❖ Διάβρωση χαραγής ή με σχισμές (Crevice corrosion), σχήμα 1.4 (d)
- ❖ Περικρυσταλλική (Intergranular corrosion)
- ❖ Εκλεκτική προσβολή – έκπλυση (Selective attack - leaching)
- ❖ Σπηλαιώδης μηχανική διάβρωση (Cavitation)
- ❖ Διάβρωση εκ τριβής ή ρευστομηχανική διάβρωση (Erosion corrosion), σχήμα 1.4 (f)
- ❖ Διάβρωση από τριβή παλινδρόμησης (Fretting corrosion)
- ❖ Διάβρωση κόπωσης (Corrosion fatigue)
- ❖ Ρωγμάτωση από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση ή διάβρωση με μηχανική καταπόνηση που οδηγεί σε ψαθυρή θραύση (Stress corrosion cracking)
- ❖ Βλάβη από υδρογόνο (Hydrogen damage).

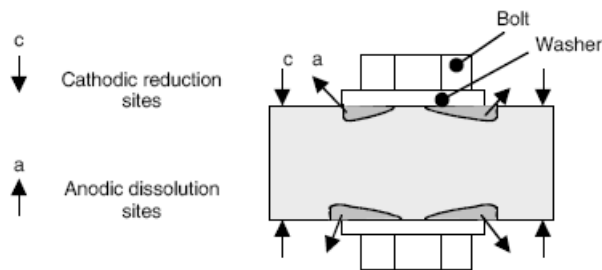


(α) Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση
(Uniform or general corrosion)

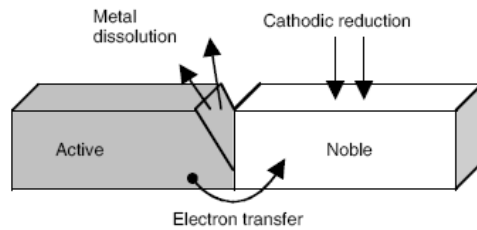
(β) Τοπική (Localized)



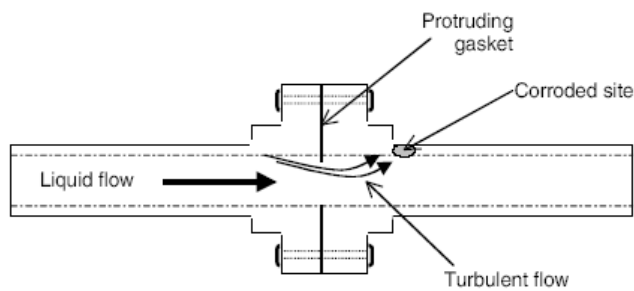
(c) Διάβρωση με βελονισμούς (Pitting Corrosion)



(d) Διάβρωση χαραγής ή με σχισμές (Crevice Corrosion)



(e) Γαλβανική διάβρωση (Galvanic Corrosion)



(f) Διάβρωση εκ τριβής ή ρευστομηχανική διάβρωση (Flow induced corrosion)

Σχήμα 1.4: Σχηματική απεικόνιση των συνηθέστερων μορφών διάβρωσης [23]

1.4 Παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο της διάβρωσης^{[1],[3],[5]}

Υπάρχουν πάρα πολλοί παράγοντες που υπεισέρχονται στη μελέτη σχεδιασμού μιας κατασκευής και που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την αποτελεσματική πρόληψη από τη διάβρωση. Παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν και επιταχύνουν τη διάβρωση και που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη, είναι οι παράγοντες που επιδρούν στην ταχύτητα της διάβρωσης, καθώς και το περιβάλλον που αυτή θα λειτουργήσει. Οι παράγοντες αυτοί θα πρέπει να αποφεύγονται όταν επιθυμούμε να προστατέψουμε από τη διάβρωση μία εγκατάσταση, η οποία αρχίζει τώρα να λειτουργεί ή πιθανόν να λειτουργεί ήδη και είτε προβλέπεται προστασία είτε και αν ακόμη δεν προβλέπεται.

➤ **Πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος**

Η πραγματοποίηση πολλών ταυτόχρονων ηλεκτροχημικών δράσεων μπορεί να αυξήσει το ρεύμα διάβρωσης, χωρίς να αποκλείεται και το αντίθετο, ανάλογα με το εξεταζόμενο μέταλλο.

➤ **Αγωγιμότητα του περιβάλλοντος**

Όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα του διαβρωτικού περιβάλλοντος (π.χ. θαλασσινό νερό) τόσο μεγαλύτερη είναι και η διάβρωση.

➤ **Θερμοκρασία**

Η αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται και αύξηση των χημικών δράσεων. Η επίδραση της θερμοκρασίας στη διάβρωση εξαρτάται από την επίδραση επί των παραγόντων που επηρεάζουν τη διαβρωτική δράση (π.χ. τη διαλυτότητα και τη διάχυση του οξυγόνου, το pH, τη διαλυτότητα και τις φυσικές ή χημικές μεταβολές των προστατευτικών επιστρωμάτων, το δυναμικό των γαλβανικών στοιχείων, τη ρόφηση των αναστολέων διάβρωσης κ.α.).

➤ **Ενεργή οξύτητα (pH)**

Το pH επιδρά στο ρυθμό διάβρωσης, είτε μεταβάλλοντας τα χαρακτηριστικά της καθοδικής (αναγωγικής) δράσης π.χ. το δυναμικό ισορροπίας, είτε μεταβάλλοντας τη διαλυτότητα των προστατευτικών οξειδίων ή των μετάλλων. Γενικά όσο το PH απομακρύνεται από το ουδέτερο σημείο, τόσο αυξάνεται και η αγωγιμότητα του διαλύματος προκαλώντας αύξηση στην ταχύτητα διάβρωσης.

➤ **Παρουσία οξυγόνου**

Σε οποιοδήποτε διάλυμα το οξυγόνο είναι ένας από τους σημαντικούς παράγοντες που μπορεί να αυξήσει την ταχύτητα διάβρωσης κάποιων μετάλλων. Η απομάκρυνση του οξυγόνου (απαέρωση) είναι ένας από τους βασικούς τρόπους αντιμετώπισης της

διάβρωσης. Γενικά, νερό γλυκό ή θαλασσινό που δεν έχει απαερωθεί αυξάνει τη διάβρωση.

Η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου είναι αποφασιστικός παράγοντας στην εξέλιξη της διάβρωσης. Αύξηση της περιεκτικότητας σε ένα διάλυμα αυξάνει συνήθως τη διαβρωτικότητα του διαλύματος. Επομένως νερό γλυκό ή θαλασσινό, που δεν έχει απαερωθεί, μεγαλώνει περισσότερο τη διάβρωση.

➤ **Συγκέντρωση διαβρωτικού περιβάλλοντος**

Αν η καθοδική δράση ελέγχεται από τη διάχυση του οξυγόνου, το ρεύμα διάβρωσης αυξάνεται με τη συγκέντρωση του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Ελάχιστη επίδραση έχει η συγκέντρωση σε υλικά που εμφανίζουν παθητικότητα.

➤ **Εναλλαγή του διαβρωτικού περιβάλλοντος ή των ιδιοτήτων του**

Με την εναλλαγή αυτή προκαλείται ενίσχυση του φαινομένου της διάβρωσης. Το φαινόμενο είναι γενικό και μπορεί να περιλαμβάνει περιοδική εμβάπτιση του μετάλλου ή του κράματος στο νερό (εναλλαγή νερού–αέρα) μεταβαλλόμενη περιεκτικότητα οξυγόνου (γλυκό – θαλασσινό νερό), μεταβαλλόμενο pH (νερό – χημικές ουσίες), μεταβαλλόμενη αγωγιμότητα (θαλασσινό νερό), μεταβαλλόμενη θερμοκρασία κλπ. Τονίζεται ότι στην περίπτωση αυτή, η διάβρωση αυξάνεται έστω και αν οι ιδιότητες του διαβρωτικού περιβάλλοντος σε σταθερές συνθήκες είναι πιο έντονες (π.χ. μικρότερο pH, υψηλότερη θερμοκρασία) από τη μέγιστη τιμή που αποκτάται κατά την εναλλαγή.

Η εναλλαγή του διαβρωτικού περιβάλλοντος ή και των ιδιοτήτων μπορεί να είναι η εναλλασσόμενη πλήρωση δεξαμενών με διαφορετικά υγρά, εναλλασσόμενη διοχέτευση διαφορετικών υγρών μέσα από σωλήνες, εναλλασσόμενη χρησιμοποίηση μηχανημάτων σε διαφορετικό διαβρωτικό περιβάλλον (μηχανήματα εκσκαφής βυθού θάλασσας, εξωλέμβιες μηχανές κλπ.) μεταβαλλόμενες κλιματολογικές συνθήκες κλπ. Οι εναλλαγές αυτές προκαλούν εντονότερες διαβρώσεις, από την παραμονή των υλικών σε σταθερές συνθήκες.

➤ **Ταχύτητα κίνησης του διαβρωτικού περιβάλλοντος**

Η ταχύτητα κίνησης του διαλύματος αυξάνει την ταχύτητα διάβρωσης μόνο αν το σύστημα ελέγχεται από τη διάχυση, ενώ την αφήνει ανεπηρέαστη αν το σύστημα ελέγχεται από υπέρταση φορτίου. Μπορεί επίσης να προκαλέσει διάβρωση εκ τριβής λόγω μηχανικής δράσης.

Η ταχύτητα με την οποία διέρχεται το νερό κατά μήκος μιας μεταλλικής επιφάνειας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή, τόσο αυξάνεται η επιφάνεια επαφής με το οξυγόνο και κατά συνέπεια το μέγεθος της διάβρωσης.

➤ **Επαφή ανόμοιων μετάλλων**

Η επαφή μεταξύ ανόμοιων μετάλλων συχνά οδηγεί σε πολύ αυξημένες ταχύτητες διάβρωσης που μπορούν να προσδιοριστούν χρησιμοποιώντας τη θεωρία των μικτών δυναμικών. Στο πιο ηλεκτραρνητικό από τα δύο μέταλλα αυξάνεται η ταχύτητα διάβρωσης, ενώ στο πιο ευγενές μειώνεται. Όταν δύο διαφορετικά μέταλλα ή ακόμη και τα ίδια (με διαφορετικό ποσοστό αταξιών δομής) ή κράματα (έστω και με τα ίδια συστατικά, αλλά διαφορετικής σύστασης ή δομής) βρίσκονται σε επαφή, τότε το ένα από αυτά διαβρώνεται περισσότερο (το ανοδικότερο από αυτά) και το άλλο λιγότερο από ότι αν βρισκόταν χωριστά στο ίδιο διαβρωτικό περιβάλλον, λόγω δημιουργίας γαλβανικού στοιχείου.

➤ **Η ύπαρξη τριεπιφάνειας**

Η ύπαρξη τριεπιφάνειας (π.χ. στην ίσαλο γραμμή της πλωτής εξέδρας έχουμε χαρακτηριστικά χάλυβας – θαλασσινό νερό – αέρας), συνεπάγεται την εμφάνιση έντονης και εντοπισμένης διάβρωσης.

➤ **Ανομοιογένεια της επιφάνειας**

Οποιαδήποτε ανομοιογένεια της επιφάνειας ενός μετάλλου ή κράματος αυξάνει τη διάβρωση. Η ανομοιογένεια, που μπορεί να οφείλεται σε διαφοροποίηση της χημικής σύστασης και της δευτερεύουσας δομής (γεωμετρικές ατέλειες, αταξίες δομής) ή σε τοπικές αποθέσεις εξαιτίας του διαβρωτικού περιβάλλοντος, οδηγεί σε δημιουργία τοπικών γαλβανικών στοιχείων, αυξάνοντας έτσι το ρυθμό διάβρωσης.

➤ **Πλαστικές παραμορφώσεις**

Πλαστικές παραμορφώσεις ή πρόσθετες αταξίες δομής που δημιουργήθηκαν με μηχανική ή θερμική κατεργασία, μεγαλώνουν τη διάβρωση. Μηχανικές ή θερμικές κατεργασίες οδηγούν σε πλαστικές παραμορφώσεις και συντείνουν στη δημιουργία τοπικά σημείων περισσότερο ανοδικών, με αποτέλεσμα την εμφάνιση τοπικών γαλβανικών στοιχείων που επιταχύνουν τη διάβρωση.

➤ **Μηχανικές τάσεις**

Οι μηχανικές τάσεις επιταχύνουν τη διάβρωση και οδηγούν στη ψαθυρή θραύση της κατασκευής.

➤ **Ραδιενέργεια**

Η έκθεση μετάλλου ή κράματος σε ραδιενέργεια συνεπάγεται τη δημιουργία πρόσθετων αταξιών δομής που καθιστούν το μέταλλο πιο ανοδικό και κατά συνέπεια προκαλούν την ταχύτερη διάβρωση του.

➤ **Ηχητική ενέργεια**

Μεγάλες εντάσεις ήχου αυξάνουν, αλλά ελάχιστα, την ταχύτητα διάβρωσης, πιθανά επειδή διευκολύνεται ο σχηματισμός φυσαλίδων υδρογόνου ή επηρεάζεται η μορφή και η δομή των προϊόντων διάβρωσης.

➤ **Τα περιπατητικά ηλεκτρικά ρεύματα**

Ουσιαστικά τα ηλεκτρικά ρεύματα που κυκλοφορούν στο νερό, έξω από το υπάρχον κύκλωμα τους, λόγω διαφυγής μεγαλώνουν τη διάβρωση, ιδιαίτερα στα σημεία που τα ηλεκτρόνια εγκαταλείπουν τις μεταλλικές επιφάνειες π.χ. έντονη διάβρωση εξωτερικών ελασμάτων του πλοίου κατά την αποκατάσταση εσωτερικών ελασμάτων δεξαμενών με χρήση ηλεκτροσυγκόλλησης.

➤ **Η ύπαρξη μακροσκοπικών ή μικροσκοπικών γεωμετρικών ανωμαλιών**

Οι μακροσκοπικές (ύπαρξη προεξοχών) ή οι μικροσκοπικές γεωμετρικές ανωμαλίες (γεωμετρικά ενεργά κέντρα) διαβρώνονται γρηγορότερα.

➤ **Η ύπαρξη όξινου η αλκαλικού διαλύματος**

Όξινο διάλυμα ευνοεί τη διάβρωση. Αλκαλικό διάλυμα δυσχεραίνει τη διάβρωση μόνο αν συνυπάρχει υδρόλυση.

➤ **Παραμένοντα προϊόντα διάβρωσης**

Όταν τα προϊόντα της διάβρωσης παραμένουν στην επιφάνεια της διαβρωμένης επιφάνειας προκαλείται διόγκωση που οδηγεί σε ρήξη των γύρω τους υλικών, για παράδειγμα μέταλλα ή κράματα εγκιβωτισμένα μέσα σε υλικά.

➤ Τα ιόντα μετάλλων μπορούν να διαχυθούν μέσα από αγωγίμο ή μη αγωγίμο επίστρωμα προς το διαβρωτικό περιβάλλον, με αποτέλεσμα το σχηματισμό προϊόντων διάβρωσης πάνω σε μεταλλικά ή μη καλυπτικά επιστρώματα του μετάλλου ή του κράματος που παθαίνει διάβρωση, δηλαδή χωρίς άμεση επαφή με το διαβρωτικό περιβάλλον.

1.5 Κινητική της διάβρωσης ^[1]

Η διάβρωση είναι μία ηλεκτροχημική διαδικασία, αφού περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων ανάμεσα στην επιφάνεια του μετάλλου και στο υδατικό διάλυμα του ηλεκτρολύτη. Επίσης είναι ένα φαινόμενο θερμοδυναμικά αυθόρμητο σε οποιεσδήποτε συνθήκες. Οπότε κρίνεται αναγκαίο να γνωρίζουμε πόσο γρήγορα πραγματοποιείται η διάβρωση. Η ταχύτητα διάβρωσης δεν εξαρτάται από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ της ανόδου και της καθόδου. Εξαρτάται, κυρίως, από το ρεύμα διάβρωσης, i_{corr} (Amps), μεταξύ των ηλεκτροδίων. Σύμφωνα με το νόμο του Faraday, η απώλεια μάζας (gr) του μετάλλου της ανόδου, με ατομικό βάρος A , σε χρόνο t (sec), δίνεται από τη σχέση:

$$m = A \ i_{corr} \frac{t}{nF}$$

όπου

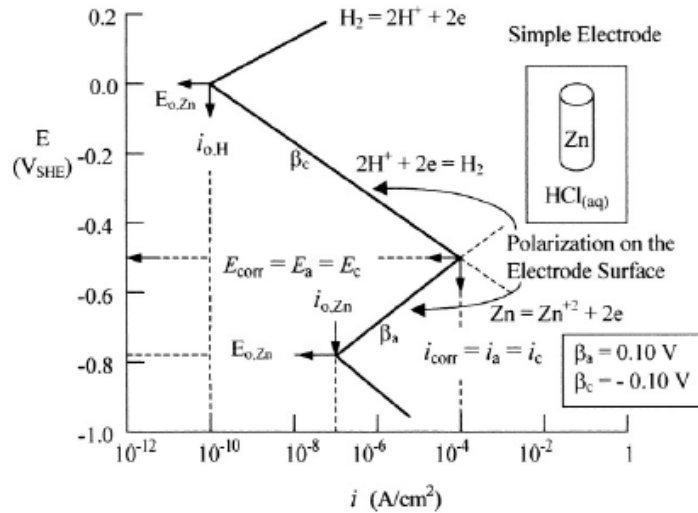
F: Η σταθερά Faraday

n: Ο αριθμός των ηλεκτρονίων σθένους

i_{corr} : Το ρεύμα διάβρωσης

Η ταχύτητα διάβρωσης στην πράξη όμως εκφράζεται ως απώλεια πάχους ετησίως σε mm ή ως απώλεια μάζας σε mg ανά τετραγωνικό δεκατόμετρο (dm^2) ημερησίως, όταν το διάλυμα της ανόδου είναι ομοιογενές.

Για τη μελέτη της διάβρωσης είναι ιδιαίτερα σημαντικό να είναι γνωστή η μεταβολή των δυναμικών των ηλεκτροδίων όταν κυκλοφορεί ρεύμα μεταξύ της ανόδου και της καθόδου, δηλαδή να είναι δυνατόν να μετρηθεί η μεταβολή του δυναμικού της ανόδου και της καθόδου σε συνάρτηση με το ρεύμα του στοιχείου. Ουσιαστικά μέσα στον ηλεκτρολύτη μετράται η μεταβολή του δυναμικού ισορροπίας της ανόδου E_a και του δυναμικού ισορροπίας της καθόδου E_c ως προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς, καθώς η αντίσταση R μειώνεται, δηλαδή το ρεύμα, i αυξάνεται. Οι καμπύλες που λαμβάνονται με αυτόν τον τρόπο ονομάζονται καμπύλες πόλωσης και έχουν τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5: Γραφική παράσταση της ηλεκτροδιακής κινητικής συμπεριφοράς Zn σε διάλυμα HCl [24]

Όταν τα ρεύματα είναι μεγαλύτερα της τιμής i_{0c} στην κάθοδο και i_{0a} στην άνοδο, το δυναμικό της καθόδου μειώνεται ξεκινώντας από την τιμή ισορροπίας E_{0c} και αυτό της ανόδου αυξάνεται ξεκινώντας από E_{0a} . Για ένα ρεύμα i , παράγεται μια καθοδική και μια ανοδική υπέρταση η_c και η_a αντίστοιχα. Η μεταβολή της ανοδικής και της καθοδικής υπέρτασης σε συνάρτηση με το ρεύμα, δίνεται από το νόμο του Tafel.

$$\eta = \beta \log \frac{i}{i_0}$$

όπου

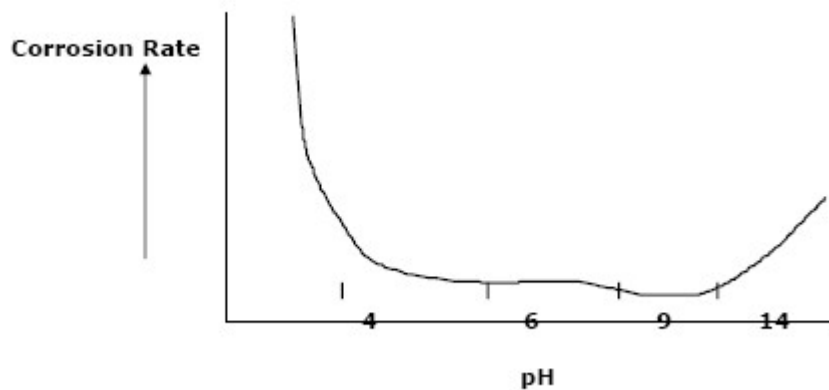
β : Η κλίση των καμπυλών πόλωσης.

Παρατηρούμε ότι στις καθοδικές αντιδράσεις, το β είναι αρνητικό, ενώ στις ανοδικές αντιδράσεις το β είναι θετικό. Οι τιμές του β εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρολύτη και τη θερμοκρασία. Όταν η αντίσταση R είναι μηδέν, το καθοδικό και το ανοδικό δυναμικό ισορροπούν σε μια τιμή E_{corr} , στην οποία αντιστοιχεί το ρεύμα διάβρωσης i_{corr} , του οποίου η πυκνότητα καθορίζεται από την τομή των καμπυλών πόλωσης. Παρατηρούμε ότι οι ευθείες Tafel δεν τέμνονται, διότι το ρεύμα διάβρωσης περιορίζεται από την αντίσταση του ηλεκτρολύτη. Όμως το ρεύμα διάβρωσης ορίζεται από την τομή των δύο καμπυλών πόλωσης. Συμπερασματικά η σημασία αυτών των καμπυλών είναι σημαντική, διότι όσο μεγαλύτερες είναι οι απόλυτες τιμές του β τόσο μικρότερο είναι το ρεύμα διάβρωσης και συνεπώς η ταχύτητα της διάβρωσης.

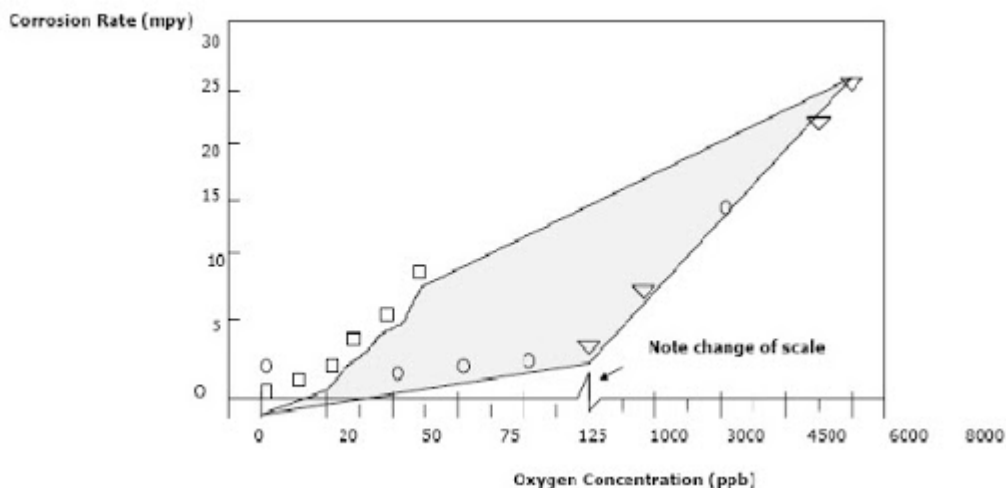
1.6 Η διάβρωση των ναυπηγικών κατασκευών στο θαλάσσιο περιβάλλον^{[1], [9]}

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η διάβρωση στο θαλασσινό νερό εξαρτάται από πληθώρα στοιχείων, αναλυτικότερα από την αλατότητα του νερού (περιεκτικότητα σε αλάτι), από τη συγκέντρωση οξυγόνου, από το pH του νερού, τη θερμοκρασία του νερού, την ταχύτητα ροής του νερού γύρω από την κατασκευή. Μερικοί από αυτούς τους παράγοντες συνδέονται μεταξύ τους και εξαρτώνται από φυσικές, χημικές και βιολογικές παραμέτρους. Για παράδειγμα ο ρυθμός διάβρωσης του σιδήρου βυθισμένου σε θαλασσινό νερό, μειώνεται όσο αυξάνεται η αλατότητα εξαιτίας της μείωσης της περιεκτικότητας σε οξυγόνο. Η περιεκτικότητα σε οξυγόνο εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Αύξηση της θερμοκρασίας αρχικά αυξάνει το ρυθμό διάβρωσης, η ταυτόχρονη μείωση της διαλυτότητας του οξυγόνου όμως μειώνει το ρυθμό διάβρωσης. Παρατηρείται εξάλλου ότι κατά τους καλοκαιρινούς μήνες ο ρυθμός διάβρωσης του χάλυβα αυξάνει κατά 50% συγκριτικά με το χειμώνα.

Παρακάτω δίνονται διάφορα διαγράμματα του ρυθμού διάβρωσης ως προς τις διάφορες παραμέτρους που επιδρούν στο φαινόμενο (βλέπε σχήμα 1.6 και σχήμα 1.7).



Σχήμα 1.6: Διάγραμμα του ρυθμού διάβρωσης του χάλυβα συναρτήσει του pH (Corrosion Rate of Steel vs. pH) ^[42]

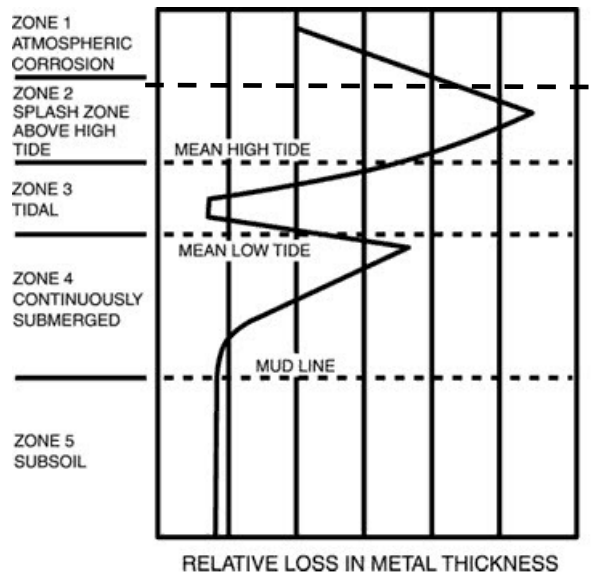


Σχήμα 1.7: Γραφική παράσταση από τα αποτελέσματα τριών διαφορετικών μελετών που δείχνουν ρυθμούς διάβρωσης χάλυβα ως συνάρτηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου (graph from results of three different studies showing corrosion rates as a function of oxygen concentration) ^[42]

Οι φυσικές μεταβλητές της θερμοκρασίας, της πίεσης και της ταχύτητας πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό και την εφαρμογή ενός συστήματος ελέγχου της διάβρωσης. Η ορθή προδιαγραφή καθοδικής προστασία σε μια κατασκευή εξαρτάται από τις μεταβλητές αυτές σε μεγάλο βαθμό. Η θερμοκρασία και η πίεση είναι αλληλένδετες παράμετροι και η διαβρωτικότητα του συστήματος επηρεάζεται επίσης από την ταχύτητα.

Η διάβρωση στις ναυπηγικές κατασκευές εμφανίζεται με διαφορετικές μορφές ανάλογα με τη θέση από την επιφάνεια της θάλασσας (σχήμα 1.8). Για αυτό ακριβώς το λόγο το θαλάσσιο περιβάλλον κατηγοριοποιείται σε 5 ζώνες, την ατμοσφαιρική ζώνη με υψηλά ποσοστά αλατονέφωσης, τη ζώνη ψεκασμού (πάνω από το maximum βύθισμα), τη ζώνη παλίρροιας, τη ζώνη βύθισης, την υπό του θαλασσίου πυθμένα ζώνη. Η συμπεριφορά διάβρωσης των μετάλλων και των κραμάτων διαφέρουν από τη μία ζώνη στην άλλη.

Στο παρακάτω σχήμα διακρίνονται οι ακόλουθες χαρακτηριστικές ζώνες:



Σχήμα 1.8: Διάγραμμα της σχετικής μείωσης του πάχους του μετάλλου συναρτήσει των ζωνών^[1]

Ζώνη 1:

Ατμοσφαιρική ζώνη με υψηλά ποσοστά αλατονέφωσης (Atmospheric zone)

Ζώνη 2:

Ζώνη ψεκασμού πάνω από το maximum βύθισμα (Splash zone)

Ζώνη 3:

Ζώνη παλίρροιας (Boat topping zone)

Ζώνη 4:

Ζώνη βύθισης (Submerged zone)

Ζώνη 5:

Υπό του θαλασσίου πυθμένα (Subsoil)

Πιο αναλυτικά ο ρυθμός διάβρωσης στη ζώνη παλίρροιας εμφανίζεται αρκετά μικρός, ενώ στη ζώνη ψεκασμού, η οποία δέχεται συνεχώς αλατονέφωση είναι πολύ υψηλός. Οι τυπικοί ρυθμοί διάβρωσης χάλυβα φαίνονται χαρακτηριστικά στον Πίνακα 1.1 που ακολουθεί.

Πίνακας 1.1: Ο ρυθμός διάβρωσης χάλυβα για διαφορετικές συνθήκες έκθεσης^[1]

Περιβαλλοντικές συνθήκες	Ρυθμός διάβρωσης (mm/year)
Ατμοσφαιρική ζώνη	0,128
Ζώνη ψεκασμού	0,272
Ζώνη παλίρροιας	0,083
Ζώνη βύθισης	0,09
Υπό του θαλάσσιου πυθμένα	0,075

1.7 Η διάβρωση υπεράκτιων (offshore) πλατφορμών εξόρυξης υδρογονανθράκων^{[21],[9]}

Οι πρώτες πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου έκαναν την εμφάνιση τους στα τέλη του 19ου αιώνα και με την πάροδο των χρόνων κατασκευάστηκαν ποικίλες κατασκευές, ανταποκρινόμενες σε διαφορετικές ανάγκες εξόρυξης. Η βασική κατηγοριοποίηση αφορά στην δυνατότητα μετακίνησης από το ένα σημείο εξόρυξης σε άλλο. Με βάση το κριτήριο αυτό χωρίζονται σε σταθερές (fixed) και σε πλωτές. Οι σταθερές αποτέλεσαν και τις πρώτες κατασκευές που εμφανίστηκαν σε μικρά κυρίως βάθη και κοντά στην ακτή. Η επιτακτική ανάγκη όμως για επέκταση των δραστηριοτήτων σε μεγαλύτερα βάθη, ώθησε τις πλωτές κατασκευές να αναπτυχθούν σε μεγάλο βαθμό.

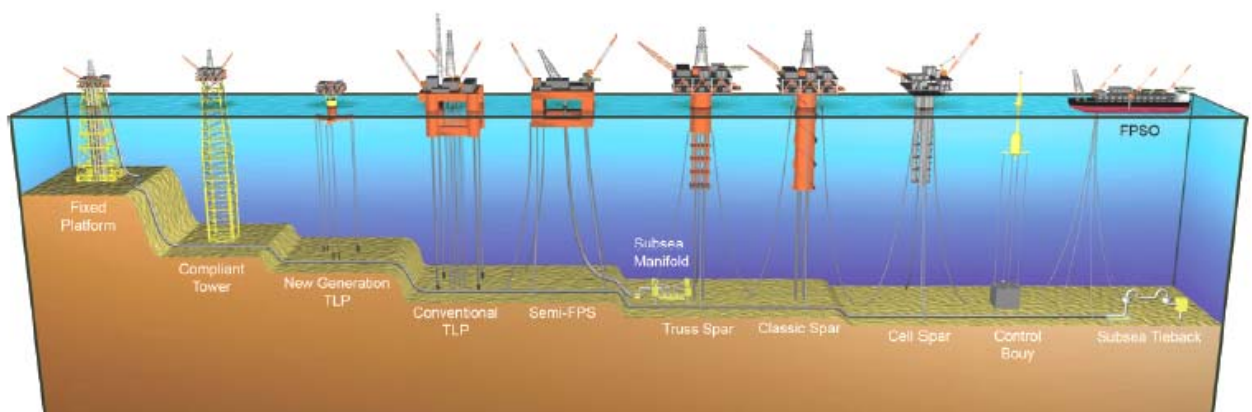
Παρατίθενται οι βασικές τεχνολογίες πλατφορμών εξόρυξης πετρελαίου (σχήμα 1.9):

✚ Μόνιμες ή σταθερές εξέδρες (Fixed platforms)

- ❖ Πλατφόρμες βαρύτητας
- ❖ “Jackets” πλατφόρμες (στο σχήμα 1.9 αναγράφεται ως fixed platform)
- ❖ “Compliant towers”

✚ Πλωτές εξέδρες ή με δυνατότητα μετακίνησης από τον τόπο εγκατάστασης (Floating and Tethered Platforms)

- ❖ Πλωτές ημι-βυθισμένες πλατφόρμες, (FPSs)
- ❖ Tension legs πλατφόρμες, (TLPs)
- ❖ Spar πλατφόρμες
- ❖ Πλωτές μονάδες παραγωγής, αποθήκευσης και εκφόρτωσης (FPSOs)
- ❖ “Jack-up” πλατφόρμες
- ❖ Γεωτρητικά σκάφη (Drilling ships)



Σχήμα 1.9: Οι κυριότερες τεχνολογίες υπεράκτιων κατασκευών εξόρυξης πετρελαίου
“Courtesy Offshore Magazine and Mustang Engineering”^[25]

Εξαιτίας των ιδιαίτερων συνθηκών κάτω από τις οποίες όλες οι υπεράκτιες κατασκευές καλούνται να λειτουργήσουν, καθώς και των ποικίλων απειλών με τις οποίες έρχονται αντιμέτωπες (έντονοι κυματισμοί, δυναμικές φορτίσεις, βιολογική ρύπανση, διαβρωτικό περιβάλλον), η διάβρωση των κατασκευών αυτών παίρνει μεγαλύτερες διαστάσεις από αυτή των πλοίων. Η διάβρωση είναι ένα σοβαρό πρόβλημα για τις υπεράκτιες κατασκευές, λόγω των ακραίων συνθηκών λειτουργίας και την ύπαρξη έντονων διαβρωτικών στοιχείων στις περιοχές όπου αυτές δραστηριοποιούνται. Αναλυτικότερα, τα υπεράκτια σκάφη τείνουν να είναι ακίνητα, στάσιμα για μεγάλα χρονικά διαστήματα, δεν αναμένεται να δεξαμενίζονται τακτικά (σε πολλές περιπτώσεις και καθόλου) και συνήθως δραστηριοποιούνται σε πολύ μεγάλα βάθη, σε ωκεανούς και όχι σε προστατευόμενες περιοχές, οπότε η ανάγκη προστασίας είναι εντονότερη. Η διάβρωση υπεισέρχεται σε όλα τα μεταλλικά μέρη των υπεράκτιων κατασκευών, σε συστήματα σωληνώσεων, σε δεξαμενές, σε μηχανολογικά εξαρτήματα κ.α.

Λόγοι ανάγκης προστασίας των υπεράκτιων κατασκευών:

1. Ακραίες συνθήκες λειτουργίας
2. Ύπαρξη έντονων διαβρωτικών στοιχείων στις περιοχές δραστηριοποίησης
3. Τείνουν να είναι ακίνητες, στάσιμες, στηριγμένες στο βυθό ή αγκυροβολημένες για μεγάλα χρονικά διαστήματα
4. Δραστηριοποιούνται σε πολύ μεγάλα βάθη, σε ωκεανούς και όχι σε προστατευόμενες περιοχές
5. Δεν αναμένεται να δεξαμενίζονται τακτικά (για τις πλωτές υπεράκτιες κατασκευές)
6. Ύπαρξη έντονης βιολογικής ρύπανσης καθώς και παρουσία διοξειδίου του άνθρακα και υδρόθειου (ιδίως όσες κατασκευές σχετίζονται με την εξόρυξη πετρελαίου)
7. Έντονη υγρασία και ιδιόρρυθμες θερμοκρασίες λειτουργίας
8. Υψηλού κινδύνου περιβάλλον λειτουργίας για ανάπτυξη φωτιάς
9. Ο δεξαμενισμός τέτοιων σκαφών είναι πολύ χρονοβόρος και δαπανηρός
10. Διαφορετικές απαιτήσεις των νηογνομόνων (υψηλότερες συγκριτικά με τα πλοία) για το ρεύμα προστασίας (η βασική αρχή υπολογισμών παραμένει ίδια).

1.8 Προστασία από τη διάβρωση υπεράκτιων πλατφορμών εξόρυξης υδρογονανθράκων¹⁹⁾

Το ακραίο περιβάλλον λειτουργίας καθιστά την προστασία από τη διάβρωση των σταθερών και πλωτών υπεράκτιων πλατφορμών ένα ιδιαίτερα δύσκολο έργο. Για τη διασφάλιση επαρκούς προστασίας από τη διάβρωση κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής αυτών των κατασκευών, πλήθος παραμέτρων πρέπει να συνυπολογιστούν. Η γνώση του μηχανισμού της διάβρωσης, ωστόσο δεν είναι αρκετή για να εξαλειφθεί το φαινόμενο λόγω της διακύμανσης των συνθηκών και του τοποχημικού χαρακτήρα της, έτσι επιτυγχάνεται επιβράδυνση του φαινομένου και όχι αναστολή.

Η καλύτερη δυνατή προστασία υπεράκτιων κατασκευών επιτυγχάνεται με την εφαρμογή σύνθετων μεθόδων προστασίας, δηλαδή συνδυασμός καθοδικής προστασίας και κατάλληλων αντιδιαβρωτικών χρωμάτων. Πιο αναλυτικά απαιτείται συνδυασμός ενός εγκεκριμένου μέσου καθοδικής προστασίας, χρησιμοποιώντας είτε θυσιαζόμενες ανόδους είτε σύστημα επιβαλλόμενου ρεύματος με τα κατάλληλα αντιδιαβρωτικά χρώματα.

Τρόποι προστασίας από τη διάβρωση υπεράκτιων κατασκευών:

- i. Με την επιλογή του κατάλληλου υλικού (μετάλλου ή κράματος) που θα τεθεί στο συγκεκριμένο διαβρωτικό περιβάλλον και με τον ορθό σχεδιασμό της κατασκευής
- ii. Η εφαρμογή επικαλύψεων στην επιφάνεια του υλικού με στόχο την απομόνωση από το διαβρωτικό περιβάλλον
- iii. Καθοδική προστασία με τη μέθοδο θυσιαζόμενων ανόδων (έχει αναπτυχθεί διεξοδικά στα επόμενα κεφάλαια)
- iv. Καθοδική προστασία με τη μέθοδο επιβαλλόμενου ρεύματος ICCP (έχει αναπτυχθεί διεξοδικά στα επόμενα κεφάλαια).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΘΟΔΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

2.1 Ιστορικά στοιχεία^{[15],[16]}

Η πρώτη χρήση της καθοδικής προστασίας γενικά αποδίδεται στο Sir Humphrey Davy το 1824. Η σύσταση του Davy's έγινε αποδεκτή τότε από το Βασιλικό Ναυτικό που του είχε ζητήσει να διερευνήσει τη διάβρωση στα φύλλα χαλκού που χρησιμοποιούνταν για επικάλυψη στα ύφαλα των Πολεμικών πλοίων. Ο Davy διαπίστωσε ότι θα μπορούσε να διατηρήσει το χαλκό στο νερό της θάλασσας με την προσάρτηση μικρών ποσοτήτων σιδήρου ή ψευδαργύρου, ο χαλκός έγινε τότε, όπως το διατύπωσε ο Davy "καθοδικά προστατευμένος". Ο Michael Faraday (βοηθός του Davy), συνέχισε την έρευνα του (μετά το θάνατο του) και το 1834 ανακάλυψε την ποσοτική σχέση μεταξύ της απώλειας μάζας από τη διάβρωση και του ηλεκτρικού ρεύματος συνεπώς, έθεσε τα θεμέλια για τη μελλοντική εφαρμογή της καθοδικής προστασίας. Πολύ αργότερα, το 1890 ο Thomas Edison ασχολήθηκε εκτενώς με την εφαρμογή καθοδικής προστασίας μέσω εξωτερικής πηγής σε πλοία χωρίς επιτυχία όμως, εξαιτίας της έλλειψης εύρεσης κατάλληλης εξωτερικής πηγής και υλικών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως άνοδοι.

Η πιο θεαματική ανάπτυξη των συστημάτων καθοδικής προστασίας έγινε στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, οι οποίες έπρεπε να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις της ταχέως αναπτυσσόμενης βιομηχανίας πετρελαίου και φυσικού αερίου. Ο κλάδος αυτός ήθελε να επωφεληθεί από τα πλεονεκτήματα της χρήσης σωλήνων χάλυβα με λεπτό τοίχωμα για την υπόγεια μεταφορά πετρελαίου και φυσικού αερίου. Για αυτό ακριβώς το λόγο, η καθοδική προστασία στις Ηνωμένες Πολιτείες το 1945 είχε καθιερωθεί πλήρως. Στο Ηνωμένο Βασίλειο όμως, επειδή χρησιμοποιούσαν εκτενώς χαμηλής πίεσης και μεγαλύτερου πάχους σωλήνες από χυτοσίδηρο, η καθοδική προστασία ελάχιστα εφαρμόστηκε μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1950, αργότερα όμως αναπτύχθηκε και εκεί.

2.2 Θεωρία καθοδικής προστασίας (Cathodic Protection, CP)^[1]

Η καθοδική προστασία (Cathodic Protection, CP) παρέχει αποτελεσματικό έλεγχο του φαινομένου της διάβρωσης στη μεταλλική κατασκευή επιβάλλοντας δυναμικό που βαθμιδωτά αντιτίθεται στη ροή ιόντων από την επιφάνεια του μετάλλου και έτσι εμποδίζει την ανοδική αντίδραση διάβρωσης. Ουσιαστικά με τον όρο καθοδική προστασία εννοείται η τεχνητή μετατροπή σε κάθοδο, της προστατευόμενης μεταλλικής κατασκευής, που στην αρχή ήταν άνοδος. Σύμφωνα με αυτήν τη μέθοδο, η προς προστασία εγκατάσταση φορτίζεται αρνητικά και ενώ πριν ήταν άνοδος γαλβανικού στοιχείου, δηλαδή αρνητικός οξειδωτικός πόλος, αυτή γίνεται κάθοδος ηλεκτρολυτικού κελιού δηλαδή αρνητικός αναγωγικός πόλος. Έτσι η εγκατάσταση εξακολουθεί να είναι αρνητικά φορτισμένη όπως και πριν την

εφαρμογή της προστασίας, αλλά η δράση αντιστρέφεται δηλαδή παρουσιάζει προδιάθεση για αναγωγή και όχι οξείδωση.

Η καθοδική προστασία μπορεί, κατά κύριο λόγο να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε μεταλλική κατασκευή που βρίσκεται σε αγώγιμη επαφή με έναν ηλεκτρολύτη. Στην πράξη όμως η κύρια χρήση της είναι να προστατεύει κατασκευές από χάλυβα που βρίσκονται στο νερό ή μέσα στο έδαφος. Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόληψη της ατμοσφαιρικής διάβρωσης. Οι κατασκευές που συνήθως απαιτούν τη χρήση καθοδικής προστασίας είναι οι εξωτερικές επιφάνειες των αγωγών, τα ύφαλα των πλοίων, προβλήτες, πάσσαλοι θεμελίωσης, υπεράκτιες πλατφόρμες, δεξαμενές υγρών και κυρίως δεξαμενές έρματος. Καθοδική προστασία έχει επίσης εφαρμοστεί σε χάλυβα που βρίσκεται μέσα σε μπετόν, σε κράματα με βάση το χαλκό διαφόρων συστημάτων που βρίσκονται στο νερό, σε καλώδια επενδυμένα με μόλυβδο και κράματα αλουμινίου, όπου τα καθοδικά δυναμικά πρέπει να ελέγχονται πολύ προσεκτικά.

2.3 Βασικές αρχές της καθοδικής προστασίας ^[15]

Η διάβρωση σε υδατικά διαλύματα δημιουργείται εξαιτίας μιας ηλεκτροχημικής διεργασίας, όταν ανοδικές και καθοδικές ηλεκτροχημικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα. Δεν είναι ξεκάθαρο το συνολικό φορτίο που συσσωρεύεται πάνω στο μέταλλο, ως αποτέλεσμα της διάβρωσης, όταν ο ρυθμός των ανοδικών και καθοδικών αντιδράσεων είναι ίδιος.

Ανοδικές αντιδράσεις επιδρούν στην οξείδωση του μετάλλου σε ιόντα και στην περίπτωση του χάλυβα η ακόλουθη αντίδραση λαμβάνει χώρα.



Η καθοδική διαδικασία περιλαμβάνει αναγωγή και αρκετές αντιδράσεις είναι πιθανές. Σε όξινο νερό, όπου τα ιόντα υδρογόνου (H^+) είναι άφθονα, η ακόλουθη αντίδραση λαμβάνει χώρα.



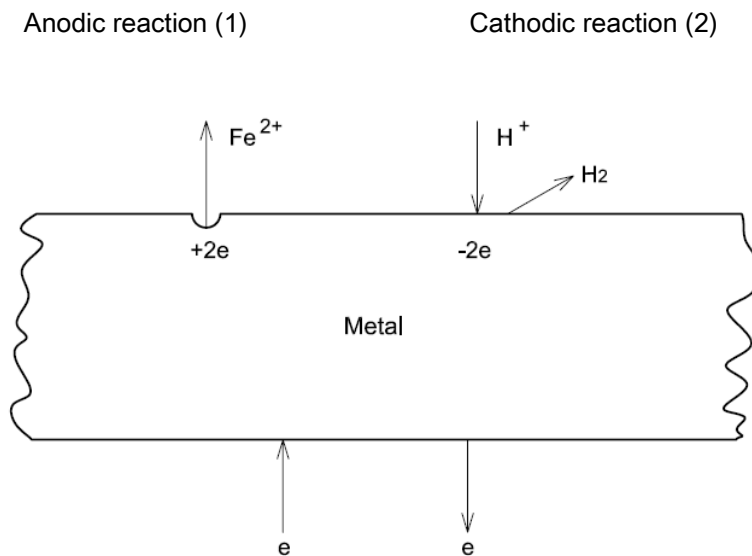
Σε αλκαλικά διαλύματα, όπου τα ιόντα υδρογόνου είναι σπάνια, η μείωση της ποσότητας του νερού θα προκαλέσει την εμφάνιση υδροξυλίων και υδρογόνου.



Επίσης στην περίπτωση που το νερό δεν είναι απαερωμένο η αναγωγή του οξυγόνου είναι η πιο πιθανή διεργασία, προκαλώντας πάλι παραγωγή υδροξυλίων στην επιφάνεια του μετάλλου.



Οι δύο πρώτες αντιδράσεις (1) και (2) αναπαρίσταται σχηματικά στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.1), όπου ανοδικές και καθοδικές αντιδράσεις γίνονται σε κοντινή απόσταση πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου.

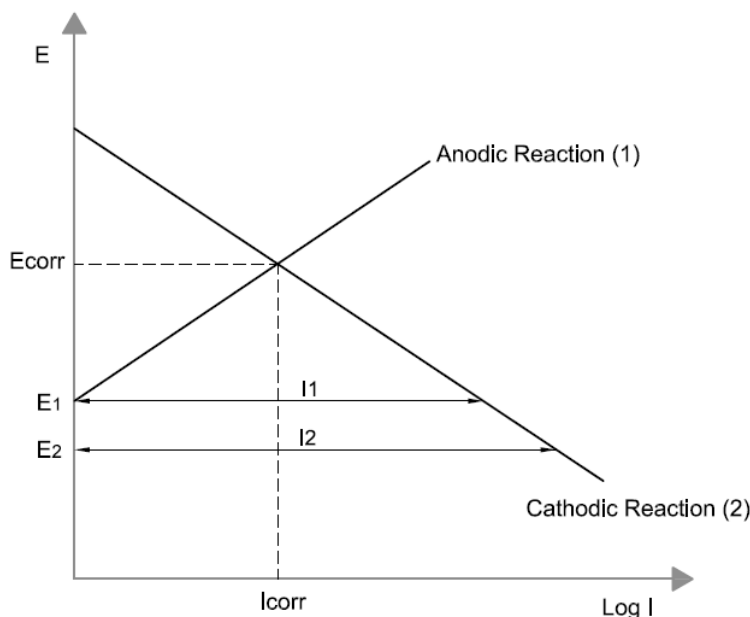


Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση των ανοδικών και καθοδικών αντιδράσεων στην επιφάνεια του μετάλλου (Anodic and cathodic reactions at a metal surface)^[15]

Δύναται να επέμβουμε στο ρυθμό αυτών των δύο χημικών αντιδράσεων αποσύροντας ηλεκτρόνια ή παρέχοντας ηλεκτρόνια στο μέταλλο. Αποτελεί πάγια τακτική το ότι εάν συμβεί μια αλλαγή σε έναν από τους παράγοντες βάσει των οποίων ένα σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία, το σύστημα να τείνει να προσαρμοστεί έτσι ώστε να ακυρώσει, στο μέτρο του δυνατού, το αποτέλεσμα αυτής της αλλαγής. Έτσι, αν αποσυρθούν ηλεκτρόνια από ένα τμήμα μετάλλου ο ρυθμός της πρώτης αντίδρασης (1) θα αυξηθεί για να καταφέρει να αντισταθμίσει την ενέργεια αυτή και η διάλυση του σιδήρου θα αυξηθεί, ενώ η δεύτερη αντίδραση θα μειωθεί. Αντιστρόφως, εάν προστεθούν επιπλέον ηλεκτρόνια από μια εξωτερική πηγή προς το τεμάχιο μετάλλου, η αντίδραση (1) θα μειωθεί για να δώσει μειωμένη διάβρωση και η αντίδραση (2) θα αυξηθεί. Η τελευταία περίπτωση ισχύει στην περίπτωση της καθοδικής προστασίας. Οπότε για να αποτραπεί η διάβρωση πρέπει να συνεχίσουμε να παρέχουμε ηλεκτρόνια στο χάλυβα από μια εξωτερική πηγή για να

ικανοποιήσουμε τις απαιτήσεις της καθοδικής αντίδρασης. Σημειώνεται ότι οι ανοδικές και καθοδικές διεργασίες είναι άρρηκτα συνδεδεμένες. Μειώνοντας το ρυθμό ανοδικής αντίδρασης επιτρέπουμε την αύξηση του ρυθμού της καθοδικής.

Αυτές οι αρχές μπορούν να εκφραστούν και με ένα περισσότερο ποσοτικό τρόπο με τη γραφική παράσταση του δυναμικού του μετάλλου ως προς το λογάριθμο του ανοδικού και καθοδικού ρυθμού αντίδρασης εκφραζόμενο ως πυκνότητα ρεύματος. Οι τυπικές ανοδικές και καθοδικές καμπύλες απεικονίζονται στο επόμενο σχήμα (σχήμα 2.2).

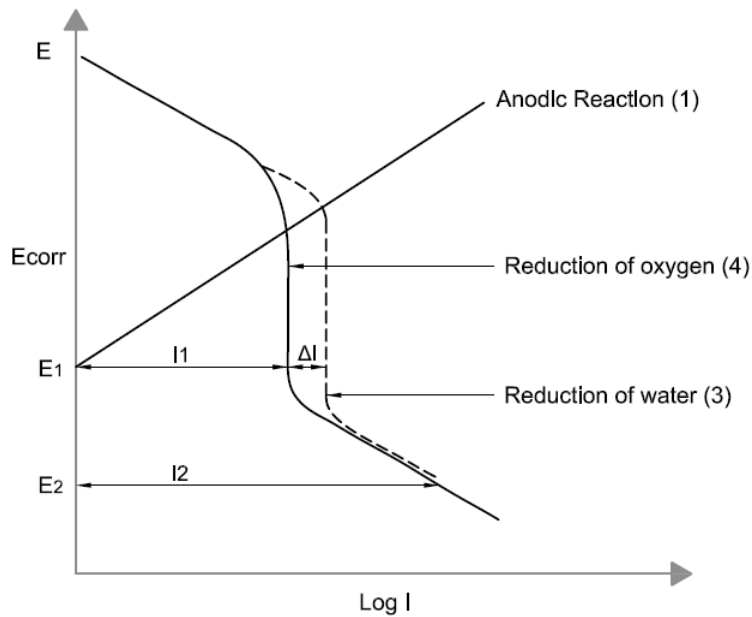


Σχήμα 2.2: Γραφική παράσταση της κινητικής των ανοδικών και καθοδικών αντιδράσεων (Kinetics of anodic and cathodic reactions)^[15]

Η ένταση του ρεύματος διάβρωσης I_{corr} και το δυναμικό διάβρωσης E_{corr} στο σημείο τομής των ανοδικών και καθοδικών καμπυλών βρίσκεται εκεί όπου οι τιμές των ανοδικών και καθοδικών αντιδράσεων είναι ίσες. Εάν τα ηλεκτρόνια διοχετεύονται στο μέταλλο για να καταστεί πιο αρνητικό τότε η ανοδική διάλυση του σιδήρου μειώνεται σε ένα αμελητέο ποσοστό σε ένα δυναμικό E_1 , ενώ ο ρυθμός της έντασης του ρεύματος καθόδου αυξάνεται σε I_1 . Ως εκ τούτου, ένα ρεύμα I_1 πρέπει να παρέχεται από μια εξωτερική πηγή για τη διατήρηση του δυναμικού στο E_1 , όπου ο ρυθμός διάλυσης του σιδήρου βρίσκεται σε μια χαμηλή τιμή. Εάν το δυναμικό μειωθεί σε E_2 (σχήμα 2.2) το ρεύμα που απαιτείται από την εξωτερική πηγή θα αυξηθεί σε I_2 . Παραπάνω προστασία του μετάλλου είναι επουσιώδης, διότι το επιπλέον ρεύμα που θα παρέχεται από την εξωτερική πηγή είναι περιττό. Το μέταλλο τότε θεωρείται ότι είναι υπερπροστατευμένο.

Σε αεριούχα ουδέτερα ή αλκαλικά διαλύματα η καθοδική διεργασία διάβρωσης είναι συνήθως η αναγωγή του οξυγόνου. Η κινητική αυτής της καθοδικής διεργασίας ελέγχεται από το ρυθμό με τον οποίο το οξυγόνο μπορεί να διαχυθεί στην επιφάνεια του μετάλλου, η

οποία είναι πιο αργή από το ρυθμό κατανάλωσης του οξυγόνου από την καθοδική αντίδραση. Έτσι, ο ρυθμός αυτής της αντίδρασης δεν αυξάνει όσο το δυναμικό του μετάλλου γίνεται πιο αρνητικό, αλλά παραμένει σταθερό εκτός εάν ο ρυθμός παροχής του οξυγόνου στην επιφάνεια του μετάλλου αυξηθεί από για παράδειγμα την αύξηση του ρυθμού ροής του ρευστού. Η επίδραση της ταχύτητας του ρευστού στις παραμέτρους καθοδικής προστασίας απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα (σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3: Αναγωγή του οξυγόνου με ελεγχόμενη διάχυση (Diffusion controlled reduction of oxygen)^[15]

Ένα ρεύμα I_1 αρχικά απαιτείται για να διατηρηθεί το μέταλλο σε ένα δυναμικό προστασίας E_1 . Ωστόσο, εάν ο ρυθμός ροής αυξάνεται, το ελάχιστο ρεύμα για την αναγωγή του οξυγόνου αυξάνεται (διακεκομμένη γραμμή) και το ρεύμα που απαιτείται για να διατηρηθεί το μέταλλο στο δυναμικό προστασίας αυξάνεται κατά ΔI . Έτσι, η πυκνότητα του ρεύματος που απαιτείται για να διατηρηθεί το σωστό δυναμικό προστασίας θα ποικίλει ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας. Πράγματι, το ρεύμα καθοδικής προστασίας δεν πρέπει να αποτελεί το μόνο σημείο αναφοράς για το κατά πόσον μία κατασκευή προστατεύεται επαρκώς. Κατάλληλο δυναμικό προστασίας πρέπει ωστόσο να διατηρηθεί, ώστε η διάβρωση να προληφθεί.

Εάν μια κατασκευή είναι υπερπροστατευμένη και το δυναμικό μειώνεται σε μία περιοχή δυναμικού όπου η αναγωγή του νερού (αντίδραση 3) μπορεί να λάβει χώρα, περαιτέρω ρεύμα θα απαιτηθεί από μια εξωτερική πηγή και το ρεύμα θα πάει «χαμένο» (σπατάλη). Στο σχήμα 2.3 μειώνοντας το δυναμικό από E_1 σε E_2 θα αυξηθεί το ρεύμα που απαιτείται από μια εξωτερική πηγή από I_1 σε I_2 ως αποτέλεσμα του αυξημένου ρυθμού αναγωγής του ύδατος.

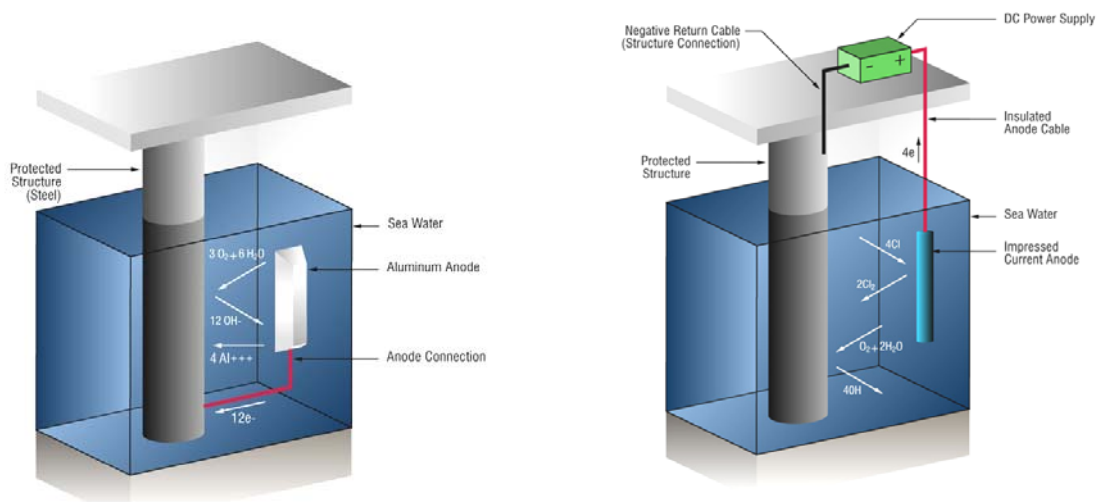
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΘΟΔΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

3.1 Γενικά ^[1]

Η καθοδική προστασία θεωρείται ενδεχομένως η σημαντικότερη μέθοδος ελέγχου του φαινομένου της διάβρωσης και είναι η μόνη από τις μεθόδους που μπορεί να προσφέρει ολοκληρωμένη προστασία ή να κατακτήσει ένα αποδεκτό επίπεδο προστασίας. Η καθοδική προστασία μπορεί να εφαρμοστεί πρακτικά για την προστασία μετάλλων όπως ο χάλυβας, ο χαλκός, ο μόλυβδος και ο μπρούτζος. Μια από τις συνηθέστερες εφαρμογές της είναι η προστασία της γάστρας πλοίων, καθώς και η προστασία δικτύων σωληνώσεων, δεξαμενών έρματος και γενικά η προστασία μεταλλικών κατασκευών στο έδαφος ή το νερό.

Η καθοδική προστασία μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους. Με την τεχνική του επιβαλλόμενου ρεύματος (Impress Current Cathodic Protection ή ICCP) από μία εξωτερική ηλεκτρική πηγή, ή με τη χρήση θυσιαζόμενων ανόδων (Sacrificial Anodes Cathodic Protection), κατά την οποία η καθοδική προστασία πραγματοποιείται με την τοποθέτηση μάζας δραστικού μετάλλου στο ίδιο περιβάλλον που δημιουργείται η φθορά. Στην τεχνική του επιβαλλόμενου ρεύματος, η προκαλούμενη τάση προστασίας προέρχεται από εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος, ενώ η τεχνική των θυσιαζόμενων ανόδων χρησιμοποιεί τη φυσική διαφορά δυναμικού που υπάρχει μεταξύ της κατασκευής και του δεύτερου μετάλλου στο ίδιο περιβάλλον (σχήμα 3.1).

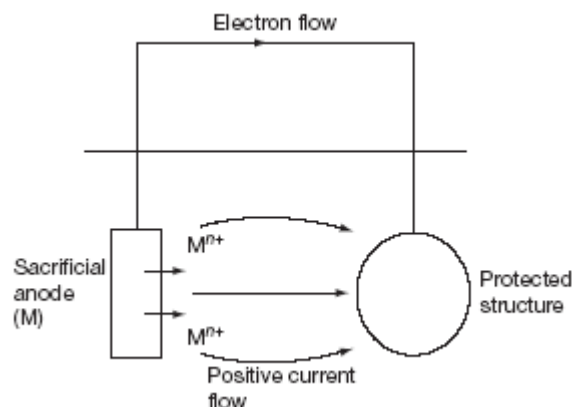


Σχήμα 3.1: Σχηματική απεικόνιση των μεθόδων καθοδικής προστασίας (αριστερά οι θυσιαζόμενες άνοδοι και δεξιά με επιβαλλόμενο ρεύμα) ^[38]

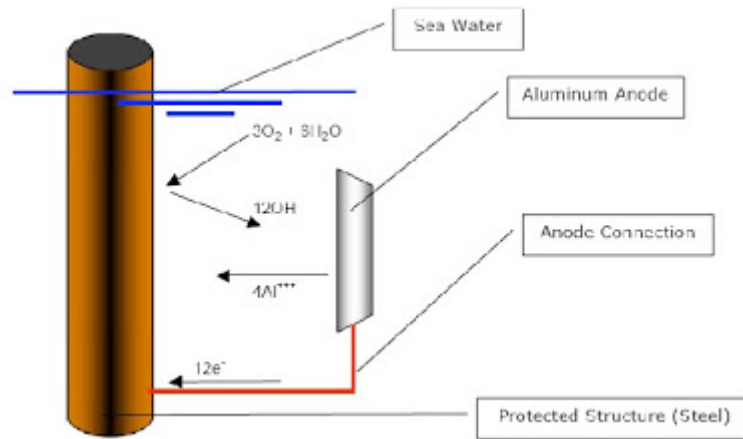
3.2 Η μέθοδος θυσιαζόμενης εμβαπτιζόμενης ή ενταφιασμένης ανόδου^{[11],[15],[16]}

Σύμφωνα με τη μέθοδο καθοδικής προστασίας μέσω θυσιαζόμενης εμβαπτιζόμενης ή ενταφιασμένης ανόδου, διάφορα δραστικά μέταλλα τοποθετούνται στο ίδιο περιβάλλον του ηλεκτρολυτικού κελιού, όπου υπάρχει το φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης. Τα προαναφερόμενα δραστικά μέταλλα ονομάζονται άνοδοι. Οι άνοδοι θυσιάζονται αποβάλλοντας τη μάζα τους με τη μορφή ιόντων, τα οποία μεταφέρονται προς τα λιγότερα δραστικά μέταλλα που συνήθως είναι οι διάφορες προς προστασία κατασκευές. Για αυτό και η μέθοδος αυτή λέγεται καθοδική προστασία μέσω θυσιαζόμενης ανόδου.

Απλούστερα, κατά τη μέθοδο των θυσιαζόμενων ανόδων, πάνω στην προστατευόμενη μεταλλική επιφάνεια, συνδέεται ένα μέταλλο ανοδικότερο από αυτή. Η σύνδεση αυτή των δύο ανόμοιων μετάλλων στο ίδιο περιβάλλον έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία γαλβανικού στοιχείου όπου το ανοδικότερο μέταλλο (κράματα ψευδαργύρου, μαγνησίου, αλουμινίου) διαβρώνεται ταχύτερα παρέχοντας ρεύμα για την προστασία του λιγότερο ανοδικού (του προστατευόμενου). Η μέθοδος αναπαρίσταται στο σχήμα 3.2 και στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.2: Σχηματικό διάγραμμα της καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενες ανόδους. Στην πράξη, η άνοδος μπορεί να είναι τοποθετημένη ακριβώς πάνω στην κατασκευή^[16]



Σχήμα 3.3: Σύστημα καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενες ανόδους στο θαλασσίνο νερό (Sacrificial Anode CP System in Seawater)^[42]

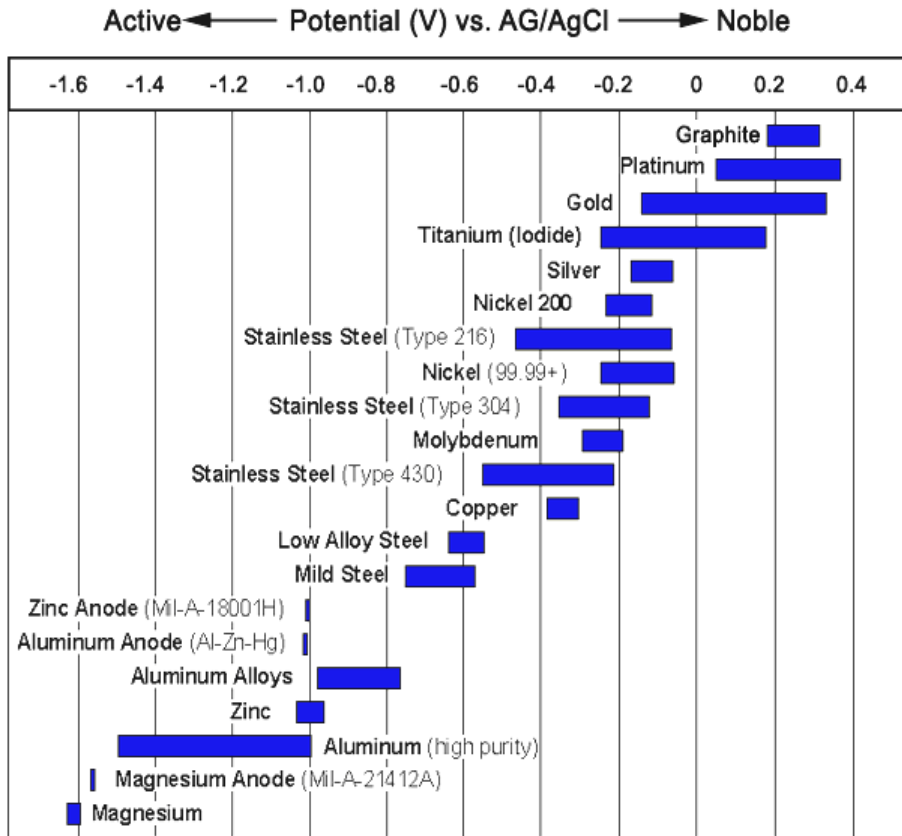
Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται στη ναυτιλία ευρέως, σε όλους του τύπους πλοίων και γενικά σε συστήματα σωληνώσεων, σε υποθαλάσσιους αγωγούς, σε μόνιμες και πλωτές πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου. Η τεχνική θεωρείται ιδιαίτερα απλή, αφού γίνεται για παράδειγμα στις υπεράκτιες κατασκευές με την τοποθέτηση π.χ. ψευδαργύρου ή αλουμινίου στις εξωτερικές επιφάνειες, σε σημεία που βρέχονται συνεχώς από νερό και στις δεξαμενές, με μεγάλη απήχηση στις δεξαμενές έρματος (βλέπε σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4: Απεικόνιση θυσιαζόμενων ανόδων πλωτής υπεράκτιας κατασκευής για εσωτερική και εξωτερική προστασία

Η τεχνική των θυσιαζόμενων ανόδων αξιοποιεί τη φυσική διαφορά δυναμικού που υπάρχει μεταξύ της κατασκευής και του δεύτερου μετάλλου στο ίδιο περιβάλλον και δεν προϋποθέτει εξωτερική πηγή ρεύματος. Η προοδευτική διάλυση του δεύτερου μετάλλου παρέχει την πηγή των ηλεκτρονίων για την καθοδική πόλωση της κατασκευής. Για να γίνει απόλυτα κατανοητή η λειτουργία των θυσιαζόμενων ανόδων, αρκεί να θυμηθούμε τη γαλβανική σειρά των μετάλλων. Παρατίθεται η γαλβανική σειρά ορισμένων μετάλλων στο θαλασσινό νερό (Πίνακας 3.1, Πίνακας 3.2). Το θυσιαζόμενο μέταλλο πρέπει να είναι πιο «ηλεκτοαρνητικό» από την προστατευόμενη μεταλλική επιφάνεια.

Πίνακας 3.1: Η γαλβανική σειρά ορισμένων μετάλλων στο θαλασσινό νερό



Πίνακας 3.2: Η γαλβανική σειρά ορισμένων μετάλλων από την εταιρία Cathwell σε δεδομένες συνθήκες^[33]

Metal/alloy	Potential (V) versus							
	Calomel electrode		Cu/CuSO ₄ (saturated)		Ag/AgCl/ sea water		Zn electrode	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Platinum	0,25	0,19	0,17	0,11	0,24	0,18	1,29	1,23
Platinum	0,25	0,19	0,17	0,11	0,24	0,18	1,29	1,23
Gold	0,17	0,17	0,1	0,1	0,16	0,16	1,21	1,21
Titanium	0,06	-0,05	-0,02	-0,12	0,05	-0,05	1,1	1
Nickel-iron-chromium alloy (Inconel 825)	0,05	-0,02	-0,02	-0,09	0,04	-0,03	1,09	1,02
Steel, stainless type 316, 317 (passive condition)	0	-0,1	-0,07	-0,17	-0,01	-0,11	1,04	0,94
Copper-nickel 70-30 alloy	-0,17	-0,24	-0,24	-0,31	-0,18	-0,24	0,87	0,81
Lead	-0,19	-0,25	-0,26	-0,32	-0,2	-0,26	0,85	0,79
Copper-nickel 80-20 alloy	-0,21	-0,27	-0,28	-0,34	-0,22	-0,28	0,83	0,77
Copper-nickel 90-10 alloy	-0,22	-0,28	-0,29	-0,35	-0,22	-0,29	0,83	0,76
Aluminium-brass alloy	-0,27	-0,35	-0,34	-0,42	-0,28	-0,36	0,77	0,69
Copper	-0,3	-0,37	-0,37	-0,44	-0,3	-0,37	0,75	0,68
Aluminium-bronze alloy	-0,31	-0,42	-0,38	-0,49	-0,32	-0,43	0,73	0,62
Steel, stainless type 316, 317 (active conditions)	-0,35	-0,46	-0,42	-0,53	-0,36	-0,47	0,69	0,58
Steel, low alloyed	-0,57	-0,63	-0,64	-0,7	-0,58	-0,63	0,47	0,42
Cast Iron	-0,6	-0,72	-0,67	-0,79	-0,61	-0,72	0,44	0,33
Aluminium alloys	-0,76	-1	-0,83	-1,07	-0,76	-1,01	0,29	0,04
Zinc	-0,98	-1,03	-1,05	-1,1	-0,99	-1,04	0,06	0,01
Zinc anode alloy (US Mil. Spec. MIL-A-18001)	-1,02	-1,02	-1,1	-1,09	-1,03	-1,03	0,02	0,02
Aluminum anode alloy (Al-Zn-In)	-1,09	-1,09	-1,16	-1,16	-1,1	-1,1	-0,05	-0,05
Magnesium anode alloy I	-1,45	-1,5	-1,52	-1,57	-1,45	-1,5	-0,4	-0,45
Magnesium anode alloy II	-1,57	-1,62	-1,64	-1,69	-1,57	-1,62	-0,52	-0,57
Magnesium	-1,6	-1,63	-1,67	-1,7	-1,61	-1,63	-0,56	-0,58

Το είδος των υλικών από τα οποία αποτελείται το κράμα της ανόδου παίζει καθοριστικό ρόλο, γιατί από αυτά εξαρτώνται οι ηλεκτροχημικές ιδιότητες της. Το κράμα από το οποίο κατασκευάζεται η θυσιαζόμενη άνοδος πρέπει σε γενικές γραμμές να είναι ανοδικότερο από το προστατευόμενο μέταλλο για το συγκεκριμένο διαβρωτικό περιβάλλον, να έχει καλή ηλεκτροχημική απόδοση (Ah/kg), να μην παθητικοποιείται και να έχει μεγάλο χρόνο ζωής.

Για να αποκτήσουν οι άνοδοι τα παραπάνω χαρακτηριστικά γίνεται χρήση πολλών διαφορετικών υλικών ή κραμάτων τους. Από τα κυριότερα μέταλλα που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό είναι ο ψευδάργυρος (Zn), το αλουμίνιο (Al) ή το μαγνήσιο (Mg), καθώς και τα κράματά τους.

Ο **ψευδάργυρος** είναι το πρώτο μέταλλο που χρησιμοποιήθηκε για αυτό το σκοπό, αλλά γρήγορα εγκαταλείφθηκε γιατί ευνοούσε την ανάπτυξη θαλασσίων οργανισμών και επίσης επειδή διαβρώνεται πολύ γρήγορα.

Το **αλουμίνιο** συνήθως εμφανίζει διάβρωση με βελονισμούς στο θαλάσσιο περιβάλλον, εξαιτίας του στρώματος οξειδίων στην επιφάνεια του. Για το λόγο αυτό στο αλουμίνιο προστίθενται κραματικά στοιχεία, τα οποία εμποδίζουν, τη δημιουργία του παθητικού στρώματος.

Οι άνοδοι **μαγνησίου** δεν προτιμώνται για μακροχρόνια προστασία σε θαλασσινό νερό γιατί διαβρώνονται πολύ γρήγορα, αλλά προτιμώνται σε άλλες εφαρμογές, όπως παραδείγματος χάριν για προστασία δεξαμενών νερού.

3.2.1 Απαιτήσεις υλικού θυσιαζόμενων ανόδων ^[16]

Είναι απαραίτητο το υλικό θυσιαζόμενων ανόδων να διαθέτει κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όπως:

1. Να είναι αξιόπιστο και να διαθέτει το απαραίτητο δυναμικό
2. Να διαθέτει υψηλή ηλεκτροχημική απόδοση ($Ahkg^{-1}$)
3. Να παρέχει ομοιόμορφη διάλυση της ανόδου, έτσι ώστε όλο το μέταλλο να καταναλίσκεται στην παροχή καθοδικής προστασίας και όχι να σπαταλείται άσκοπα από μηχανική απώλεια
4. Να μην παύει να λειτουργεί εξαιτίας παρεμπόδισης από το φαινόμενο της παθητικοποίησης

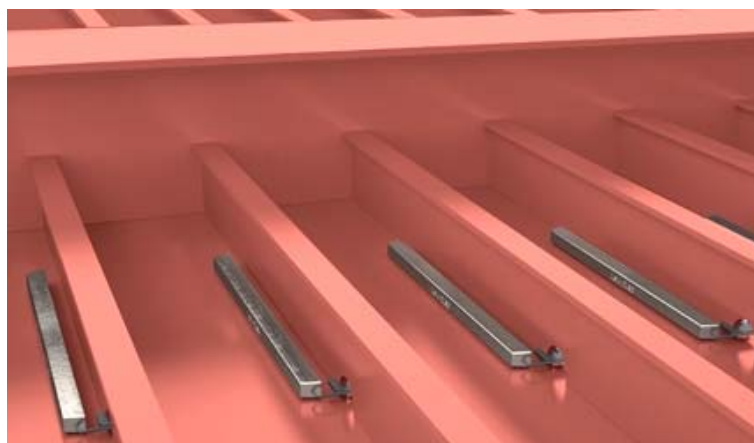
Ο πίνακας 3.3 που ακολουθεί παρέχει πληροφορίες για τις παραμέτρους λειτουργίας για διάφορους τύπους θυσιαζόμενων ανόδων σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Είναι προφανές ότι τα δυναμικά προστασίας που προέρχονται από τις θυσιαζόμενες ανόδους είναι ουσιαστικά υπερβολικά μικρότερα από αυτά που προέρχονται από εξωτερικές πηγές ρεύματος στη μέθοδο επιβαλλόμενου ρεύματος. Στην καλύτερη περίπτωση, μία θυσιαζόμενη άνοδος θα προσδίδει 1V σε χάλυβα, ενώ με επιβαλλόμενη τάση μπορεί να προσδοθεί μέχρι 100 V.

Πίνακας 3.3: Παράμετροι λειτουργίας θυσιαζόμενων ανόδων από διαφορετικά υλικά^[16]

Alloy	Environment	Operating voltage vs. Ag/AgCl/seawater (V)	Driving voltage (V)	Capacity (Ah/kg)
Al-Zn-Hg	Seawater	-1.0 to -1.05	0.20–0.25	2600–2850
Al-Zn-In	Seawater	-1.0 to -1.10	0.20–0.30	2300–2650
Al-Zn-In	Marine sediments	-0.95 to -1.05	0.15–0.25	1300–2300
Al-Zn-Sn	Seawater	-1.0 to -1.05	0.20–0.25	925–2600
Zn	Seawater	-0.95 to -1.03	0.15–0.23	760–780
Zn	Marine sediments	-0.95 to -1.03	0.15–0.23	750–780
Mg-Al-Zn	Seawater	-1.5	0.7	1230
Mg-Mn	Seawater	-1.7	0.9	1230

*The driving voltage to bare steel, that is, protection potential of steel–anode operating potential.

Παρακάτω δίνονται θυσιαζόμενες άνοδοι σε θαλάσσιες κατασκευές με ποικίλους τρόπους στήριξης (βλέπε σχήμα 3.5 και σχήμα 3.6).

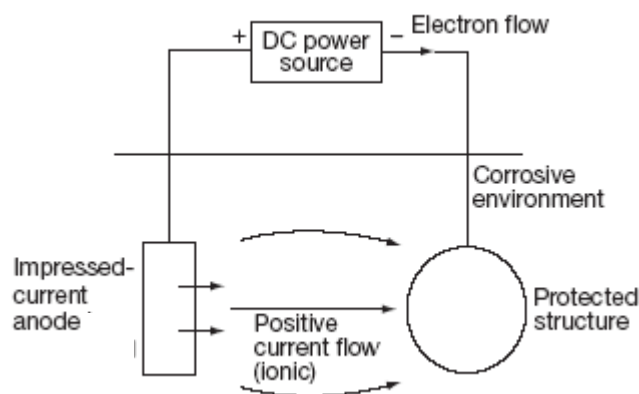
**Σχήμα 3.5:** Απεικόνιση θυσιαζόμενων ανόδων σε δεξαμενές έρματος (Ballast tanks)^[37]



Σχήμα 3.6: Απεικόνιση θυσιαζόμενων ανόδων σε πλατφόρμα εξόρυξης πετρελαίου^[37]

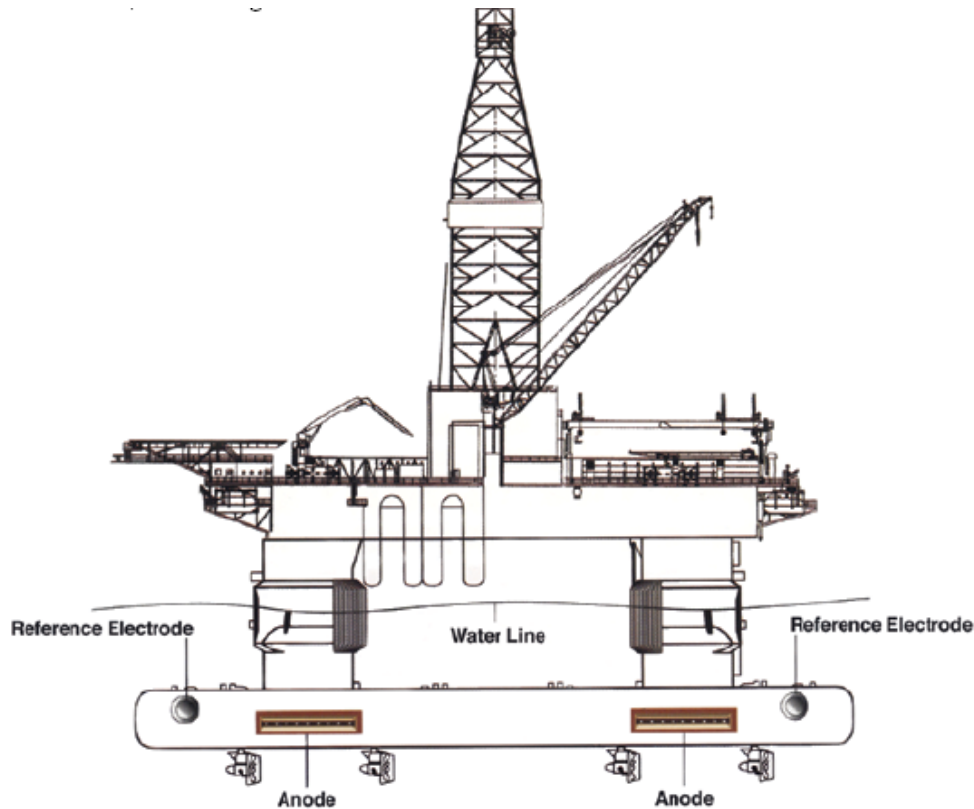
3.3 Η μέθοδος καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενο ρεύμα (Impress Current Cathodic Protection or ICCP)^{[1], [15], [16]}

Στη μέθοδο επιβαλλόμενου ρεύματος (Impress Current Cathodic Protection, ICCP), παρέχεται στο προς προστασία μέταλλο, ρεύμα με ρυθμούς μεγαλύτερους ή ίσους από αυτούς που εξέρχονται κατά τη διάβρωση του μετάλλου. Η παροχή του ρεύματος γίνεται μέσω της σύνδεσης, της προστατευόμενης επιφάνειας με τον αρνητικό πόλο μιας πηγής συνεχούς ρεύματος, ενώ ο θετικός συνδέεται με ένα κατάλληλο βοηθητικό ηλεκτρόδιο (άνοδος-ηλεκτρογραφίτης, ανοξειδωτος χάλυβας, πυριτιούχος σίδηρος, στα πλοία χρησιμοποιείται τιτάνιο επικαλυμμένο με μικτά οξειδία) μέσα στο διαβρωτικό περιβάλλον (βλέπε σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7: Σχηματικό διάγραμμα της καθοδικής προστασίας χρησιμοποιώντας την τεχνική του επιβαλλόμενου ρεύματος (Schematic diagram of cathodic protection using the Impressed - current technique)^[16]

Η τεχνική αυτή δεν είναι καινούργια χρησιμοποιείται ήδη από τη δεκαετία του 1950 για την προστασία θαλασσίων κατασκευών και προτιμάται πάντα σε συνδυασμό με προστατευτικές επικαλύψεις. Η μέθοδος ICCP είναι αποδοτικότερη σε σχέση με την προηγούμενη αλλά προϋποθέτει ηλεκτρολογική εγκατάσταση, κατόπιν προηγούμενης ηλεκτροχημικής μελέτης, ενώ έχει πολύ υψηλό κόστος, πράγμα που την καθιστά απαγορευτική για μικρές και μεσαίες εγκαταστάσεις και κατασκευές και απαιτεί συνεχή έλεγχο λειτουργίας από ειδικά καταρτισμένο προσωπικό.

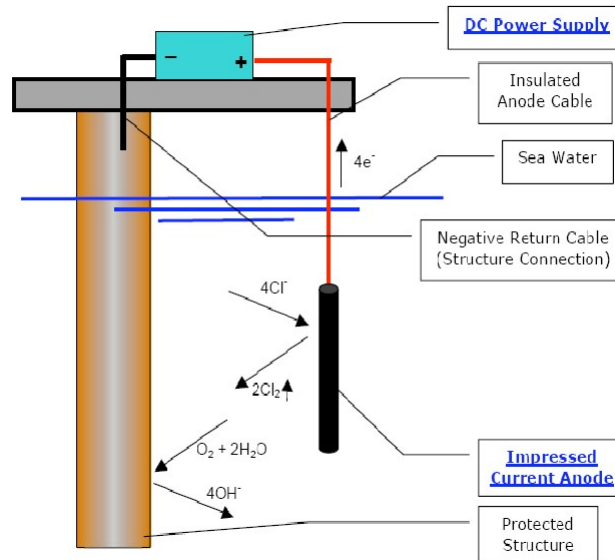


Σχήμα 3.8: Απεικόνιση της μεθόδου επιβαλλόμενου ρεύματος (ICCP) σε πλωτή υπεράκτια πλατφόρμα

Η τάση και η ένταση που επιβάλλονται με αυτή τη μέθοδο προκύπτει από ειδικούς ανιχνευτές οι οποίοι διεγείρουν ανάλογα ηλεκτρονικά κυκλώματα σε μονάδα ελέγχου η οποία δίνει στη συνέχεια εντολή ανάλογης επιβολής τάσης και έντασης. Η τάση αυτή προέρχεται από πηγή ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο έχει μετασχηματισθεί σε χαμηλή τάση και έχει ανορθωθεί σε συνεχές ρεύμα (βλέπε σχήμα 3.8).

Το κύκλωμα που δημιουργείται αποτελείται από την πηγή ρεύματος, το βοηθητικό ηλεκτρόδιο επιβαλλόμενου ρεύματος (άνοδος), το διαβρωτικό διάλυμα και την κατασκευή που πρόκειται να προστατευθεί. Ουσιαστικά η παροχή του ρεύματος γίνεται μέσω της σύνδεσης της προστατευόμενης επιφάνειας με τον αρνητικό πόλο μιας πηγής συνεχούς ρεύματος, ενώ ο θετικός πόλος συνδέεται με ένα κατάλληλο βοηθητικό ηλεκτρόδιο (άνοδος)

μέσα στο διαβρωτικό περιβάλλον. Έτσι στην κατασκευή επιτυγχάνεται καθοδική πόλωση (το δυναμικό της μειώνεται) και το θετικό ρεύμα επιστρέφει μέσω του κυκλώματος στην πηγή ρεύματος (σχήμα 3.9).



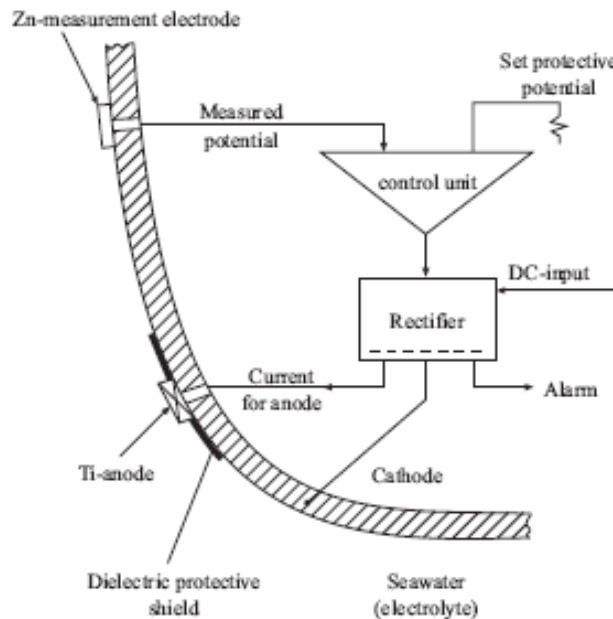
Σχήμα 3.9: Σύστημα καθοδικής προστασίας με την τεχνική του επιβαλλόμενου ρεύματος (Impressed Current Cathodic Protection System) ^[42]

Το δυναμικό που αποκαθίσταται μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι το δυναμικό διάβρωσης E_{corr} , στο οποίο αντιστοιχεί ένα ρεύμα διάβρωσης i_{corr} . Όταν με τη βοήθεια εξωτερικής πηγής το δυναμικό πάρει μια πιο αρνητική τιμή E_1 το νέο ρεύμα της ανόδου θα είναι I_{corr} . Προκειμένου να πραγματοποιηθεί αυτό, η εξωτερική πηγή επιβάλλει ρεύμα i_1 αντίθετης φοράς και στην περίπτωση αυτή η προστασία θα είναι μερική. Αν όμως το δυναμικό των ηλεκτροδίων γίνει ίσο ή μικρότερο του δυναμικού διάλυσης της ανόδου, τότε το ρεύμα που θα επιβάλλει η πηγή θα είναι I_{protect} και η προστασία θα είναι ολική.

Για την εφαρμογή τέτοιων μεθόδων προστασίας απαιτείται ηλεκτρολογική και ηλεκτρονική εγκατάσταση ενός πλήρους συστήματος (βλέπε σχήμα 3.10). Το σύστημα ελέγχου είναι στην πραγματικότητα ένας ποτενσιοστάτης, δηλαδή ένα σύστημα που εφαρμόζει προκαθορισμένες τιμές δυναμικού και ταυτόχρονα λαμβάνει τιμές πυκνότητας ρεύματος. Ο ποτενσιοστάτης στα συστήματα καθοδικής προστασίας διαθέτει διάταξη αυτόματης προσαρμογής της τιμής του δυναμικού. Η μονάδα ελέγχου ρυθμίζεται ώστε να εφαρμόζει πυκνότητα ρεύματος I_p έτσι ώστε για συγκεκριμένη επιφάνεια διαβροχής A να μετράται στη μεταλλική επιφάνεια ρεύμα $I_p/A = i_p$, καθώς και η προεπιλεγμένη τιμή του δυναμικού προστασίας E_p είναι π.χ. -850 mV. Με τον τρόπο αυτό η μεταλλική επιφάνεια προστατεύεται έναντι της διάβρωσης. Πολύ χαμηλότερες τιμές δεν χρησιμοποιούνται γιατί προκαλούν ψαθυροποίηση του χάλυβα λόγω υδρογόνου (hydrogen embrittlement), καθώς

και καταστροφές στις επικαλύψεις των μεταλλικών επιφανειών (chalking). Η συνηθέστερη τιμή δυναμικού είναι -850 mV .

Το σύστημα της καθοδικής προστασίας μπορεί να προσαρμόζεται αυτόματα με την εφαρμογή κατάλληλης μονάδας ελέγχου. Όταν η μεταλλική επιφάνεια προστατεύεται με οργανικές επικαλύψεις τότε το ρεύμα που καταγράφεται είναι χαμηλότερο, ωστόσο η τιμή της πυκνότητας του ρεύματος για την προστασία των γυμνών επιφανειών θα είναι ίδια.



Σχήμα 3.10: Απεικόνιση ενός πλήρους συστήματος με μονάδα ελέγχου^[10]

Στην περίπτωση φθοράς των οργανικών επικαλύψεων η επιφάνεια που πρέπει να προστατευτεί αυξάνεται, οπότε αν η μονάδα ελέγχου συνέχιζε να εφαρμόζει τιμή ρεύματος I_p , τότε η τιμή της πυκνότητας ρεύματος θα μειωνόταν. Αυτό θα προκαλούσε μετατόπιση του δυναμικού προς το δυναμικό διάβρωσης, με ταυτόχρονη αύξηση του ρυθμού διάβρωσης. Σε ένα σύστημα ICCP με κύκλωμα αυτόματης προσαρμογής η μεταβολή του δυναμικού καταγράφεται και το σύστημα ρυθμίζει το εφαρμοζόμενο δυναμικό ξανά στην προκαθορισμένη τιμή E_p . Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει η μονάδα ελέγχου να εφαρμόσει μεγαλύτερες τιμές ρεύματος προκειμένου να διατηρηθεί η τιμή της πυκνότητας ρεύματος i_p . Το αντίστροφο φαινόμενο είναι εξίσου σημαντικό. Αν η επιφάνεια που πρόκειται να προστατευτεί μειώνεται, τότε η πυκνότητα του ρεύματος αυξάνεται και το δυναμικό είναι χαμηλότερο, που δεν είναι επιθυμητό.

3.3.1 Οι άνοδοι του συστήματος ICCP [1], [15],[16]

Οι άνοδοι του συστήματος ICCP αποτελούνται κατά κύριο λόγο από υλικό που φθείρεται, καταναλώνεται κατά την αντίδραση της ανοδικής διάλυσης και για αυτό το λόγο αντικαθίσταται κατά διαστήματα. Στις περισσότερες εφαρμογές τα υλικά της ανόδου είναι :

- Κράμα μολύβδου – αργύρου,
- Επιπλατινωμένο τιτάνιο και
- Επιπλατινωμένο νιόβιο.

Οι άνοδοι συνήθως κατανέμονται σε συγκεκριμένα διαστήματα σε όλη την κατασκευή και τοποθετούνται συνήθως σε συμμετρικές θέσεις στην κατασκευή. Υπάρχουν τρεις γενικοί τύποι ανόδων που χρησιμοποιούνται για το σύστημα ICCP.

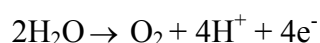
- Οι αναλώσιμες,
- Οι μη αναλώσιμες
- Οι ημί-αναλώσιμες.

Οι αναλώσιμες άνοδοι παρουσιάζουν ανοδική αντίδραση που περιλαμβάνει την κατανάλωσή τους. Έτσι, μία άνοδος από σίδηρο παράγει ηλεκτρόνια κατά την αντίδραση:

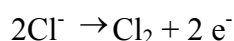


Δεδομένου ότι η κατανάλωση της ανόδου πρέπει να υπακούει στο νόμο του *Faraday*, προκύπτει ότι η απώλεια υλικού της ανόδου θα είναι ανάλογη με το συνολικό ρεύμα που προσδίδεται. Στην πράξη, η απώλεια υλικού για άνοδο από σίδηρο είναι περίπου $9 \text{ kgA}^{-1} \text{ year}^{-1}$. Για αυτό οι αναλώσιμες άνοδοι πρέπει να αντικαθίσταται κατά διαστήματα ή να είναι επαρκούς μεγέθους, ώστε να παρέχουν κατάλληλη ποσότητα ρεύματος για τη σχεδιασμένη διάρκεια ζωής της προστατευόμενης κατασκευής. Αυτό δημιουργεί κάποια προβλήματα στο σχεδιασμό, επειδή καθώς η άνοδος καταναλίσκεται, η αντίσταση του κυκλώματος αυξάνεται. Το πιο σημαντικό είναι ότι είναι δύσκολο να εξασφαλιστεί η συνεχής ηλεκτρική σύνδεση με την καταναλισκόμενη άνοδο.

Οι μη αναλώσιμες άνοδοι διατηρούν μια ανοδική αντίδραση, η οποία αποσυνθέτει το υδατικό περιβάλλον και όχι το υλικό της ανόδου. Σε υδατικά διαλύματα, η αντίδραση μπορεί να είναι:



ή υπό την παρουσία ιόντων χλωρίου:



Οι άνοδοι που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία (μη αναλώσιμες) είναι αυτές από υλικό επιπλατινωμένο τιτάνιο και επιπλατινωμένο νιόβιο. Επειδή αυτές οι άνοδοι δεν καταναλώνονται σύμφωνα με το νόμο του Faraday, δεν απαιτούν αντικατάσταση κατά τη διάρκεια ζωής της προστατευόμενης κατασκευής. Ωστόσο, για να παραμείνουν άθικτες, θα πρέπει να είναι χημικά ανθεκτικές στα ανοδικά προϊόντα (οξύ και χλώριο) και όταν τα προϊόντα είναι αέρια, οι συνθήκες θα πρέπει να είναι κατάλληλες, ώστε να επιτρέπουν στα αέρια αυτά να διαφεύγουν και να μη διαταράσσεται η ορθή λειτουργία της ανόδου. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα επιπλατινωμένα ηλεκτρόδια επειδή αυτά μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλή πυκνότητα ρεύματος (>100 Am⁻²) χωρίς προβλήματα, αλλά στη συνέχεια παράγονται υψηλά επίπεδα οξύτητας (pH <2) και μεγάλες ποσότητες αερίου. Ο τρόπος με τον οποίο εγκαθίσταται η άνοδος είναι ζωτικής σημασίας.

Οι ημί-αναλώσιμες άνοδοι, όπως υποδηλώνει και το όνομα τους, υπόκεινται σε πολύ μικρότερη απώλεια υλικού από ότι ο νόμος του Faraday θα είχε προβλέψει και σημαντικά περισσότερη από τους μη αναλώσιμες ανόδους. Αυτό συμβαίνει επειδή η ανοδική αντίδραση μοιράζεται ανάμεσα στην οξείδωση του υλικού της ανόδου (που προκαλεί απώλεια μετάλλου) και στην οξείδωση του περιβάλλοντος (χωρίς ταυτόχρονη απώλεια μετάλλου). Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι άνοδοι κατασκευασμένες από πυρίτιο-σίδηρο, χρώμιο-πυρίτιο-σίδηρο και γραφίτη. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά ορισμένων ανόδων επιβαλλόμενου ρεύματος, διαφορετικών υλικών (Πίνακας 3.4).

Πίνακας 3.4: Υλικά των ανόδων του συστήματος ICCP (Impressed-current anode materials)^[16]

Υλικό (Material)	Ρυθμός κατανάλωσης ή πυκνότητα ρεύματος λειτουργίας (Consumption rate or operating current density)	Σημειώσεις (Notes)
Αναλώσιμες (Consumables):		
Scrap iron	~9kg A-1 year -1	Οικονομικό κατάλληλο για χρήση σε θαλάσσιο περιβάλλον η στο έδαφος
Cast iron	<9kgA-1 year -1	Οικονομικό: κατάλληλο για χρήση σε θαλάσσιο περιβάλλον η στο έδαφος
Ημί-αναλώσιμες (Semi-consumables):		
Silicon cast iron (Fe-14Si-(3 Mo)	5-50 A m ⁻² (in freshwater or soil)	θαλάσσιο περιβάλλον η στο έδαφος; κατανάλωση (<1kg A-1 year -1); Mo μειώνει την κατανάλωση στο θαλασσινό νερό
Graphite	2.5-10 A m ⁻²	Ρυθμός κατανάλωσης πολύ μικρότερος από το χάλυβα ή το χυτοσίδηρο<1kgA-1 year -1); ιόντα χλωρίου μειώνουν την κατανάλωση
Μη-αναλώσιμες (Non-consumables):		
Lead alloys:		
1. Pb-6Sb-1Ag	<50-200 A m ⁻² (in seawater)	PbO2 φιλμ που εμποδίζει την κατανάλωση
2. Pt-activated	<50-500 A m ⁻² (in seawater)	PbO2 προστατευτικό φιλμ
Platinized Ti, Ta, or	<1000 A m ⁻²	Ασυνέχειες στην επίστρωση Pt, το υπόστρωμα προστατεύεται από φιλμ οξειδίου, ευαίσθητο
Nb	(consumption)	(<100 Hz) AC DC Κατανάλωση ηλεκτροδίου; maximum λειτουργικό δυναμικό με υπόστρωμα Ti :9V

Τα απαραίτητα χαρακτηριστικά των μη αναλώσιμων ανόδων είναι τα κάτωθι:

- i) Να παρουσιάζουν καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα
- ii) Να εμφανίζουν χαμηλό ρυθμό διάβρωσης
- iii) Να διαθέτουν καλές μηχανικές ιδιότητες, ώστε να αντέχουν τις τάσεις που μπορεί να εμφανιστούν κατά την εγκατάσταση ή κατά τη λειτουργία
- iv) Να κατασκευάζονται εύκολα με μια ποικιλία σχημάτων
- v) Να έχουν χαμηλό κόστος
- vi) Να αντέχουν σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος στις επιφάνειες τους, χωρίς σχηματισμό στρωμάτων οξειδίων.

Στην πράξη, τάσεις μέχρι 100 V και υψηλές πυκνότητες ρεύματος μέχρι 1500 Am⁻² είναι δυνατόν να εμφανίζονται σε ανόδους επιβαλλόμενου ρεύματος (βλέπε πίνακα 3.5). Έτσι μεγάλες περιοχές της κατασκευής μπορεί να προστατεύονται από μία μόνο άνοδο και εξαιτίας της υψηλής τάσης η άνοδος δύναται να τοποθετηθεί και σε απόσταση από την κατασκευή.

Πίνακας 3.5: Ιδιότητες ανόδων επιβαλλόμενης τάσης (*Properties of impressed-current anodes*)^[15]

Υλικό ανόδου (Anode material)	Μέγιστο δυναμικό (Max volts)	Τυπική πυκνότητα ρεύματος ανόδου (Typical anode current density) [A m ⁻²]
Λευκόχρυσος/ νιόβιο (Platinum/ niobium)	100	250 – 1500
Μόλυβδος / ασήμι / αντιμόνιο (Lead / silver / antimony)	100	250–1000
High silicon iron	100	10–100
Γραφίτης (Graphite)	-	200

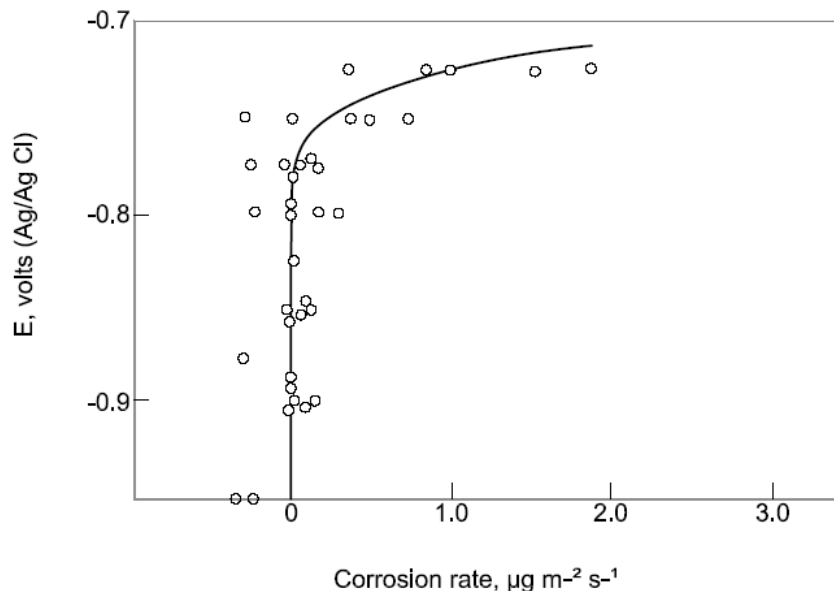
* Max Volts: Dependent on the environment (Εξαρτάται από το περιβάλλον).

3.4 Σχεδίαση ενός συστήματος καθοδικής προστασίας ^{[1], [3], [15]}

Η σχεδίαση ενός συστήματος καθοδικής προστασίας και η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής προστασίας δεν είναι απλή υπόθεση αφού πλήθος παραγόντων είναι απαραίτητο να συνυπολογιστούν, όπως είναι η επιφάνεια προστασίας, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και συνθήκες λειτουργίας. Όπως ήδη έχουμε αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο η διάβρωση στο θαλασσινό νερό εξαρτάται από πληθώρα στοιχείων, όπως η αλατότητα του νερού, η συγκέντρωση οξυγόνου, το pH του νερού, η θερμοκρασία του νερού, η ταχύτητα ροής του νερού γύρω από την κατασκευή κ.α.

3.4.1 Τα δυναμικά προστασίας

Στην πράξη, το δυναμικό μιας κατασκευής που βρίσκεται σε ηλεκτρολύτη μετράται χρησιμοποιώντας ένα πρότυπο ηλεκτρόδιο αναφοράς. Τα πρότυπα ηλεκτρόδια αναφοράς συνήθως είναι με βάση το θεικό χαλκό / χαλκό, άργυρο / χλωριούχο άργυρο, ή καθαρό ψευδάργυρο. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς πρέπει να βρίσκεται πολύ κοντά στην επιφάνεια στην οποία γίνεται η μέτρηση του δυναμικού. Για το χάλυβα σε αερόβιο ηλεκτρολύτη με σχεδόν ουδέτερο pH μια κοινά αποδεκτή τιμή για το δυναμικό προστασίας είναι -850 mV (για το χάλυβα), όταν όμως εκτίθεται σε θειο-αναγωγικά βακτήρια, απαιτείται δυναμικό προστασίας -950 mV και οι δύο τιμές αυτές αναφέρονται σε ένα ηλεκτρόδιο θειικού χαλκού / χαλκού (Πίνακας 3.6). Εργαστηριακά αποτελέσματα προσδιορισμού του δυναμικού προστασίας για το χάλυβα στο θαλάσσιο νερό φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί (σχήμα 3.11).



Σχήμα 3.11: Διάγραμμα προσδιορισμού του δυναμικού προστασίας του χάλυβα στο θαλάσσιο νερό (Determination of protection potential for steel in sea water) ^[15]

Ορισμένες τιμές για το δυναμικό προστασίας άλλων μετάλλων φαίνονται στον επόμενο πίνακα. Οι τιμές για το μόλυβδο Pb και το αλουμίνιο Al πρέπει να ελέγχονται προσεκτικά, ώστε να αποφεύγονται ζημιές από την περίσσεια αλκαλίου που θα μπορούσε να δημιουργηθεί στην επιφάνεια των μετάλλων, όταν το δυναμικό προστασίας είναι πολύ αρνητικό.

Πίνακας 3.6: Απαιτούμενο δυναμικό για την καθοδική προστασία (*Potential required for cathodic protection*)^[13]

<i>Metal</i>	<i>Potential (Cu/CuSO₄)</i>
<i>Steel</i>	<i>-850 mV</i>
<i>Steel (sulphate reducing bacteria)</i>	<i>-950 mV</i>
<i>Copper alloys</i>	<i>-500 to -650 mV</i>
<i>Lead</i>	<i>-600 mV</i>
<i>Aluminium</i>	<i>-950 to -1200 mV</i>

3.4.2 Η πυκνότητα ρεύματος

Η πυκνότητα του ρεύματος που απαιτείται για να διατηρηθεί το δυναμικό προστασίας εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές τοπικές συνθήκες. Αυξημένη περιεκτικότητα οξυγόνου O₂ στην επιφάνεια του μετάλλου, συμβάλλει άμεσα στην αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος. Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε διάγραμμα σε προηγούμενο κεφάλαιο (σχήμα 2.3).

Αυξημένη περιεκτικότητα του οξυγόνου μπορεί να συμβεί λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης οξυγόνου στο περιβάλλον, στην αυξημένη ροή νερού ή σε στροβιλισμό. Έτσι, οι πυκνότητες ρεύματος σε κατασκευές στο θαλασσίνο νερό, σε ποτάμια κ.λ.π. είναι πιθανόν να ποικίλλουν συνεχώς. Το pH του περιβάλλοντος είναι επίσης πολύ σημαντικό. Η παρουσία των επικαλύψεων, ρύπανσης και ασβεστολιθικών αποθεμάτων στη γάστρα έχουν επίδραση στην πυκνότητα ρεύματος. Μερικές τυπικές τιμές πυκνότητας ρεύματος για το χάλυβα παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα 3.7.

Πίνακας 3.7: Απαιτούμενες πυκνότητες ρεύματος για την προστασία του χάλυβα (*Current densities required to protect steel*)^[15]

<i>Environment</i>	<i>Current density [A m⁻²]</i>
<i>Acidic solutions</i>	<i>350 – 500</i>
<i>Saline solutions</i>	<i>0.3 – 10</i>
<i>Sea water</i>	<i>0.05 – 0.15</i>
<i>Saline mud</i>	<i>0.025 – 0.05</i>

Έχοντας αποφασίσει για την κατάλληλη πυκνότητα ρεύματος, το συνολικό ρεύμα ανόδου μπορεί να προσδοθεί από μία περιοχή (ή περισσότερες) της κατασκευής. Το μέγεθος των ανόδων μπορεί στη συνέχεια να προσδιοριστεί από τα δεδομένα του επόμενου πίνακα, όταν ένα σύστημα θυσιαζόμενων ανόδων πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, λαμβάνεται υπόψη η διάρκεια ζωής της προστατευόμενης κατασκευής ή το χρονικό διάστημα που απαιτείται μεταξύ των δεξαμενισμών. Οι ιδιότητες θυσιαζόμενων ανόδων διάφορων υλικών παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα 3.8.

Πίνακας 3.8: Οι ιδιότητες των θυσιαζόμενων ανόδων (*Properties of sacrificial anodes*)^[15]

<i>Anode material</i>	<i>Density [g cm⁻³]</i>	<i>Potential (Cu/CuSO₄) [Volts]</i>	<i>Amp-hrs per kg</i>	<i>Typical anode current density [A m⁻²]</i>
<i>Zn</i>	<i>7.1</i>	<i>-1.10</i>	<i>780</i>	<i>0.5 – 2</i>
<i>Al</i>	<i>2.7</i>	<i>-1.15</i>	<i>2700</i>	<i>0.6 – 2.5</i>
<i>Mg</i>	<i>1.7</i>	<i>-1.55</i>	<i>1230</i>	<i>1.5 – 5.6</i>

3.5 Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος καθοδικής προστασίας

Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος καθοδικής προστασίας πρέπει να ληφθεί μια σημαντική απόφαση σχετικά με το αν το σύστημα θα πρέπει να είναι με θυσιαζόμενες ανόδους ή μέσω επιβαλλόμενης τάσεως ή ένας συνδυασμός, των δύο αυτών προηγούμενων συστημάτων.

3.5.1 Πλεονεκτήματα της μεθόδου θυσιαζόμενων ανόδων

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου θυσιαζόμενων ανόδων είναι αρκετά μεταξύ των οποίων:

- (α) Η εγκατάσταση είναι απλή
- (β) Ανεξάρτητη από οποιοδήποτε εξωτερική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας
- (γ) Κατάλληλη για σημειακή, τοπική προστασία
- (δ) Αποδοτική κατανομή ρεύματος (πολλές άνοδοι)
- (ε) Δεν προκαλεί αλληλεπίδραση σε κοντινές κατασκευές
- (στ) Σχεδιάζονται για ακίνητες πλωτές κατασκευές για 25 χρόνια περίπου ή και περισσότερα (ανάλογα τη διάρκεια λειτουργικής ζωής της κατασκευής).

Είναι αρκετά δύσκολο με τη μέθοδο αυτή να υπέρ-προστατεύσεις την κατασκευή, αλλά σχετικά εύκολο να διατηρήσεις ένα ομοιόμορφο δυναμικό σε όλη την κατασκευή. Ένας περιορισμός της μεθόδου που υπάρχει είναι το μεγάλο βάρος των ανόδων, ειδικά στην περίπτωση ακίνητων πλωτών κατασκευών (offshore). Ενώ επίσης θεωρείται οικονομικά ασύμφορο για τα ύφαλα μεγάλων πλοίων και για μεγάλες πλωτές κατασκευές (offshore). Ο πιο σοβαρός περιορισμός των θυσιαζόμενων ανόδων είναι η μικρή εμβέλεια δράσης, η οποία περιορίζει τη χρήση τους σε αγωγία περιβάλλοντα ή σε καλά βαμμένες επιφάνειες. Για να προστατεύσεις μια μεγάλη μεταλλική υπεράκτια κατασκευή με θυσιαζόμενες ανόδους, ένας μεγάλος αριθμός ανόδων θα πρέπει να κατανομηθεί κατά μήκος των κατασκευών αυτών, πράγμα που προϋποθέτει πλήθος τεμαχίων υψηλού κόστους και αρκετά μεγάλη εργασία για την εγκατάσταση.

3.5.2 Πλεονεκτήματα της μεθόδου επιβαλλόμενου ρεύματος

Ως πλεονεκτήματα της μεθόδου επιβαλλόμενου ρεύματος μπορούν να θεωρηθούν:

- (α) Η μεγάλη εμβέλεια δράσης, που είναι διαθέσιμη μπορεί να προστατεύσει μια μεγάλη, ακόμη και χωρίς επικαλύψεις κατασκευή σε περιβάλλοντα υψηλής αντίστασης
- (β) Λίγες άνοδοι απαιτούνται, συγκριτικά με τη μέθοδο των θυσιαζόμενων ανόδων
- (γ) Η τάση μπορεί να προσαρμόζεται για να επιτρέπει περιβαλλοντικές αλλαγές και αλλαγές στην κατάσταση των επικαλύψεων.

Το σύστημα επιβαλλόμενου ρεύματος μπορεί να επιφέρει σε μεγάλο βαθμό κατάσταση υπερπροστασίας, στην πραγματικότητα με τη μέθοδο αυτή η εμφάνιση παραπάνω δυναμικών προστασίας στην κατασκευή δυστυχώς είναι δύσκολο να αποφευχθεί. Ένας περιοριστικός παράγοντας είναι ότι υπάρχουν σοβαροί κίνδυνοι καταστροφής των επικαλύψεων όταν η εγκατάσταση δεν λειτουργεί σωστά. Επιπλέον η μέθοδος αυτή δεν

επιφέρει αποδοτική κατανομή ρεύματος (λίγες άνοδοι) και απαγορεύεται η χρήση της σε δεξαμενές. Σε γενικές γραμμές τα συστήματα θυσιαζόμενων ανόδων προτιμώνται για μικρές ή καλά επικαλυμμένες κατασκευές χαμηλής απαίτησης σε ρεύμα ή για τοπική προστασία. Ενώ αντιθέτως, τα συστήματα επιβαλλόμενου ρεύματος χρησιμοποιούνται για μεγάλες πολύπλοκες κατασκευές, που μπορεί να είναι χωρίς καθόλου ή με κακή επίστρωση. Ωστόσο, στη Βόρεια Θάλασσα για υπεράκτιες εργασίες, η γαλβανική προστασία θεωρείται πολύ οικονομική λύση σε περιπτώσεις μικρών ή μεσαίων πλατφορμών χωρίς επικάλυψη και σε παρόμοιες κατασκευές, που το κόστος επικαλύψεων είναι υψηλό. Επιπλέον, οι θυσιαζόμενες άνοδοι διαθέτουν εύκολα συστήματα εγκατάστασης, είναι ανεξάρτητοι από οποιαδήποτε πηγή ενέργειας και παρέχουν άμεση προστασία στην κατασκευή που βρίσκεται εκτεθειμένη στο θαλασσινό νερό.

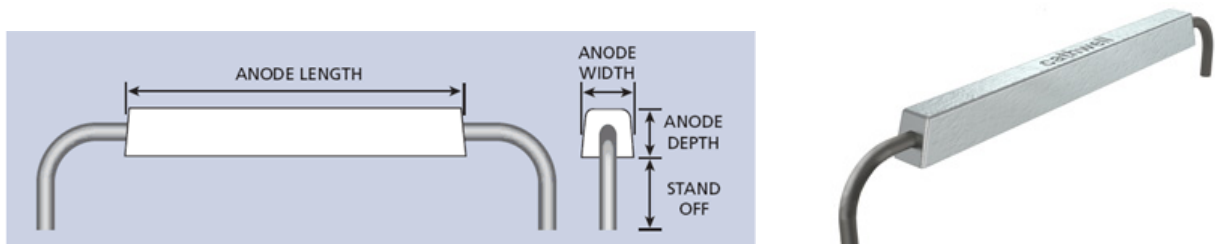
3.5.3 Η αντίσταση των ανόδων

Μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους στο σχεδιασμό ενός συστήματος καθοδικής προστασίας είναι η ηλεκτρική αντίσταση του περιβάλλοντος. Αντιστάσεις για διάφορα περιβάλλοντα, κυμαίνονται από 1 Ohm cm για υφάλμυρο νερό μέχρι και μεγαλύτερες από 500.000 Ohm cm σε μη πορώδη γρανίτη (βλέπε Πίνακα 3.9). Μέτρηση της αντίστασης του περιβάλλοντος και υπολογισμός της ηλεκτρικής αντίστασης μεταξύ των ανόδων και της κατασκευής εξαιτίας του ηλεκτρολύτη πρέπει να γίνεται από τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού του συστήματος. Έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι θα πρέπει να λαμβάνεται από τις ανόδους επαρκές ρεύμα εξόδου καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της κατασκευής (με την εφαρμογή του νόμου του Ohm). Καθιερωμένες μέθοδοι για τον προσδιορισμό της ειδικής αντίστασης του νερού και του εδάφους είναι πλέον διαθέσιμες. Ο ακριβής υπολογισμός των ηλεκτρικών αντιστάσεων μεταξύ των ανόδων και της κατασκευής εξαιτίας του ηλεκτρολύτη δεν είναι εύκολη υπόθεση.

Πίνακας 3.9: Η μέση αντίσταση διαφόρων υλικών (Average resistivities of some materials)^[16]

Environment	Resistivity (ohm cm)
Brackish river water	1
Sea water	25
Town supply water	1000 – 1200
Alluvial soils	1000 – 2000
Clays	1000 – 5000
Gravel	10000 – 25000
Sand	25000 – 50000

Τα ηλεκτρόδια καθοδικής προστασίας του πυθμένα, όπως και αυτά που είναι τοποθετημένα στο έδαφος μπορούν να θεωρηθούν ότι βρίσκονται σε ένα ημί-άπειρο ηλεκτρολύτη, οπότε και οι αντιστάσεις των ηλεκτροδίων θεωρούνται άπειρες στη γη ή στο θαλασσινό νερό και έχουν υπολογιστεί για ένα μεγάλο αριθμό ανόδων διάφορων σχημάτων. Έτσι, εάν οι άνοδοι είναι απομακρυσμένες από την κατασκευή (stand off anodes), αυτές μπορεί να χρησιμοποιηθούν, αλλά παίρνοντας υπόψη τη διαφορά μεταξύ του απαιτούμενου δυναμικού προστασίας και του δυναμικού των ανόδων, για να προσδιοριστεί το ρεύμα ανόδων με τη εφαρμογή του νόμου του Ohm. Εάν ωστόσο οι άνοδοι τοποθετούνται πλησίον της κατασκευής (flush mounted anodes), τότε απαιτείται κάποια διόρθωση στην αντίσταση.



Θυσιαζόμενες άνοδοι απομακρυσμένες από την κατασκευή (stand off anodes)



Θυσιαζόμενες άνοδοι προσαρτημένες πάνω στην κατασκευή (flush mounted anodes)

Σχήμα 3.12: Σχηματική απεικόνιση θυσιαζόμενων ανόδων απομακρυσμένων ή προσαρτημένων πάνω στην κατασκευή (stand off anodes or flush mounted anodes)^[37]

Όταν το ρεύμα ρέει από μια μικρή άνοδο σε μια μεγάλη μεταλλική κατασκευή, η πυκνότητα του ρεύματος είναι μέγιστη κοντά στην επιφάνεια της ανόδου. Ως εκ τούτου ένα μεγάλο μέρος της πτώσης δυναμικού μεταξύ ανόδου και της κατασκευής λαμβάνει χώρα στην περιοχή της ανόδου. Ο παράγοντας αυτός πιθανώς επιτρέπει τις τιμές της αντίστασης της ανόδου στο άπειρο να χρησιμοποιούνται με σχετική επιτυχία, ακόμη και όταν η άνοδος και η κατασκευή δεν βρίσκονται σε απόσταση.

Στην πράξη η κατανομή του ρεύματος σε μια κατασκευή είναι δύσκολο να ελεγχθεί. Αν λάβουμε υπόψη την προστασία ενός αγωγού από μία άνοδο πρέπει να είναι σαφές, ότι θα υπάρξει μια υψηλότερη πυκνότητα ρεύματος στο σημείο πάνω στον αγωγό πλησιέστερα στην άνοδο από οπουδήποτε αλλού. Είναι εμφανές ότι για να διασφαλίσουμε την προστασία των άκρων του αγωγού, το κέντρο του (κοντά στην άνοδο) πρέπει να υπέρ-προστατεύεται σε

κάποιο βαθμό. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τη χρήση αρκετών ανόδων σε απόσταση κατά μήκος του αγωγού, αλλά αυτό αυξάνει σημαντικά το κόστος εγκατάστασης.

3.6 Κίνδυνοι

Παρά τη θετική συμβολή των μεθόδων καθοδικής προστασίας στη διασφάλιση της δομικής ακεραιότητας των θαλασσιών κατασκευών, εμφανίζονται ποικίλα ζητήματα που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή. Με τη μέθοδο των θυσιαζόμενων ανόδων αν και στην αρχή επιτυγχάνεται μια ομοιόμορφη κατανομή δυναμικού, παρατηρείται σταδιακή μείωση του ρεύματος προστασίας με την κατανάλωση του υλικού. Επιπλέον στο σύστημα επιβαλλόμενου ρεύματος παρατηρείται το φαινόμενο του παραπάνω δυναμικού δηλαδή της υπερπροστασίας, αλλά και μη ομοιόμορφης κατανομής δυναμικού. Η εμφάνιση παραπάνω δυναμικών στην κατασκευή είναι δύσκολο να αποφευχθεί. Η υπερπροστασία αυτή έχει πολύ αρνητικές επιδράσεις στις επικαλύψεις των πλωτών κατασκευών και μπορεί να οδηγήσει στην υποβάθμιση των ιδιοτήτων ή στην ολοκληρωτική καταστροφή τους. Στις περιοχές κοντά στις ανόδους έχουμε το ενδεχόμενο ψαθυροποίησης από το υδρογόνο, οπότε έχουμε την εμφάνιση ρωγμών, ιδίως σε περιοχές που επικρατούν αναερόβιες συνθήκες σε συνδυασμό με υψηλές τιμές του δυναμικού, λόγω των ανόδων.

Οποιαδήποτε άλλη κατασκευή που συνυπάρχει στον ίδιο ηλεκτρολύτη λαμβάνει και αποβάλλει το συνεχές ρεύμα καθοδικής προστασίας, λειτουργώντας ως μια εναλλακτική διαδρομή χαμηλής αντίστασης. Η διάβρωση θα επιταχυνθεί στη δευτερογενή κατασκευή σε οποιοδήποτε σημείο το ρεύμα αποβάλλεται στον ηλεκτρολύτη. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αλληλεπίδραση (interaction). Η αλληλεπίδραση μπορεί να συμβεί, για παράδειγμα, σε ένα πλοίο που είναι αγκυροβολημένο παράλληλα με μια προβλήτα που έχει καθοδική προστασία, ή σε έναν αγωγό ή σε μεταλλικό επενδυμένο καλώδιο που διασχίζει ένα αγωγό που διαθέτει σύστημα καθοδικής προστασίας.

Το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με προσεκτική σχεδίαση του συστήματος καθοδικής προστασίας. Πιο συγκεκριμένα, από το σχεδιασμό του συστήματος να λειτουργεί στη χαμηλότερη δυνατή πυκνότητα ρεύματος και διατηρώντας μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ της προστατευόμενης κατασκευής και της δευτερεύουσας, καθώς και μεταξύ του βυθού ή των ανόδων με τη δευτερεύουσα κατασκευή. Αυτό αποτελεί το πλεονέκτημα των συστημάτων με θυσιαζόμενη άνοδο, δηλαδή ότι δεν προκαλούν σοβαρά προβλήματα αλληλεπίδρασης και ως εκ τούτου είναι δημοφιλή για προστασία σε ιδιόμορφες και πολύπλοκες τοποθεσίες. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης πολλές διαδικασίες είναι διαθέσιμες, όπως δοκιμές οι οποίες πρέπει να διεξάγονται με την παρουσία όλων των ενδιαφερομένων μερών, έτσι ώστε η επιλογή των διορθωτικών μέτρων όταν υπάρχει υπέρβαση του αποδεκτού ορίου της αλληλεπίδρασης να συμφωνηθεί. Προσοχή πρέπει να δοθεί στους κινδύνους ανάφλεξης που δημιουργούνται από την επιβολή ηλεκτρικού ρεύματος σε κατασκευές που βρίσκονται σε επικίνδυνο περιβάλλον.

3.7 Καθοδική προστασία υπεράκτιων πλατφορμών εξόρυξης υδρογοναθράκων ^{[17],[18],[19],[21]}

Οι πλωτές υπεράκτιες κατασκευές σε αντίθεση με τα παραδοσιακά εμπορικά πλοία, έχουν ειδικές απαιτήσεις για την προστασία της γάστρας, αφού αυτά δεν αναμένεται να δεξαμενίζονται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Τα υπεράκτια σκάφη εξόρυξης και παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου, όπως είναι τα πλωτά τρυπάνια, οι πλωτές μονάδες αποθήκευσης και εκφόρτωσης καυσίμων (FSOs, Floating, Storage and Offloading) και οι πλωτές μονάδες παραγωγής, αποθήκευσης και εκφόρτωσης (Floating Production Storage and Offloading, FPSOs) διαφέρουν από τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου, πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, πλοία πορθμείων και επιβατηγά πλοία υπό την έννοια ότι δεν αναμένεται να δεξαμενίζονται συχνά.

Εκτιμώντας ότι τα πολύ μεγάλα πλοία μεταφοράς αργού πετρελαίου (Ultra Large Crude Carriers, VLCCs), μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, κρουαζιερόπλοια ή πολεμικά πλοία αναμένεται να δεξαμενιστούν τουλάχιστον μία φορά στα πέντε χρόνια, μια υπεράκτια πλωτή εξέδρα εξόρυξης πετρελαίου έχει σχεδιαστεί και αναμένεται να παραμένει σταθερή χωρίς να δεξαμενιστεί για 20 ή περισσότερα χρόνια. Μια άλλη σημαντική διαφορά είναι ότι τα υπεράκτια σκάφη τείνουν να είναι ακίνητα, στάσιμα. Μια βυθισμένη ή μια ημιβυθισμένη εξέδρα άντλησης πετρελαίου είναι θεμελιωμένη στο βυθό ή αγκυροβολημένη σε ένα σημείο για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ένα πλωτό τρυπάνι, ή ένα FSO ή ένα FPSO επίσης αναμένεται να είναι σταθερό ή να κινείται ελάχιστα για χρόνια ή δεκαετίες.

Ο δεξαμενισμός τέτοιων κατασκευών είναι πολύ χρονοβόρος και δαπανηρός. Δεδομένου ότι τα ημερήσια κέρδη από τη λειτουργία τους είναι πολύ υψηλά, κάθε μέρα εκτός λειτουργίας μπορεί να θεωρηθεί τεράστια απώλεια. Η διαδικασία μεταφοράς στο ναυπηγείο (βλέπε σχήμα 3.14), καθώς και η διαδικασία δεξαμενισμού και από-δεξαμενισμού μπορεί να είναι αρκετά περίπλοκες, ειδικά αν εξαρτήματα πρέπει να απεγκατασταθούν εκ των προτέρων, οι δεξαμενές να αδειάσουν και να γίνουν όλες οι ενέργειες προετοιμασίας του σκάφους. Επιπλέον, υπάρχουν και άλλοι σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την απομάκρυνση μιας για παράδειγμα πλωτής υπεράκτιας κατασκευής από τη θέση της, ότι για να τεθεί πάλι ενεργή λειτουργικά για εξόρυξη απαιτείται μεγάλος χρόνος προετοιμασίας.



Σχήμα 3.13: Μεταφορά πλωτής ημιβυθισμένης πλατφόρμας ^[43]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΑΙ ΚΑΘΟΔΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΠΛΩΤΩΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΩΝ ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

4.1 Η διάβρωση σε πλωτές πλατφόρμες εξόρυξης υδρογονανθράκων ^{[9],[10],[11],[12]}

Η διάβρωση αποτελεί ένα σοβαρό πρόβλημα για τις πλωτές υπεράκτιες κατασκευές εξόρυξης πετρελαίου, λόγω των ακραίων συνθηκών λειτουργίας και την ύπαρξη έντονων διαβρωτικών στοιχείων στις περιοχές όπου αυτές δραστηριοποιούνται. Η διάβρωση που εμφανίζεται σε πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου δεν διαφέρει καθόλου από αυτή των πλοίων, οι περιβαλλοντικοί παράγοντες και οι συνθήκες λειτουργίας είναι αυτοί που καθιστούν τη διάβρωση των κατασκευών αυτών ένα ιδιαίτερο πρόβλημα.

Πιο αναλυτικά, τα υπεράκτια σκάφη τείνουν να είναι ακίνητα, στάσιμα για μεγάλα χρονικά διαστήματα, δεν αναμένεται να δεξαμενίζονται τακτικά (σε πολλές περιπτώσεις και καθόλου) και συνήθως δραστηριοποιούνται σε πολύ μεγάλα βάθη, σε ωκεανούς και όχι σε προστατευόμενες περιοχές, οπότε η ανάγκη προστασίας παίρνει μεγαλύτερες διαστάσεις. Ουσιαστικά η μόνη διαφορά έγκειται στο ότι οι απαιτήσεις του ρεύματος προστασίας είναι πολύ υψηλές και αυτό γιατί υπολογιστικά το ρεύμα προστασίας εξαρτάται τόσο από το διάστημα μεταξύ δεξαμενισμών (ή design life του συστήματος προστασίας) όσο και από το ποσοστό αστοχίας των επικαλύψεων.

Χαρακτηριστικά, σε μια πλωτή υπεράκτια κατασκευή εξόρυξης πετρελαίου που δεν αναμένεται να δεξαμενίζεται, το απαιτούμενο ρεύμα προστασίας προκύπτει πολλαπλάσιο από ότι σε ένα πλοίο ίδιας βυθιζόμενης επιφάνειας που δεξαμενίζεται (συνήθως το αργότερο μία φορά ανά 5 έτη). Το ακραίο περιβάλλον λειτουργίας καθιστά την προστασία από τη διάβρωση των πλωτών πλατφορμών ένα ιδιαίτερα δύσκολο έργο. Για τη διασφάλιση επαρκούς προστασίας από τη διάβρωση κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής αυτών των κατασκευών πρέπει να συνυπολογιστούν πλήθος παραμέτρων.

4.2 Προστασία από τη διάβρωση πλωτών πλατφορμών εξόρυξης υδρογονανθράκων ^{[1],[3]}

Η γνώση του μηχανισμού της διάβρωσης ωστόσο, δεν είναι αρκετή για να εξαλειφθεί το φαινόμενο λόγω της διακύμανσης των συνθηκών και του τοποχημικού χαρακτήρα της. Επιτυγχάνεται έτσι επιβράδυνση του φαινομένου και όχι αναστολή. Κάθε περίπτωση διάβρωσης αποτελεί μεμονωμένο πρόβλημα και χρίζει ξεχωριστής μελέτης. Το είδος και οι συνθήκες γύρω από το φαινόμενο είναι απαραίτητα στοιχεία προς εξακρίβωση, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο περιορισμός του και να αποφευχθούν τυχόν λάθη στην επιλογή της μεθόδου προστασίας ή των συνθηκών που εφαρμόζονται.

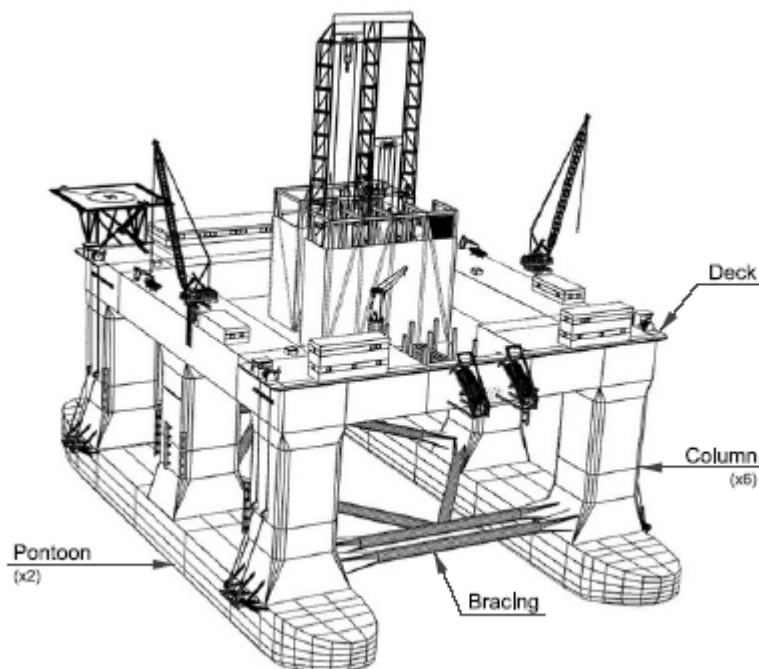
Η καλύτερη δυνατή προστασία πλωτών πλατφορμών εξόρυξης πετρελαίου επιτυγχάνεται με την εφαρμογή σύνθετων μεθόδων προστασίας, δηλαδή απαιτείται συνδυασμός καθοδικής προστασίας και κατάλληλων αντιδιαβρωτικών χρωμάτων. Πιο αναλυτικά κρίνεται απαραίτητος ο συνδυασμός ενός εγκεκριμένου μέσου καθοδικής προστασίας, χρησιμοποιώντας είτε θυσιαζόμενες ανόδους, είτε σύστημα επιβαλλόμενου ρεύματος με τα κατάλληλα αντιδιαβρωτικά χρώματα.

Τρόποι προστασίας από τη διάβρωση πλωτών πλατφορμών εξόρυξης πετρελαίου:

1. Καθοδική προστασία με τη μέθοδο θυσιαζόμενων ανόδων (έχει αναπτυχθεί διεξοδικά σε προηγούμενο κεφάλαιο, επιπλέον γίνεται αναφορά και στην §4.4)
2. Καθοδική προστασία με τη μέθοδο επιβαλλόμενου ρεύματος ICCP (έχει αναπτυχθεί διεξοδικά σε προηγούμενο κεφάλαιο, επιπλέον γίνεται αναφορά και στην §4.4)
3. Η εφαρμογή επικαλύψεων στην επιφάνεια του υλικού με στόχο την απομόνωση από το διαβρωτικό περιβάλλον
4. Με την επιλογή του κατάλληλου υλικού (μετάλλου ή κράματος) που θα τεθεί στο συγκεκριμένο διαβρωτικό περιβάλλον και με τον ορθό σχεδιασμό της κατασκευής.

4.3 Η πλωτή ημιβυθισμένη εξέδρα εξόρυξης υδρογονανθράκων (semi- submersible rig)

Η υπεράκτια άντληση πετρελαίου πραγματοποιείται σε βάθη μεγαλύτερα των 520m, γεγονός που προϋποθέτει ότι η άντληση γίνεται από πλωτές υπεράκτιες κατασκευές και όχι από μόνιμες. Μια πλωτή ημιβυθισμένη πλατφόρμα είναι ένα εξειδικευμένο σκάφος που χρησιμοποιείται για μια σειρά συγκεκριμένων υπεράκτιων σκοπών, όπως είναι οι υπεράκτιες γεωτρήσεις, η εξόρυξη και παραγωγή πετρελαίου κ.α. Οι κατασκευές αυτές έχουν σχεδιαστεί με πολύ καλά χαρακτηριστικά ευστάθειας και δυναμικής απόκρισης, ώστε να προορίζονται ακόμα και για τις δυσμενέστερες καιρικές συνθήκες. Άλλοι όροι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό τους είναι semi – sub ή απλά semi. Μια τυπική πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή εξόρυξης πετρελαίου, απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.1: 3D Απεικόνιση μιας πλωτής ημιβυθισμένης κατασκευής εξόρυξης πετρελαίου

Αυτό το είδος πλωτής κατασκευής δομείται από δύο όμοιες γάστρες χαμηλά τα λεγόμενα ποντόνια (Pontoons), από κυλίνδρους ή αλλιώς πυλώνες (Columns) πάνω σε κάθε ποντόνι (συνήθως κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής) και ένα ανώτερο κατάστρωμα, άνωθεν των κυλίνδρων (βλέπε σχήμα 4.1). Μια τέτοια κατασκευή αποκτά την απαραίτητη άντωση από την κατάλληλη ποσότητα έρματος στις υπάρχουσες δεξαμενές έρματος που βρίσκονται στα ποντόνια (Pontoons). Το κατάστρωμα λειτουργίας βρίσκεται αρκετά πιο πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και δεδομένης της καλής ευστάθειας σχεδιασμού, το κατάστρωμα λειτουργίας διατηρείται μακριά από τα κύματα. Κατασκευαστικοί πυλώνες (Columns) συνδέουν τα ποντόνια με το κατάστρωμα λειτουργίας.

Όταν η πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή βρίσκεται στο μέγιστο βύθισμα, τότε αυτή επηρεάζεται λιγότερο από τις φορτίσεις από κυματισμούς από ότι ένα κανονικό πλοίο. Σε μικρό βύθισμα, ωστόσο, η κατασκευή είναι ευαίσθητη σε μεταβολές φορτίσεων και έτσι πρέπει να ερματιστεί προσεκτικά για να διατηρηθεί η ευστάθεια της. Η πλωτή ημιβυθισμένη πλατφόρμα κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας δεν είναι ποτέ εντελώς κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ δύναται, όποτε απαιτείται, να αλλάζει το βύθισμα της.

Η κατασκευή πλωτών τρυπανιών του τύπου αυτού, ιστορικά εμφανίζεται σε περιόδους οικονομικής άνθησης και για αυτό πολλά μαζί ταυτόχρονα κατασκευάζονται. Ταξινομούνται κατά το Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (International Maritime Organization, IMO) με την ονομασία "generation", ανάλογα με το έτος κατασκευής και το βάθος λειτουργίας (Βλέπε πίνακα 4.1):

Πίνακας 4.1: Ταξινόμηση του τύπου της πλωτής ημιβυθισμένης κατασκευής εξόρυξης πετρελαίου "generation"

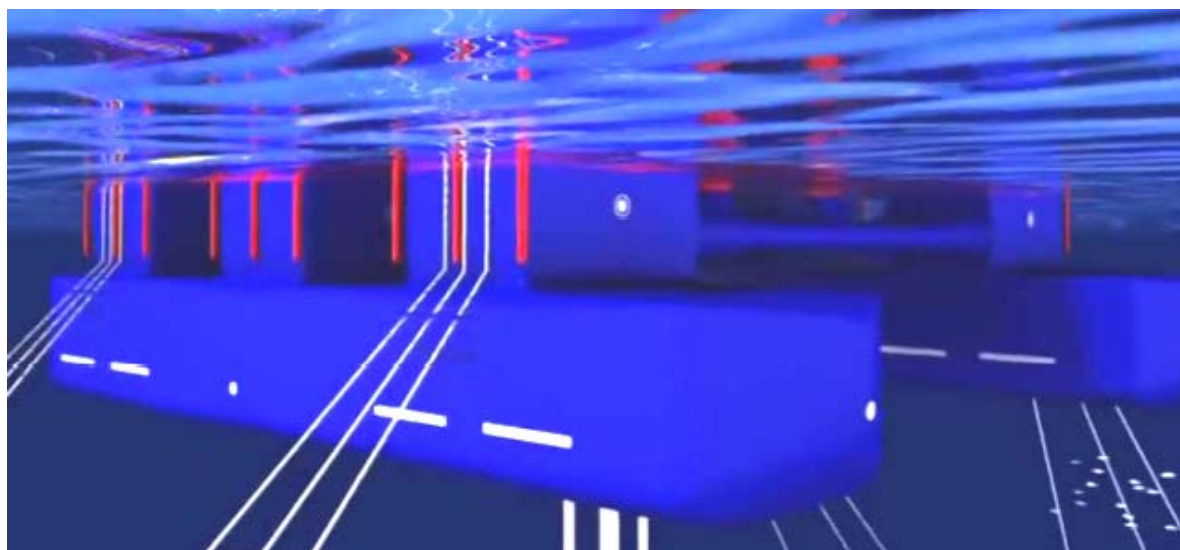
Generation	Water Depth		Dates
<i>First</i>	<i>about 600 ft</i>	<i>200 m</i>	<i>Early 1960s</i>
<i>Second</i>	<i>about 1000 ft</i>	<i>300 m</i>	<i>1969–1974</i>
<i>Third</i>	<i>about 1500 ft</i>	<i>500 m</i>	<i>Early 1980s</i>
<i>Fourth</i>	<i>about 3000 ft</i>	<i>1000 m</i>	<i>1990s</i>
<i>Fifth</i>	<i>about 7500 ft</i>	<i>2500 m</i>	<i>1998–2004</i>
<i>Sixth</i>	<i>about 10000 ft</i>	<i>3000 m</i>	<i>2005–2010</i>

4.4 Εφαρμοζόμενοι μέθοδοι καθοδικής προστασίας σε πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή εξόρυξης υδρογονανθράκων (semi- submersible rig) ^{[9], [17], [18], [19]}

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος καθοδικής προστασίας για τις υπεράκτιες κατασκευές εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η γεωγραφική θέση, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, το μέγεθος της επιφάνειας της μεταλλικής κατασκευής που βρίσκεται βυθισμένη μέσα στο νερό, η πολυπλοκότητα των δομικών στοιχείων, η ποιότητα επικαλύψεων κλπ. Επιπλέον, υπάρχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις των Νηογνομόνων που πρέπει να πληρούνται κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος καθοδικής προστασίας. Οι ημιβυθισμένες πλωτές κατασκευές εξόρυξης πετρελαίου είναι γενικά πολύπλοκες κατασκευές που απαιτούν ειδικό σχεδιασμό του συστήματος καθοδικής προστασίας για τη μέγιστη αποτελεσματικότητα. Καθοδική προστασία, σε υπεράκτιες κατασκευές πραγματοποιείται με δύο τρόπους. Με την τεχνική του επιβαλλόμενου ρεύματος (ICCP) από μία ηλεκτρική πηγή ή με τη χρήση θυσιαζόμενων ανόδων (γαλβανική δράση). Λόγω των δυσμενών συνθηκών λειτουργίας όλων των υπεράκτιων θαλασσίων κατασκευών, ειδικές απαιτήσεις πρέπει να ικανοποιούνται. Σύμφωνα με τους κανονισμούς των νηογνομόνων, η βυθισμένη ζώνη (submersed zone) του τύπου της πλωτής κατασκευής που μελετάμε πρέπει να προστατεύεται από εγκεκριμένο μέσο της καθοδικής προστασίας, χρησιμοποιώντας είτε θυσιαζόμενες ανόδους ή σύστημα επιβαλλόμενου ρεύματος. Υψηλής αντίστασης επιστρώσεις απαιτείται να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με ένα σύστημα καθοδικής προστασίας για την ίδια ζώνη.

4.4.1 Καθοδική προστασία με τη μέθοδο επιβαλλόμενου ρεύματος ICCP

Τόσο στις θαλάσσιες κατασκευές όσο και στα πλοία, τα συστήματα ICCP αποτελούνται από ανόδους και ηλεκτρόδια αναφοράς, τα οποία είναι συνδεδεμένα σε έναν ή περισσότερους πίνακες ελέγχου. Τα ηλεκτρόδια αναφοράς καταγράφουν το ηλεκτρικό δυναμικό στη γάστρα που έρχεται σε επαφή με το θαλασσινό νερό και στέλνουν σήμα στον πίνακα ελέγχου, ο οποίος αυτόματα αυξάνει ή μειώνει το επιβαλλόμενο ρεύμα στις ανόδους. Στη συνέχεια παρουσιάζεται σχηματικά μια πλωτή πλατφόρμα πετρελαίου με προτεινόμενο σύστημα καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενο ρεύμα ICCP για την προστασία των εξωτερικών επιφανειών (σχήμα 4.2). Σύμφωνα με το σχήμα κάθε ποντόνι διαθέτει δύο μονάδες παροχής ισχύος, αρκετές ανόδους και ηλεκτρόδια αναφοράς. Το συμμετρικό σχήμα των ημιβυθισμένων πλωτών κατασκευών ως προς όλους τους άξονες διευκολύνει την ομοιόμορφη κατανομή δυναμικού και τη συμμετρική επιβαλλόμενη προστασία μπροστά, πίσω, δεξιά και αριστερά.



Σχήμα 4.2: Καθοδική προστασία με τη μέθοδο επιβαλλόμενου ρεύματος ICCP σε πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή (semi - submersible rig)^[36]

4.4.2 Καθοδική προστασία με τη μέθοδο θυσιαζόμενων ανόδων

Οι θυσιαζόμενες άνοδοι (γαλβανική δράση) για τις υπεράκτιες κατασκευές παρέχουν μια εναλλακτική λύση, έναντι του συστήματος ICCP. Τα πλεονεκτήματα ενός γαλβανικού συστήματος ανόδων περιλαμβάνει, χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης και εύκολο χειρισμό, αλλά υψηλές απαιτήσεις σε ρεύμα προστασίας, αφού η καθοδική προστασία των στάσιμων πλωτών υπεράκτιων κατασκευών διαφέρει από εκείνη που απαιτείται για τα κινητά σκάφη, μπορεί όμως να θεωρηθεί ασύμφορη (οικονομικά) αναλογικά με τον αριθμό τεμαχίων που θα χρειαστούν. Μικρού και μεσαίου μεγέθους πλωτές πλατφόρμες βρίσκουν ελκυστική τη λύση

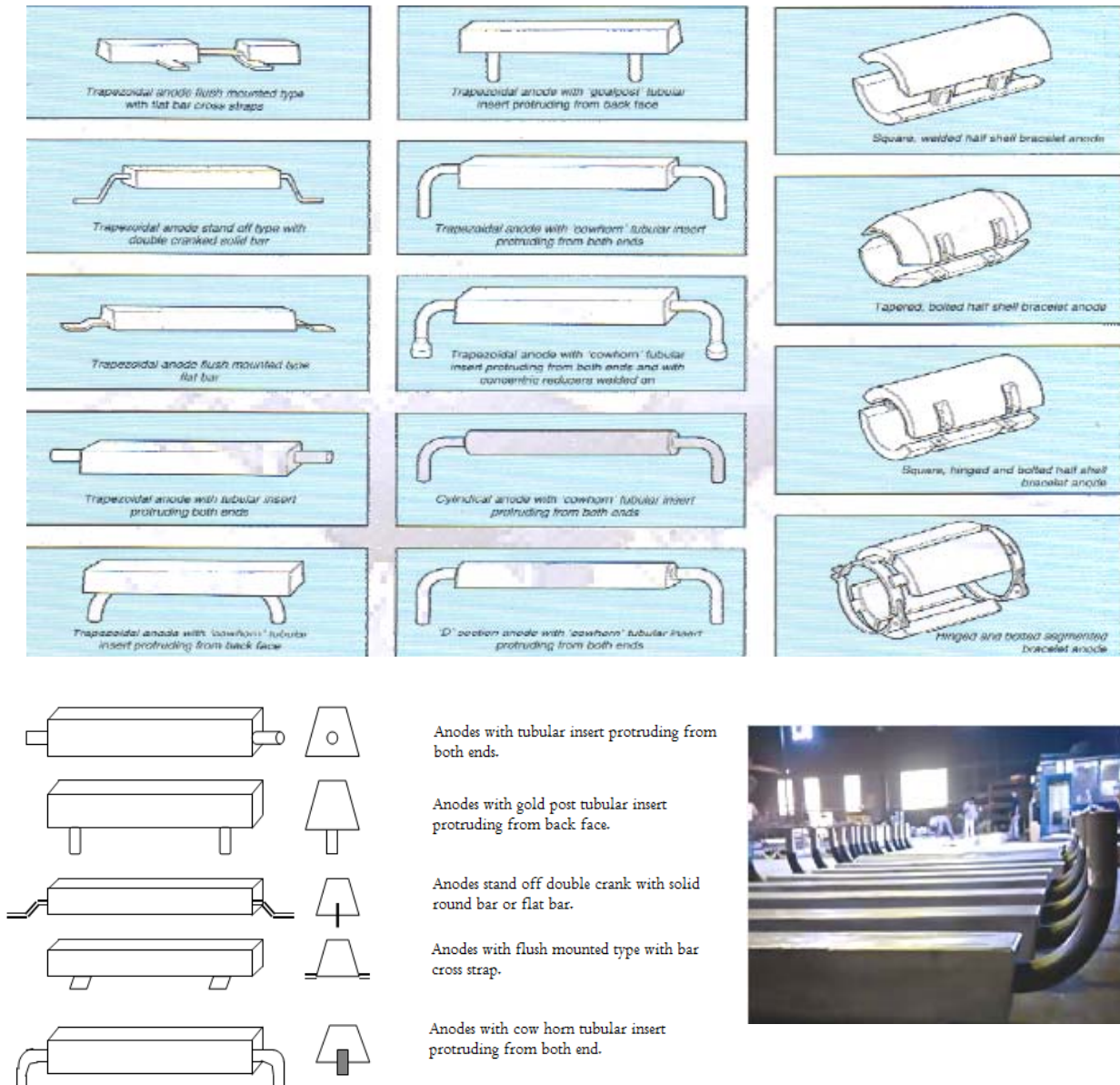
αυτή. Μεγάλες θαλάσσιες κατασκευές δεν μπορούν να υιοθετήσουν αυτή τη μέθοδο προστασίας, διότι θα απαιτούσαν μεγάλο αριθμό τεμαχίων θυσιαζόμενων ανόδων, των οποίων το κόστος εγκατάστασης και αγοράς θα ήταν ασύμφορο, ενώ θα αύξαναν κατά μεγάλο βαθμό το βάρος της κατασκευής. Παρατίθενται στη συνέχεια δύο ημιβυθισμένες πλατφόρμες πετρελαίου με σύστημα καθοδικής προστασίας θυσιαζόμενων ανόδων. Όπως διακρίνεται τα τεμάχια των ανόδων είναι πολυάριθμα (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3: Καθοδική προστασία με τη μέθοδο θυσιαζόμενων ανόδων σε πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή (semi-submersible rig)^[31]

Οι θυσιαζόμενες άνοδοι που χρησιμοποιούνται στις υπεράκτιες κατασκευές και συγκεκριμένα στις πλωτές ημιβυθισμένες κατασκευές, διαφέρουν ως προς το μέγεθος από

αυτές που χρησιμοποιούνται στα πλοία. Δηλαδή είναι αρκετά μεγαλύτερες, εξαιτίας των μεγαλύτερων απαιτήσεων σε ρεύμα προστασίας, που σε πολλές περιπτώσεις φτάνουν σε βάρος έως και τα 500 kg η κάθε μία. Οι τύποι θυσιαζόμενων ανόδων που χρησιμοποιούνται στις πλωτές ημιβυθισμένες κατασκευές φαίνονται στο επόμενο σχήμα (βλέπε σχήμα 4.4). Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι βασικοί τύποι θυσιαζόμενων ανόδων είναι δύο, οι άνοδοι προσαρτημένες πάνω στην κατασκευή (flush mounted anodes), καθώς και οι άνοδοι απομακρυσμένες από την κατασκευή (stand off anodes).



Σχήμα 4.4: Θυσιαζόμενες άνοδοι για υπεράκτιες εφαρμογές (Sacrificial anodes for offshore application) ^[31]

4.5 Εφαρμογή κατάλληλων επιστρωμάτων σε πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή εξόρυξης υδρογονανθράκων (semi- submersible rig)^{[1],[13],[14]}

Μία από τις συνηθέστερες μεθόδους για την προστασία των υλικών από τη διάβρωση είναι η εφαρμογή επιστρωμάτων στη επιφάνεια, με στόχο την απομόνωση της από το διαβρωτικό περιβάλλον. Η χρήση επιστρωμάτων αποτελεί κοινή μέθοδο αντιδιαβρωτικής προστασίας. Η προστατευτική δράση των διαφόρων τύπων επιστρωμάτων οφείλεται στον προκαλούμενο διαχωρισμό του μετάλλου από το διαβρωτικό περιβάλλον του, στην αύξηση της ηλεκτρικής του αντίστασης ή στη μεταβολή της ανοδικής ή και της καθοδικής πόλωσης. Η προστατευτική τους δράση εξαρτάται από το πάχος τους, τις ιδιότητές τους όπως η αντοχή, η πρόσφυση, η διαπερατότητα κ.λ.π.

Η πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή εξόρυξης πετρελαίου καλείται να λειτουργήσει στατικά (ακίνητη) σε απομακρυσμένες υπεράκτιες περιοχές κάτω από ιδιαίτερες συνθήκες, αφού αυτή έρχεται συνεχώς αντιμέτωπη με ποικίλες απειλές, όπως έντονη βιολογική δραστηριότητα, θερμότητα, ύπαρξη διαβρωτικών ουσιών στα προϊόντα αργού πετρελαίου, υπεριώδη ακτινοβολία, αλατότητα, κυματισμούς και ποικίλες φορτίσεις. Για αυτό πρέπει οι επιστρώσεις που θα επιλεγθούν για την προστασία αυτών των ιδιαίτερων κατασκευών να επιτυγχάνουν προστασία από τη διάβρωση, πυροπροστασία, θερμομόνωση και να έχουν αντιρρυπαντικές ιδιότητες.

Οι υπεράκτιες εφαρμογές απαιτούν υψηλών προδιαγραφών προστατευτικές επιστρώσεις για τη διασφάλιση της βέλτιστης λειτουργίας, απόδοσης και ασφάλειας των κατασκευών αυτών. Η βιομηχανία χρωμάτων έχει αναπτύξει ειδικά συστήματα επιστρώσεων, κατά τη διάρκεια των ετών για την προστασία υπεράκτιων κατασκευών από τη διάβρωση, τα οποία καλούνται να προστατεύσουν τις κατασκευές αυτές από ποικίλα προβλήματα. Επιπλέον, η διάρκεια ζωής ενός συστήματος επικαλύψεων που προορίζεται για υπεράκτιες κατασκευές που δεν αναμένεται να δεξαμενίζεται μια φορά ανά πέντε έτη, επιλέγεται η μεγαλύτερη δυνατή (>15 χρόνων).

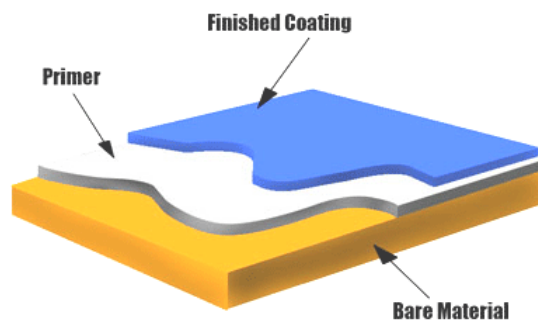
Προστατευτικές επικαλύψεις για υπεράκτιες πλωτές κατασκευές (χαρακτηριστικά γνωρίσματα).

■ Αντιδιαβρωτικές ιδιότητες

Τα αντιδιαβρωτικά χρώματα κατέχουν σήμερα δεσπόζουσα θέση στην προστασία υπεράκτιων κατασκευών. Αυτά είναι μη μεταλλικά επιστρώματα που κύριο στόχο έχουν την απομόνωση του μετάλλου από το περιβάλλον, τη μόνωση θερμική ή ηλεκτρική και την ελάττωση του δυναμικού ή ακόμα και την αντιστροφή του. Πέρα όμως από την προστασία από τη διάβρωση οι επικαλύψεις χρησιμοποιούνται και για αισθητικούς λόγους.

Τα αντιδιαβρωτικά χρώματα (οργανικές επικαλύψεις) ανάλογα με τη σύστασή τους και το περιβάλλον στο οποίο χρησιμοποιούνται έχουν ειδικές ιδιότητες, οι οποίες εκπληρώνουν έναν ή περισσότερους από τους παραπάνω στόχους για τους οποίους

προορίζονται. Υπάρχουν δύο ειδών επιστρώματα το αστάρι (priming system) που είναι ανόργανες ενώσεις και το κυρίως χρώμα που είναι συνήθως οργανικές ενώσεις (βλέπε σχήμα 4.5). Σκοπός του ασταριού είναι να παρέχει καλή πρόσφυση στα επιστρώματα που θα ακολουθήσουν και να συνεισφέρει στην προστασία από τη διάβρωση με ενεργά χημικά. Ενώ το κύριο επίστρωμα πρέπει να διαθέτει χρώμα, αδιαφάνεια, λάμψη, να είναι λείο, να παρουσιάζει χημική αντίσταση και να έχει αντιδιαβρωτική προστασία. Για να επιτευχθούν τα παραπάνω χαρακτηριστικά προστασίας και βαφής χρησιμοποιούνται συνήθως και τα δύο είδη επιστρώματος. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια εφαρμόζονται χρώματα που έχουν διαλυμένες ανόργανες ενώσεις (πιγμέντα) όπως το μίνιο και δεν απαιτούν σύμφωνα με τις οδηγίες των κατασκευαστών τη επίχριση ασταριού σε μια πρώτη φάση επικάλυψης.



Σχήμα 4.5: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος επικάλυψεων

■ Προστασία από τη βιολογική ρύπανση

Δεδομένου ότι η πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή εξόρυξης πετρελαίου λειτουργεί σε στατικές συνθήκες για όλη τη λειτουργική ζωής της, η βιολογική δραστηριότητα είναι έντονη. Η βιολογική ρύπανση των υφάλων όχι μόνο μειώνει τη διάρκεια ζωής, αλλά εμποδίζει επίσης την υποβρύχια επιθεώρηση και μειώνει το ωφέλιμο φορτίο της πλωτής μονάδας. Σε ορισμένες ακραίες περιπτώσεις, μπορεί να προκαλέσει ακόμα και τη διακοπή των εργασιών με τεράστιες οικονομικές απώλειες ημερησίως.

■ Πυροπροστασία

Η ασφάλεια θεωρείται πάντα η πρώτη προτεραιότητα για όλους τους τύπους των υπεράκτιων εγκαταστάσεων, συμπεριλαμβανομένης και της πλωτής ημιβυθισμένης εξέδρας εξόρυξης πετρελαίου. Η αποθήκευση ή η επεξεργασία των υδρογονανθράκων επί της υπεράκτιας κατασκευής, ενέχει υψηλό κίνδυνο πυρκαγιάς, έτσι μια αξιόπιστη παθητική πυροπροστασία είναι απαραίτητη. Η απόδοση και η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής είναι κρίσιμη. Όταν τεράστια ποσά επενδύονται στην υπεράκτια εξόρυξη και παραγωγή

πετρελαίου και φυσικού αερίου, η διασφάλιση της ακεραιότητας των κατασκευών αυτών αποτελεί μέγιστο θέμα.

■ Αντοχή σε μεγάλες διακυμάνσεις θερμοκρασίας

Μια πλωτή μονάδα παραγωγής και εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου αποτελείται από σύστημα σωληνώσεων και βαλβίδες που λειτουργούν σε ακραίες θερμοκρασίες. Για παράδειγμα, ενώ κάποιες σωληνώσεις και βαλβίδες λειτουργούν σε θερμοκρασία 600°C, στην περίπτωση φυσικού αερίου στους -190°C. Αυτό αποτελεί μια σοβαρή πρόκληση για τις επικαλύψεις στην προστασία της ακεραιότητας και ορθής λειτουργίας της υπεράκτιας κατασκευής.

Στον παρακάτω πίνακα 4.2 παρατίθενται εφαρμοζόμενες επικαλύψεις για υπεράκτιες πλωτές κατασκευές.

Πίνακας 4.2: Εφαρμοζόμενες επικαλύψεις εξωτερικών ζωνών υπεράκτιων πλωτών κατασκευών^[14]

Ζώνες	ISO Class	Ρυθμός διάβρωσης (mm/year)	Τύπος Επικαλύψεων	Σύστημα Επικαλύψεων	Πρότυπα	Σχόλια
Ατμοσφαιρική ζώνη	C5-M	80 ~ 200 μm (3 ~ 8 mils)	Zn-rich primer, epoxies and UV durable topcoat	Min. 320 μm (13 mils) in Min. 3 coats		
Ζώνη ψεκασμού		200~500 μm (8~20 mils)	Epoxy polyester	Min. 600 μm (24 mils) σε Min. 3 coats		
Ζώνη βύθισης	(Im2)	100~200 μm (4 ~ 8 mils)	Epoxy	Min. 450 μm (18 mils) σε Min. 2 coats	NACF TM0204 – Exterior Protective Coatings for Seawater Immersion Services NACF TM0104 – Offshore Platform Ballast Water Coating Evaluation	Οι επικαλύψεις να είναι συμβατές με το σύστημα καθοδικής προστασίας

Ανάλογα με τις στρώσεις διακρίνονται οι κάτωθι κατηγορίες χρωμάτων:

Category I: One layer of epoxy paint coating, min. 20 μm nominal DFT (Μία στρώση εποξικής βαφής).

Category II: One or more layers of marine paint coating (epoxy, polyurethane or vinyl based), total nominal DFT min. 250 μm (Μία ή περισσότερες στρώσεις).

Category III: Two or more layers of marine paint coating (epoxy, polyurethane or vinyl based), total nominal DFT min. 350 μm (Δύο ή περισσότερες στρώσεις).

Τα επιστρώματα διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

Μεταλλικά Επιστρώματα:

- Περισσότερο ευγενή
- Λιγότερο ευγενή

Μη Μεταλλικά Ανόργανα Επιστρώματα:

- Οξειδία
- Φωσφορικά
- Χρωμικά
- Εμαγιέ
- Τσιμεντοκονία

Οργανικά Επιστρώματα:

- Χρώματα
- Βερνίκια
- Λάκες

4.6 Η πλωτή ημιβυθισμένη εξέδρα εξόρυξης υδρογονανθράκων (semi- submersible rig) που εξετάζεται^{126), 127)}

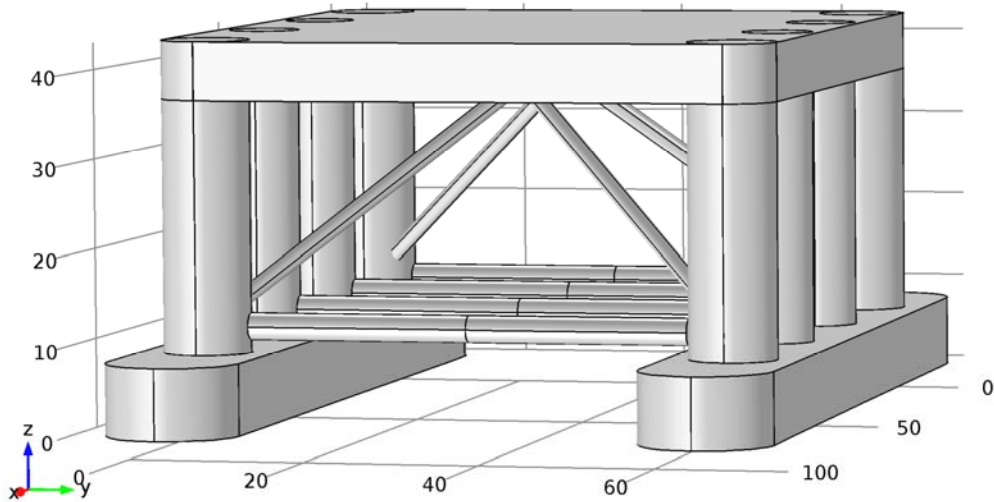
Στη σημερινή εποχή ο τύπος της πλωτής ημιβυθισμένης κατασκευής (semi-submersible rig) αποτελεί την ευσταθέστερη λύση συγκριτικά με άλλες πλωτές εξέδρες και τις περισσότερες φορές επιλέγεται για ακραίες συνθήκες λειτουργίας, λόγω της ικανότητάς της να ανταπεξέρχεται σε πολύ επικίνδυνες φορτίσεις. Είναι ιδιαίτερα δημοφιλής για υπεράκτια εξόρυξη σε μεγάλα βάθη, από όπου και της αποδόθηκε χαρακτηριστικά ο ορισμός, υπεράκτια κινητή μονάδα εξόρυξης πετρελαίου mobile offshore drilling unit (MODU), αν και μερικές φορές αναφέρεται ως “column-stabilized vessel”.

Τα χαρακτηριστικά που την κάνουν να ξεχωρίζει είναι ο συνδυασμός κατανομής βάρους -εκτοπίσματος, η διαπερατότητα των κυμάτων στο κύτος της, λόγω του σχήματος και το μεγάλο βύθισμα που επιτρέπει στα κύματα να περνούν μέσα από τη μονάδα με την ελάχιστη ενέργεια προκαλώντας ανάλογες μεταβολές (μικρές) στις έξι γενικευμένες κινήσεις της πλωτής κατασκευής, sway, surge, heave, roll, pitch, yaw. Με το κατάστρωμα να βρίσκεται πάνω από τις κορυφές των κυμάτων και όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν, αυτός ο σχεδιασμός αποτελεί μια πολύ ενδιαφέρουσα λύση σε περίπτωση έντονων περιβαλλοντικών συνθηκών. Ο προσδιορισμός του ελάχιστου απαιτούμενου κενού αέρος “air gap” (κάτω από το κατάστρωμα) της πλωτής ημιβυθισμένης κατασκευής σε ακραίες συνθήκες, αποτελεί σημαντική παράμετρο σχεδιασμού των κατασκευών αυτών. Για την αποφυγή κρουστικών φορτίσεων (impact load) κάτω από το κατάστρωμα, λόγω κυματισμού ή ισοδύναμα αποφυγή εμφάνισης ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας (κορυφής κύματος) κάτω από το κατάστρωμα με τιμή μεγαλύτερη από το “air gap”.

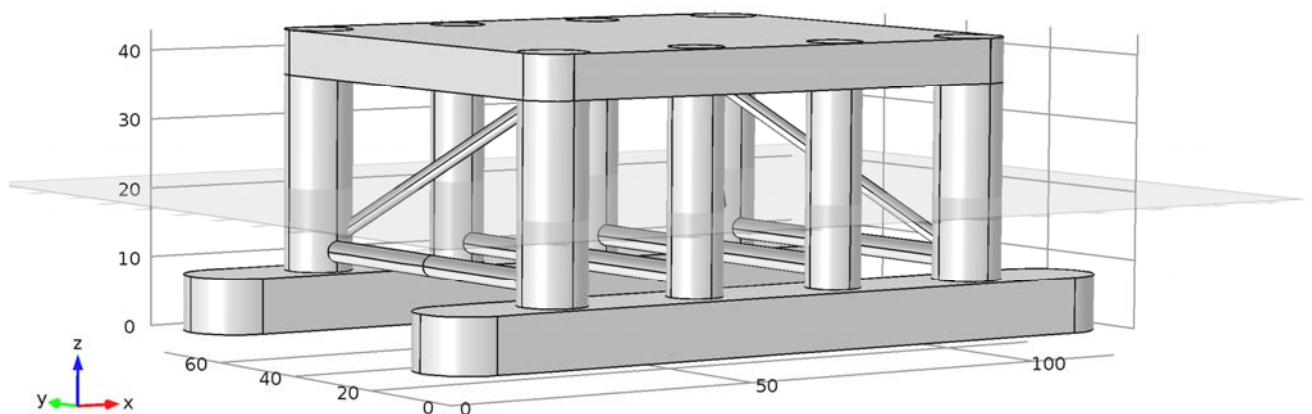
Η πλωτή κατασκευή που μελετήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία προήλθε από το Εργαστήριο Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης. Παρατίθενται τα αντίστοιχα επιστημονικά άρθρα:

1. A Comparison of Methods for Calculating The Motion of a Semi-Submersible, Matao Takagi and Shin-Ichi Arai, Seiji Takezawa, Kunio Tanaka, Naonosuke Takarada, Ocean Engng, Vol. 12, No.1, pp. 45-97,1985
2. Motion Analysis of a Semi-Submersible Platform, David W. Taylor, Young S. Hong, Naval Ship Research and Development Center, 1984.

Η πλωτή κατασκευή ανήκει στην κατηγορία της πλωτής ημιβυθισμένης κατασκευής εξόρυξης πετρελαίου (semi - submersible rig) και αποτελεί ένα πολύ επιτυχημένο μοντέλο, μια κλασική πλωτή πλατφόρμα εξόρυξης πετρελαίου της δεκαετίας του 90, πολύ διαδεδομένη και δημοφιλής (σχήμα 4.6 και σχήμα 4.7). Αποτελείται από οκτώ κυλίνδρους, δύο ποντόνια και ένα κατάστρωμα λειτουργίας.



Σχήμα 4.6: Η πλωτή ημιβυθισμένη πλατφόρμα εξόρυξης πετρελαίου (μέσω λογισμικού πακέτου *comsol Multiphysics® 4.3b*)



Σχήμα 4.7: Η πλωτή ημιβυθισμένη πλατφόρμα εξόρυξης πετρελαίου στο *operating design draft* (μέσω λογισμικού πακέτου *comsol Multiphysics® 4.3b*)

Η πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή εξόρυξης υδρογονανθράκων προς μελέτη θεωρείται από τις μεγαλύτερες της κατηγορίας της και έχει ολικό μήκος 115m, πλάτος 75m και βύθισμα σχεδίασης 20.030 m. Οι κύριες διαστάσεις της πλωτής ημιβυθισμένης πλατφόρμας εξόρυξης πετρελαίου (semi-submersible rig), προς μελέτη δίνονται παρακάτω (βλέπε πίνακα 4.3).

Πίνακας 4.3: Κύριες διαστάσεις κατασκευής

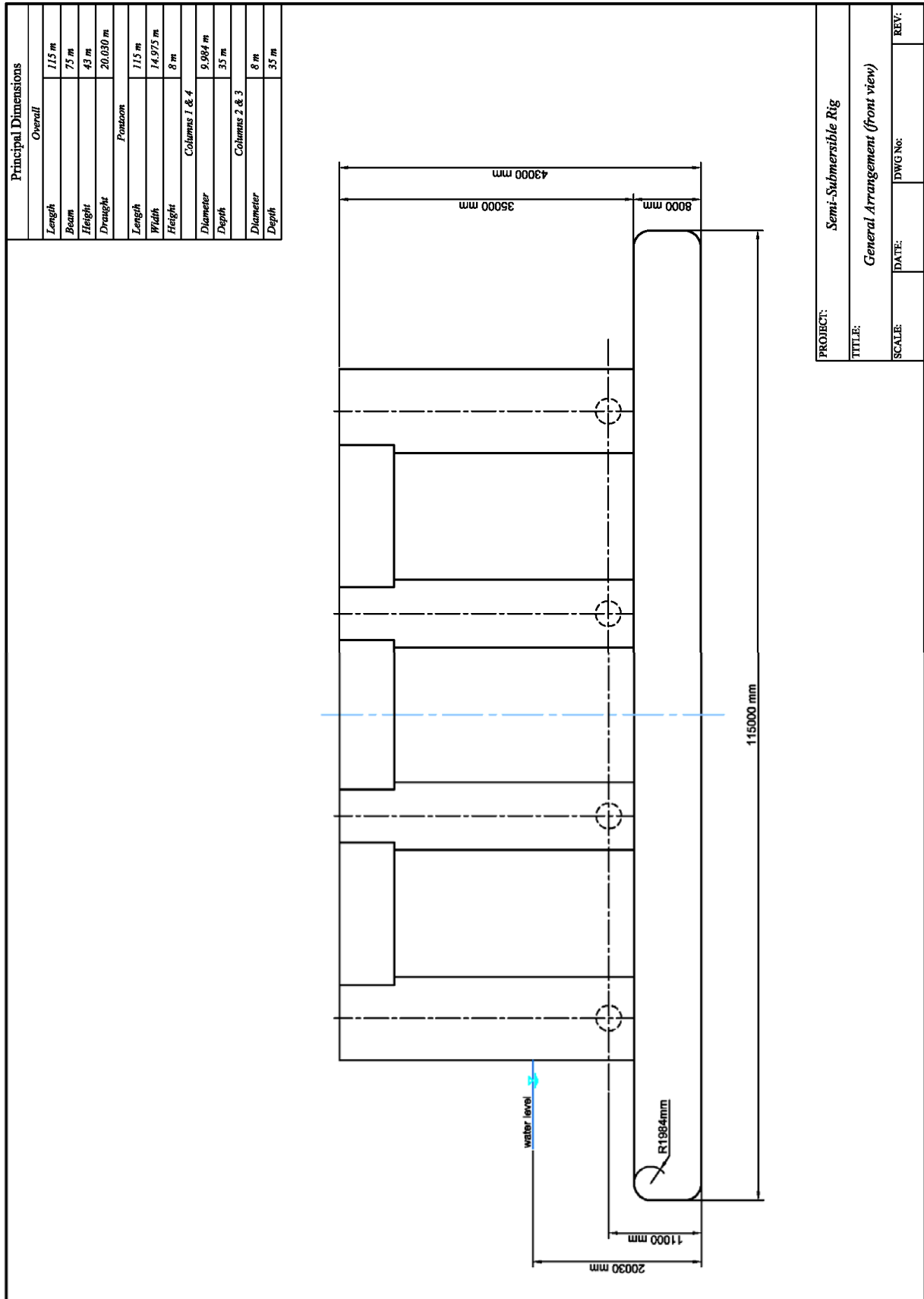
Κύριες Διαστάσεις (Main Particulars):	
Ολικό Μήκος (Length Overall):	115 m
Πλάτος (Beam Overall):	75 m
Μήκος Ποντονιών (Length of pontoons):	115 m
Πλάτος Ποντονιών (Beam of pontoons):	14.975 m
Ύψος Ποντονιών (Height of pontoons):	8 m
Ύψος μέχρι το Κατάστρωμα (Height to Upper Deck):	43 m
Βύθισμα Σχεδίασης (Design Draught):	20.030 m

Για το σχεδιασμό της καθοδικής προστασίας για τη δεδομένη κατασκευή κάποια επιπλέον στοιχεία είναι απαραίτητα. Στη συνέχεια παρατίθενται τα δεδομένα της πλωτής ημιβυθισμένης κατασκευής εξόρυξης πετρελαίου (semi-submersible rig), απαραίτητα για τη μελέτη καθοδικής προστασίας, (πίνακας 4.4).

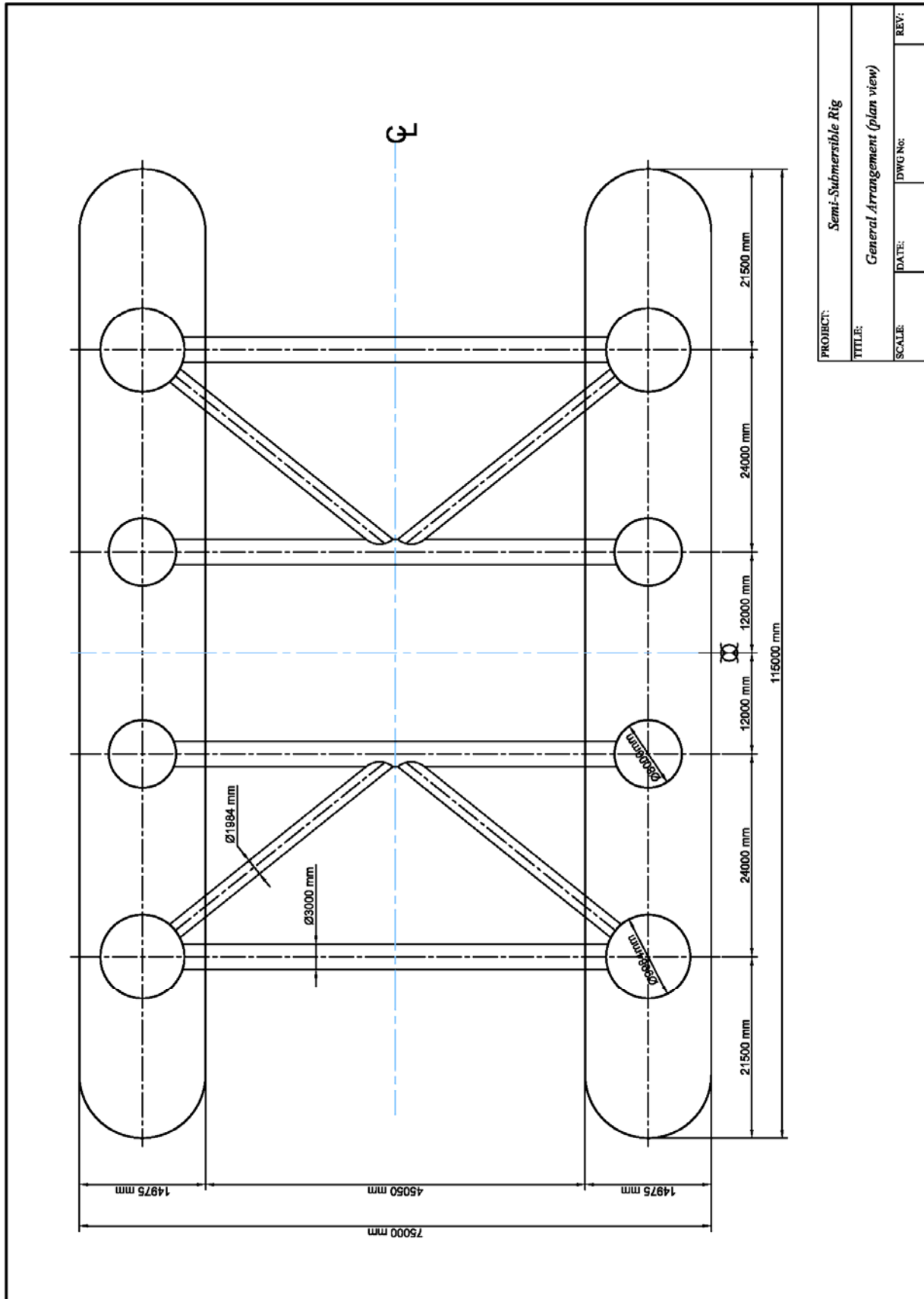
Πίνακας 4.4: Στοιχεία της κατασκευής για τη μελέτη καθοδικής προστασίας

Στοιχεία Πλοίου (Vessel's Data)	
Τύπος Κατασκευής (Type of Construction):	Νέα Κατασκευή (New building)
Τύπος Τρυπανιού (Rig Type):	Semi Submersible, Column Stabilized Drilling Unit
Διάρκεια Ζωής (Design Life):	40 χρόνια (40 years)
Προορισμός (Destination):	North Sea Southern, Africa, Brazil, China, India, Mediterranean
Επικαλύψεις βυθισμένης μεταλλικής επιφάνειας (Hull Coating submerged surface area):	3 Coats of Abrasion Resistant Epoxy plus anti-fouling coating
Συντελεστής αστοχίας επικαλύψεων (Coating Breakdown Factor):	50% bare or 55% bare
Πυκνότητα Ρεύματος Σχεδίασης (Design Current Density) [A/m ²]	0.150 (bare steel)

Στη συνέχεια παρατίθεται το σχέδιο γενικής διάταξης της πλωτής ημιβυθισμένης πλατφόρμας σχεδιασμένο μέσω του σχεδιαστικού λογισμικού πακέτου AutoCAD® της εταιρείας AUTODESK (σχήμα 4.8, σχήμα 4.9, σχήμα 4.10).



Σχήμα 4.8: Σχέδιο γενικής διάταξης (πρόοψη) πλωτής ημιβυθισμένης πλατφόρμας εξόρυξης πετρελαίου



Σχήμα 4.10: Σχέδιο γενικής διάταξης (κάτοψη) πλωτής ημιβυθισμένης πλατφόρμας εξόρυξης πετρελαίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΘΟΔΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΠΛΩΤΗΣ ΗΜΙΒΥΘΙΣΜΕΝΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

5.1 Γενικά ^{[9],[10],[11],[12]}

Για το υπολογιστικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας τόσο για την εσωτερική (δεξαμενές) όσο και για την εξωτερική (γάστρα, ύφαλα) καθοδική προστασία, εφαρμόστηκαν οι κάτωθι κανονισμοί των νηογνώμωνων:

- *Rules and Regulations for the Classification of Mobile Offshore Units, Corrosion Control, Lloyd's Register, June 2013*
- *Rules for Classification and Construction VI Additional Rules and Guidelines, Corrosion Protection, Guidelines for Corrosion Protection and Coating Systems, GL, Edition 2010*
- *Corrosion Protection of Steel Offshore Units and Installations, Bureau Veritas, May 2006*
- *DNV-RP-B401, Cathodic Protection Design, Det Norske Veritas, April 2011.*

Σύμφωνα με τους ανωτέρω κανονισμούς για τον τύπο της πλωτής κατασκευής που μελετάται, η βυθισμένη ζώνη (submersed zone) πρέπει να προστατεύεται από εγκεκριμένο μέσο καθοδικής προστασίας, χρησιμοποιώντας είτε θυσιαζόμενες ανόδους, είτε σύστημα επιβαλλόμενου ρεύματος. Υψηλής αντίστασης επιστρώσεις απαιτείται να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με ένα σύστημα καθοδικής προστασίας για την ίδια ζώνη (βυθισμένη). Στις υπόλοιπες ζώνες (δηλαδή στη ζώνη παλίρροιας, στη ζώνη ψεκασμού και στην ατμοσφαιρική ζώνη), απαιτούνται μόνο υψηλής αντίστασης επιστρώσεις (βλέπε πίνακα 5.1). Επίσης η μόνη μέθοδος καθοδικής προστασίας που ενδείκνυται για τις δεξαμενές πλοίων και υπεράκτιων κατασκευών είναι με την τεχνική των θυσιαζόμενων ανόδων, σύμφωνα με τους ίδιους κανονισμούς. Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι οι υπολογισμοί των επιφανειών κάτω από το νερό υπολογίστηκαν βάση του βυθίσματος “maximum design operating draught” κατά τον κανονισμό “Rules and Regulations for the Classification of Mobile Offshore Units, Corrosion Control, Lloyd's Register, June 2013”.

Πίνακας 5.1: Ελάχιστες απαιτήσεις προστασίας από διάβρωση των εξωτερικών μεταλλικών επιφανειών, Lloyd's Register, Corrosion Control, Rules and Regulations for the Classification of Mobile Offshore Units ^[9]

Τύπος μονάδας (Unit type)	Η αντιδιαβρωτική προστασία που απαιτείται και περιοχή (Corrosion protection required and area)		
	Ζώνη (Zone)	Μεταλλική κατασκευή (Structural steelwork)	Μέθοδος προστασίας που απαιτείται (Method of protection required)
Column-stabilised units	Submerged zone	Columns, lower hulls and bracings	Cathodic protection and coatings See Notes 1 and 4
	Boot topping and splash zones See Note 2	Columns, lower hulls and bracings	Coatings
	Atmospheric zone	All structure above the splash zone	Coatings only
Self-elevating units	Transit condition: Submerged, boot topping and splash zones	Main hull	Coatings only
	Elevated condition: Submerged zone	Legs, footings and mats	Cathodic protection and coatings See Note 4
	Boot topping and splash zones See Note 3	Legs	Coatings
	Atmospheric zone	All structure above the splash zone	Coatings only
Surface type units	Submerged zone	Main hull	Cathodic protection or coatings See Note 1
	Boot topping and splash zones	Main hull	Coatings
	Atmospheric zone	All structure above the splash zone	Coatings only

Σημειώσεις (Notes)

1. Για την ανάθεση επιθεωρήσεων OIWS μέσα στο νερό, απαιτούνται τόσο καθοδική προστασία όσο και βαφές υψηλής αντοχής για την προστασία από τη διάβρωση.
2. Για μονάδες column-stabilised units η ζώνη παλίρροιας (boot topping zone), πρέπει να λαμβάνεται ως το τμήμα εκείνο της εξωτερικής κατασκευής ανάμεσα στο μέγιστο βύθισμα σχεδίασης (λειτουργίας) και στο βύθισμα διέλευσης.
3. Για μονάδες self-elevating, σε υπερυψωμένη θέση, η ζώνη παλίρροιας (boot topping zone), πρέπει να εκτείνεται μεταξύ των χαμηλότερων και των υψηλότερων ατμοσφαιρικών παλίρροιών στη θέση λειτουργίας.
4. Εάν σημειογραφία OIWS δεν έχει εκχωρηθεί, τότε οι επικαλύψεις μπορούν να παραλειφθούν, εκτός από τη ζώνη παλίρροιας (boot topping zone), βλέπε τη σημείωση 2.

Όπου:

OIWS: In-Water Survey, επιθεώρηση μέσα στο νερό (εννοεί επιθεώρηση χωρίς να δεξαμενιστεί).

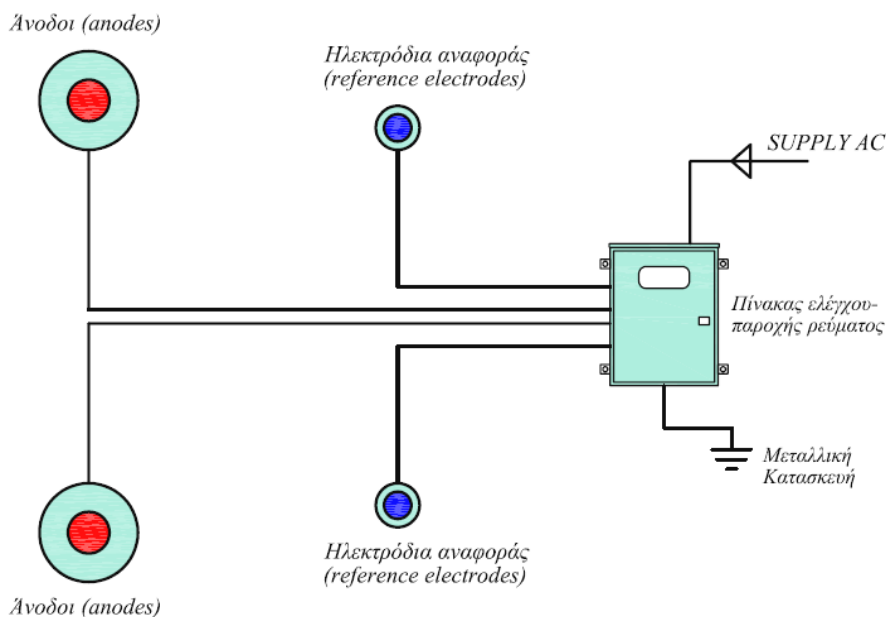
“The Classification Committee will accept In-Water Surveys in lieu of Docking Surveys on units assigned an OIWS”

Η μέθοδος καθοδικής προστασίας μέσω θυσιαζόμενων ανόδων για την προστασία της εξωτερικής επιφάνειας της γάστρας δεν ενδείκνυται για το μέγεθος της επιφάνειας των βρεχάμενων της δεδομένης πλωτής κατασκευής (που είναι μεγάλη) και αυτό γιατί τα απαιτούμενα τεμάχια ανόδων προκύπτουν πολυάριθμα, πολύ μεγάλα, βαριά, απαιτούν τη χρήση ανυψωτικών μέσων και όλα αυτά συνηγορούν στη δύσκολη, ασύμφορη και πολύ χρονοβόρα εγκατάστασή τους. Μια επιπλέον δυσκολία είναι ότι η αντικατάστασή τους γίνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα με τη βοήθεια δυτών, αφού οι ημιβυθισμένες πλωτές κατασκευές δεν αναμένεται να δεξαμενίζονται τακτικά. Έτσι η αντικατάστασή τους κρίνεται ιδιαίτερα δύσκολη και άκρως ασύμφορη, ενώ επιπλέον απαιτούνται πολλές εργατοώρες, ανυψωτικά μέσα αφού το κάθε τεμάχιο θυσιαζόμενης ανόδου μπορεί να φθάνει σε βάρος τα 300kg.

Όμως στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μελέτη καθοδικής προστασίας των εξωτερικών επιφανειών και με τη μέθοδο θυσιαζόμενων ανόδων, ώστε να γίνει αντιληπτό γιατί απορρίπτεται ως πρόταση. Η μόνη κατάλληλη εφαρμοζόμενη μέθοδος για εσωτερική καθοδική προστασία για τις δεξαμενές της υπεράκτιας εξέδρας που μελετάται είναι μέσω θυσιαζόμενων ανόδων.

5.2 Εξωτερική καθοδική προστασία με τη μέθοδο επιβαλλόμενου ρεύματος (ICCP) *[9],[10],[11],[12]*

Ένα σύστημα καθοδικής προστασίας ICCP αποτελεί μια εξελιγμένη μέθοδο ελέγχου της διάβρωσης μιας υπεράκτιας κατασκευής και είναι γνωστό για την ευελιξία, την αποτελεσματικότητα, το συνεχές έλεγχο, τη μεγαλύτερη διάρκεια λειτουργίας από ότι οι θυσιαζόμενες άνοδοι (δεν υπάρχει ανάγκη αντικατάστασης), την υψηλή δυνατότητα προστασίας, τη διαρκή παρακολούθηση και αυτόματη ρύθμιση του συστήματος προστασίας. Σε αντίθεση με τα περισσότερα συστήματα, τα εξαρτήματα ενός συστήματος καθοδικής προστασίας ICCP μπορούν να αντικατασταθούν, ενώ το υπεράκτιο σκάφος επιπλέει, με τη χρήση δυτών. Για την προστασία μεγάλων επιφανειών θεωρείται η πλέον οικονομική λύση συγκριτικά με τις θυσιαζόμενες ανόδους, που το κόστος εγκατάστασης και αγοράς των πολυάριθμων τεμαχίων κρίνεται ασύμφορο. Ένα πλήρες σύστημα αποτελείται από μονάδες που συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους, ώστε να σχηματιστεί ένα κλειστό κύκλωμα με τη εξωτερική μεταλλική κατασκευή με στόχο τη διατήρηση ενός επιλεγμένου σταθερού επιπέδου προστασίας. Ο συνδυασμός οδηγεί σε ένα εξελιγμένο ηλεκτρικό σύστημα (βλέπε σχήμα 5.1), το οποίο εκτελεί ποικίλες λειτουργίες και αποτελείται από τα παρακάτω τμήματα:



Σχήμα 5.1: Διάταξη ενός πλήρους συστήματος ICCP

- **Ηλεκτρόδια αναφοράς (reference electrodes)**

Μετρούν τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των ιδίων και της γάστρας, η οποία σχετίζεται άμεσα με την ποσότητα της προστασίας που παρέχεται στη μεταλλική επιφάνεια.

- **Πίνακας ελέγχου – Μονάδα ισχύος (Controller /power supply)**

Συγκρίνει τη διαφορά δυναμικού που παράγεται από το ηλεκτρόδιο αναφοράς με μια προκαθορισμένη τιμή. Η εξαγόμενη τιμή στη συνέχεια ρυθμίζεται αυτόματα για να διατηρηθεί η τάση του ηλεκτροδίου ίση με την προκαθορισμένη. Το τροφοδοτικό, σε απόκριση του σήματος από τον ελεγκτή, ρυθμίζει την ποσότητα εναλλασσόμενου ρεύματος της πλωτής υπεράκτιας κατασκευής στον ανορθωτή και το μετατρέπει σε συνεχές ρεύμα το οποίο επιβάλλεται στην άνοδο.

- **Άνοδοι (anodes)**

Τοποθετούνται πάνω στην εξωτερική επιφάνεια της πλωτής υπεράκτιας κατασκευής σε ειδικά μονωμένο και στεγανό κουτί (Cofferdam). Το συνεχές ρεύμα τροφοδοτείται μέσω της ανόδου στη μεταλλική εξωτερική επιφάνεια της κατασκευής δημιουργώντας έτσι ηλεκτρικό κύκλωμα.

- **Καταγραφικό (datalogger)**

Είναι ένα έξυπνο σύστημα IP Logger, το οποίο δύο φορές την ημέρα καταγράφει εγγραφές του συστήματος ICCP σε υπολογιστή της πλωτής υπεράκτιας κατασκευής για αποστολή e-mail, ακόμα και στο γραφείο του ιδιοκτήτη.

5.2.1 Υπολογιστικό μέρος^{[9],[10],[11],[12]}

Η απαίτηση σε ρεύμα εξαρτάται από τη μορφή και το μέγεθος της επιφάνειας της θαλάσσιας κατασκευής που βρίσκεται βυθισμένη στο νερό, την κατάσταση των επικαλύψεων, τη θερμοκρασία, το pH, την αγωγιμότητα του θαλασσινού νερού, την ταχύτητα και το βύθισμα του πλωτού μέσου. Βασικά, καθώς το ρεύμα αυξάνεται, ο ρυθμός διάβρωσης μειώνεται σημαντικά, μέχρι να επιτευχθεί ένα προστατευτικό επίπεδο πόλωσης (δυναμικού). Αύξηση του ρεύματος πέρα από αυτή την τιμή δεν προσφέρει κανένα πρόσθετο όφελος, αντίθετα μπορεί να προκαλέσει μεγάλες ζημιές στις επικαλύψεις.

Η πυκνότητα ρεύματος που απαιτείται για την εξωτερική προστασία της βυθισμένης ζώνης πλωτών υπεράκτιων μονάδων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως τη θερμοκρασία του νερού, την περιεκτικότητα οξυγόνου, την αντίσταση του νερού, τα αιωρούμενα στερεά, τα ρεύματα και γενικότερα τη βιολογική δραστηριότητα στην περιοχή. Πιο αναλυτικά, οι ακόλουθες τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν την επιλογή της κατάλληλης πυκνότητας του ρεύματος προστασίας κατά το σχεδιασμό του συστήματος καθοδικής προστασίας:

- *Η θερμοκρασία της θάλασσας*
- *Η περιεκτικότητα σε οξυγόνο της θάλασσας*
- *Η ταχύτητα του νερού*
- *Η χημική σύσταση της θάλασσας*
- *Η αντίσταση της θάλασσας*
- *Το pH του θαλασσινού νερού*
- *Το βάθος του νερού*
- *Η σύνθεση του βυθού*
- *Πιθανή βιολογική δραστηριότητα*
- *Συνθήκες διάβρωσης*

Η επιλογή της πυκνότητας του ρεύματος προστασίας δεν είναι απλή υπόθεση, αφού πληθώρα δεδομένων πρέπει να συνυπολογιστούν και επιπλέον πρέπει να βασίζεται στην υπάρχουσα εμπειρία σε παρόμοιες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Υπολογισμός της κατάλληλης πυκνότητας του ρεύματος.

Η πυκνότητα ρεύματος προστασίας που απαιτείται δεν είναι σταθερή με το χρόνο. Για μεταλλικές κατασκευές χωρίς επικαλύψεις (bare steel) η αρχική πυκνότητα ρεύματος σχεδιασμού πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής πόλωση μέσα σε εύλογο χρονικό διάστημα, παραδείγματος χάριν ένα ή δύο μήνες μετά η αναγκαία πυκνότητα ρεύματος μπορεί να μειωθεί λόγω του σχηματισμού ασβεστολιθικών αποθέσεων που προκαλούνται από το καθοδικό ρεύμα. Ο σχεδιασμός για την πυκνότητα ρεύματος επαναπόλωσης πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε να παρέχει προστασία κατά τη διάρκεια των περιόδων καταιγίδας και μετά από μεγάλες εργασίες αφαίρεσης θαλάσσιων οργανισμών που αναπτύσσονται που και τα δύο προκαλούν μια από πόλωση της κατασκευής (βλέπε πίνακα 5.2).

Το σύστημα καθοδικής προστασίας πρέπει να συνδυάζεται με ένα κατάλληλο σύστημα επικαλύψεων, το οποίο μειώνει την απαιτούμενη πυκνότητα ρεύματος και βελτιώνει την κατανομή του ρεύματος. Επιπλέον, η αναγκαία πυκνότητα ρεύματος μιας επικαλυμμένης μεταλλικής επιφάνειας αυξάνεται με το χρόνο καθώς δυσχεραίνεται η επικάλυψη. Προκειμένου να συνυπολογιστεί η πιθανή μηχανική φθορά και γήρανση, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς ποσοστά αστοχίας.

Για τον υπολογισμό του συνολικού απαιτούμενου ρεύματος προστασίας για την πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή αρκεί να υπολογιστεί η συνολική επιφάνεια της κατασκευής που είναι βυθισμένη (δηλαδή κάτω από το νερό), καθώς και την κατάλληλη πυκνότητα του ρεύματος (βλέπε πίνακα 5.2, έως πίνακα 5.5). Η βυθισμένη ζώνη (submersed zone) του τύπου της πλωτής κατασκευής που μελετάται πρέπει να προστατεύεται από εγκεκριμένο μέσο της καθοδικής προστασίας, χρησιμοποιώντας θυσιαζόμενες ανόδους ή σύστημα επιβαλλόμενου ρεύματος, εκτός από όπου σημειώνεται διαφορετικά στον προηγούμενο πίνακα. Υψηλής αντίστασης επιστρώσεις απαιτείται να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με ένα σύστημα καθοδικής προστασίας για την ίδια ζώνη.

Πίνακας 5.2: Προτεινόμενες ελάχιστες πυκνότητες ρεύματος καθοδικής προστασίας του χάλυβα χωρίς επικαλύψεις κινητών κατασκευών (Recommended minimum current densities for cathodic protection of bare steel of mobile structures), Bureau Veritas Information Note NI 423^[11]

Κατάσταση (Situation)	Τυπικές περιπτώσεις (Typical cases)	Πυκνότητα ρεύματος (Current density) (mA/m ²)
Immersed Low relative speed $0,5 < v < 1,5$ m/s	Offshore floating structures, buoys of any kind, harbour floating installations with influence of tidal currents	150
Immersed Medium relative speed $1,5 < v < 3,0$ m/s	Utility boats	250
Immersed High relative speed $v > 3,0$ m/s	Moving ships	500 & above

Πίνακας 5.3: Προτεινόμενες αρχικές και τελικές πυκνότητες ρεύματος (A/m^2) καθοδικής προστασίας του χάλυβα χωρίς επικαλύψεις στο θαλασσινό νερό, συναρτήσει του βάθους και του κλίματος της περιοχής βασισμένο στη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού (Recommended initial and final design current densities (A/m^2) for seawater exposed bare metal surfaces, as a function of depth and 'climatic region' based on surface water temperature), DNV-RP-B401^[12]

Βάθος (Depth) (m)	Τροπική (Tropical) (> 20 °C)		Υπο-Τροπική (Sub-Tropical) (12- 20 °C)		Εύκρατη (Temperate) (7-11 °C)		Αρκτική (Arctic) (< 7 °C)	
	αρχική	τελική	αρχική	τελική	αρχική	τελική	αρχική	τελική
0-30	0.150	0.100	0.170	0.110	0.200	0.130	0.250	0.170
>30-100	0.120	0.080	0.140	0.090	0.170	0.110	0.200	0.130
>100-300	0.140	0.090	0.160	0.110	0.190	0.140	0.220	0.170
>300	0.180	0.130	0.200	0.150	0.220	0.170	0.220	0.170

Πίνακας 5.4: Προτεινόμενες μέσες πυκνότητες ρεύματος (A/m^2) καθοδικής προστασίας του χάλυβα χωρίς επικαλύψεις στο θαλασσινό νερό, συναρτήσει του βάθους και του κλίματος της περιοχής βασισμένο στη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού (Recommended mean design current densities (A/m^2) for seawater exposed bare metal surfaces, as a function of depth and 'climatic region' based on surface water temperature, DNV-RP-B401^[12]

Βάθος (Depth) (m)	Τροπική (Tropical) (> 20 °C)	Υπο-Τροπική (Sub-Tropical) (12- 20 °C)	Εύκρατη (Temperate) (7-12 °C)	Αρκτική (Arctic) (< 7 °C)
0-30	0.070	0.080	0.100	0.120
>30-100	0.060	0.070	0.080	0.100
>100-300	0.070	0.080	0.090	0.110
>300	0.090	0.100	0.110	0.110

Πίνακας 5.5: Πυκνότητες ρεύματος προστασίας για λόγους μελέτης (Current density values for design purposes), Lloyd's Register, Corrosion Control, Rules and Regulations for the Classification of Mobile Offshore Units^[9]

Τοποθεσία (Location)	Πυκνότητα ρεύματος (Current density) mA/m^2
Cook inlet	400
North Sea (Northern) Above 62°N	130
North Sea (Northern) 55°N to 62°N	120
US (West Coast)	100
North Sea (Southern)	90
Africa	90
Brazil	90
China	90
India	90
Mediterranean	90
Australia (Western)	80
Gulf	80
Gulf of Mexico	80
Mud–Most locations	20
Drainage per well	5A

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

1. Οι τιμές πυκνότητας ρεύματος προορίζονται για καθοδήγηση στο σχεδιασμό συστημάτων θυσιαζόμενων ανόδων, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους που περιγράφονται σε αυτό το κεφάλαιο. Ωστόσο, άλλες τιμές μπορεί να γίνονται αποδεκτές, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει επαρκής αιτιολόγηση.
2. Για συστήματα καθοδικής προστασίας επιβαλλόμενου ρεύματος, οι πυκνότητες ρεύματος υψηλότερες από τις τιμές που αναγράφονται στον πίνακα μπορεί να είναι αναγκαίες, αλλά αυτό θα εξαρτηθεί από τον τύπο και τη θέση των ανόδων.

Οι τιμές της πυκνότητας ρεύματος που δίνονται στον προηγούμενο πίνακα (πίνακας 5.5) είναι γενικές για λόγους κατατοπιστικούς, διότι οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς βασίζονται στις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή εγκατάστασης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές αυτές μπορεί να είναι αισθητά διαφορετικές από τις τιμές που έχουν πράγματι μετρηθεί στην εκάστοτε περιοχή. Όταν χρησιμοποιούνται κατάλληλες επικαλύψεις υψηλής αντοχής, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται πυκνότητες ρεύματος χαμηλότερες από εκείνες που δίνονται στον πίνακα. Οι επικαλύψεις δεν μένουν ανέπαφες με το χρόνο και υπάρχει πιθανότητα να υποστούν μηχανικές βλάβες. Για να ληφθεί αυτό υπόψη στο στάδιο του σχεδιασμού, κατάλληλοι συντελεστές αστοχίας της επικάλυψης (coating breakdown factors) πρέπει να εφαρμόζονται και αυτές πρέπει να βασίζονται σε συγκεκριμένα ποσοστά (βλέπε πίνακα 5.6 και πίνακα 5.7). Όπως για παράδειγμα σε εποξικές βαφές πάχους φιλμ 250-500 microns, ένας αρχικός συντελεστής αστοχίας της επικάλυψης από ένα έως δύο τοις εκατό για τη βυθισμένη ζώνη και ένα ρυθμό υποβάθμισης από ένα έως τρία τοις εκατό ετησίως πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

Πίνακας 5.6: Οδηγίες για το συντελεστή αστοχίας λεπτού φιλμ επικαλύψεων (γενικά), *Guidance on thin film coating breakdown (general)*, Bureau Veritas Information Note NI 423^[11]

Διάρκεια ζωής (έτη) Lifetime (years)	K : Συντελεστής αστοχίας επικαλύψεων (Coating breakdown)		
	Αρχικός	Μέσος	Τελικός
10	0.05	0.1	0.2
20	0.05	0.15	0.35
30	0.05	0.2	0.5
40	0.05	0.25	0.65
50	0.05	0.3	0.8

Πίνακας 5.7: Συνιστώμενες σταθερές *a* και *b* για τον υπολογισμό των συντελεστών αστοχίας των επικαλύψεων (*Recommended constants a and b for calculation of paint coating breakdown factors*), DNV-RP-B401^[12]

Βάθος (Depth) <i>m</i>	Προτεινόμενες τιμές <i>a</i> και <i>b</i> για κατηγορίες επικάλυψης I, II και III (Recommended <i>a</i> and <i>b</i> values for Coating Categories I, II and III)		
	I (<i>a</i> = 0.10)	II (<i>a</i> = 0.05)	III (<i>a</i> = 0.02)
0-30	<i>b</i> = 0.10	<i>b</i> = 0.025	<i>b</i> = 0.012
>30	<i>b</i> = 0.05	<i>b</i> = 0.015	<i>b</i> = 0.008

Με βάση τα προηγούμενα βρισκόμαστε στην κατηγορία πλωτής κατασκευής τύπου Column-stabilised unit, Coated, κατηγορία επικαλύψεων Coating Category III, ζώνη τροπική ('Tropical' > 20 °C) και βάθος 0-30 m. Η περιοχή δραστηριοποίησης είναι Νότια Βόρεια Θάλασσα, Αφρική, Βραζιλία, Κίνα, Ινδία, Μεσόγειος (North Sea Southern, Africa, Brazil, China, India, Mediterranean) και δεν αναμένεται να δεξαμενίζεται τακτικά (Survey notation OIWS).

1η περίπτωση κατά τον κανονισμό DNV-RP-B401, Cathodic Protection Design, Det Norske Veritas

Για τον υπολογισμό της κατάλληλης πυκνότητας του ρεύματος προστασίας ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία σύμφωνα με το νηογνώμονα Det Norske Veritas.

Ο συντελεστής αστοχίας των επικαλύψεων (coating breakdown factor f_c) είναι μια συνάρτηση των ιδιοτήτων των επικαλύψεων, λειτουργικών παραμέτρων και του χρόνου. Ως απλή μαθηματική προσέγγιση, ο f_c μπορεί να εκφραστεί από την εξίσωση:

$$f_c = a + b \cdot t \quad (1)$$

Όπου:

t χρόνια , δηλαδή η ηλικία των επικαλύψεων

Τα a και b είναι σταθερές που εξαρτώνται από τις ιδιότητες των επικαλύψεων και το περιβάλλον, (βλέπε πίνακα 5.7).

$$f_c = 0.02 + 0.012 \cdot 40 = 0.5$$

Για να υπολογίσουμε το απαιτούμενο ρεύμα προστασίας I_c (Amps), ώστε να παρέχεται επαρκής καθοδική προστασία καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της κατασκευής, οι επιφάνειες A_c (m²) πολλαπλασιάζονται με την πυκνότητα του ρεύματος σχεδίασης i_c (A/m²) και με το συντελεστή αστοχίας coating breakdown factor f_c , ως εξής:

$$I_c = A_c \cdot i_c \cdot f_c \quad (2)$$

Από (1) και (2) βρίσκουμε 50% Bare steel

$$50\% \times 150 \text{ mA/m}^2 = \underline{\underline{75 \text{ mA/m}^2}}$$

2^η περίπτωση κατά τον κανονισμό Bureau Veritas Information Note NI 423, Corrosion Protection of Steel Offshore Units and Installations

Για τον υπολογισμό της κατάλληλης πυκνότητας του ρεύματος προστασίας ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία σύμφωνα με το νηογνώμονα Bureau Veritas.

Το απαιτούμενο ρεύμα προστασίας I_c προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της επιφάνειας του χάλυβα S που πρέπει προστατευτεί με τη συγκεκριμένη πυκνότητα ρεύματος του χάλυβα χωρίς επικαλύψεις i_c , διορθωμένο με την παρέμβαση του συντελεστή αστοχίας coating breakdown factor K , σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$I_c = S \cdot i_c \cdot K$$

Κανονικά θα έπρεπε να υπολογιστεί όπως και στον προηγούμενο κανονισμό αλλά ο αντίστοιχος κανονισμός του Γαλλικού νηογνώμονα, δίνει τιμές για το συντελεστή coating breakdown factor K δυσμενέστερες από την πραγματική κατάσταση, που είναι κατηγορία επικαλύψεων Coating Category III.

Για αυτό ακριβώς το λόγο προσεγγίσαμε το συντελεστή αστοχιών των επικαλύψεων διορθωτικά.

$$5\% \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} 1.25 \% \times 40 \text{ χρόνια} = 55\% \text{ Bare steel} \Rightarrow 55\% \times (150) = \underline{\underline{82.5 \text{ mA/m}^2}}$$

Η μικρή διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων είναι απόρροια των ιδιοτήτων των επικαλύψεων, περιβαλλοντικών και λειτουργικών παραμέτρων, επιλέγουμε ως κατάλληλη πυκνότητα ρεύματος για την κατηγορία της κατασκευής μας, τη χρονική διάρκεια σχεδιασμού και τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες λειτουργίας:

$$\underline{\underline{82.5 \text{ mA/m}^2}}$$

Αρχικά υπολογίζεται η επιφάνεια βρεχάμενων της πλωτής ημιβυθισμένης κατασκευής (half section).

Design Base

<i>Wetted Surface Area Port Side</i>		
1	<i>Pontoon Wetted Surface Area Port Side:</i>	5325 m ²
2	<i>Columns Wetted Surface Area Port Side:</i>	1358,7 m ²
3	<i>Bracing Wetted Surface Area Port Side:</i>	1461,6 m ²
Total:		8145,3 m ²
<i>Total Wetted Surface Area Stbd Side</i>		
1	<i>Pontoon Wetted Surface Area Stbd Side:</i>	5325 m ²
2	<i>Columns Wetted Surface Area Stbd Side:</i>	1358,7 m ²
3	<i>Bracing Wetted Surface Area Stbd Side:</i>	1461,6 m ²
Total:		8145,3 m ²
<i>Total Wetted Surface Area</i>		
1	8145,3 x 2	16290,6 m ²
2	<i>Various Surface Area (some outfitting, ladders, piping etc)</i>	255 m ²
Total:		16545,6 m ²

Η συνολική απαίτηση σε ρεύμα είναι:

<i>Total System Required</i>			
<i>Hull</i>	:	16545,6 m ² x 82.5 mA/m ²	1365,0 Amps

Πολλαπλασιάζοντας την κατάλληλη πυκνότητα του ρεύματος (82,5 mA/m²) με τη συνολική επιφάνεια της κατασκευής κάτω από το νερό προκύπτει η συνολική απαίτηση σε ρεύμα. Οπότε από τους υπολογισμούς που προηγήθηκαν, το απαιτούμενο ρεύμα προστασίας για την πλωτή ημιβυθισμένη πλατφόρμα εξόρυξης πετρελαίου, αναφορικά με το εμβαδόν της βυθισμένης επιφάνειας μέσα στο νερό, των συντελεστών αστοχίας και το χρονικό διάστημα των 40 χρόνων (design life), προέκυψε 1365 Amps.

5.2.2 Προτεινόμενο σύστημα καθοδικής προστασίας ICCP (Τεχνική προδιαγραφή)¹³¹

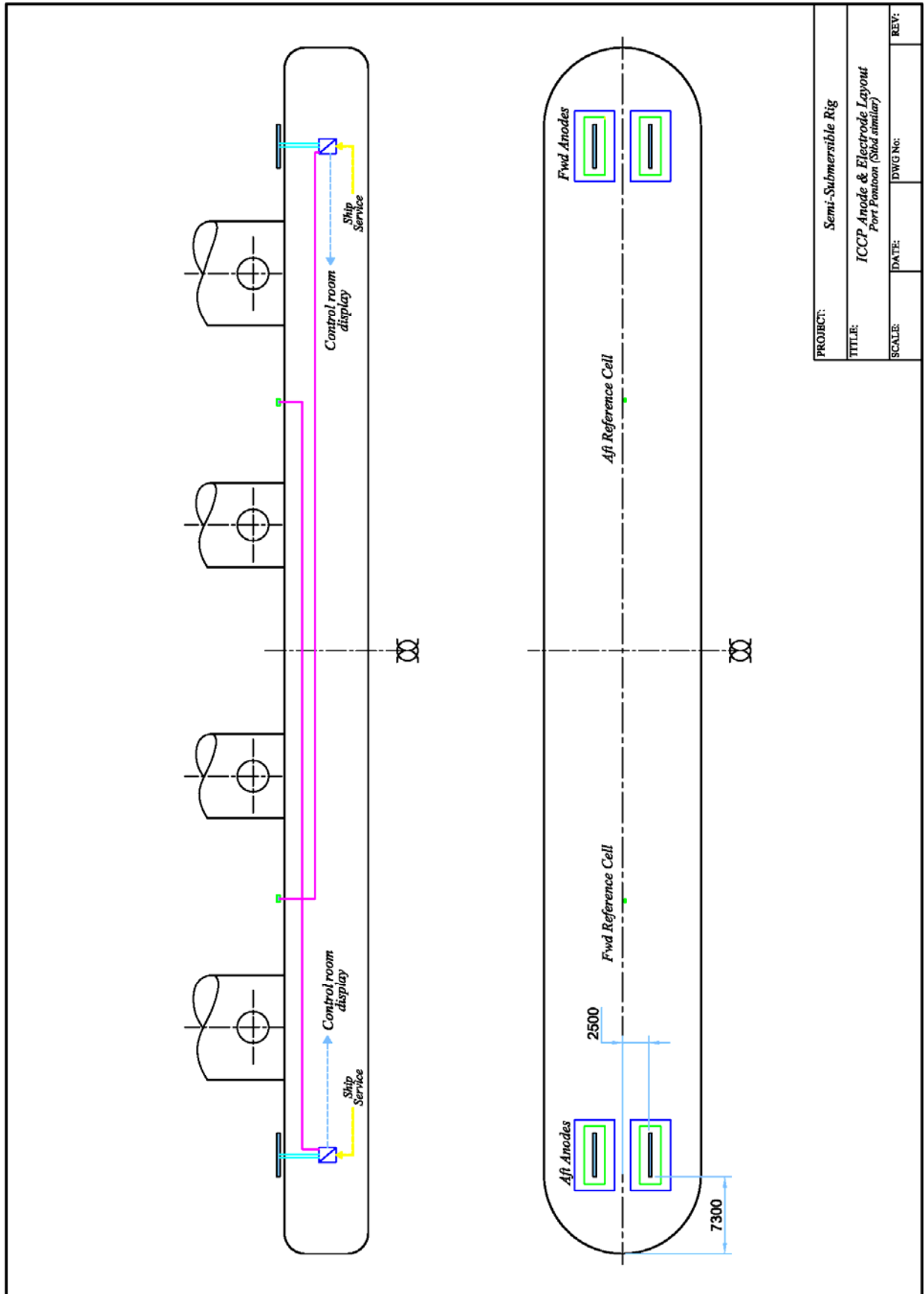
Λαμβάνοντας υπόψη την τιμή του απαιτούμενου συνολικού ρεύματος προστασίας που υπολογίστηκε προηγουμένως, ανατρέχοντας στο τεχνικό εγχειρίδιο της εταιρείας Wilson Walton International με τα υπάρχοντα εμπορεύσιμα μεγέθη των εξαρτημάτων για τη σύνθεση ενός ολοκληρωμένου συστήματος ICCP και επιλέγονται αυτά που ταιριάζουν (βλέπε πίνακα 5.8). Δεδομένου του συμμετρικού σχήματος της πλωτής ημιβυθισμένης πλατφόρμας το σύστημα ICCP θα αποτελείται από δύο όμοια υποσυστήματα ένα για τη δεξιά και ένα για την αριστερή πλευρά. Κάθε ποντόνι θα διαθέτει δύο μονάδες παροχής ισχύος τέσσερις ανόδους και δύο ηλεκτρόδια αναφοράς όπως φαίνονται στο σχήμα, συνοδευόμενα από τα αναγκαία εξαρτήματα και την καλωδίωση τους.

<i>Total Provided System</i>			
1	1 Completed ICCP System (Port Side)	700	Amps
2	1 Completed ICCP System (Stbd Side)	700	Amps
Total:		1400	Amps

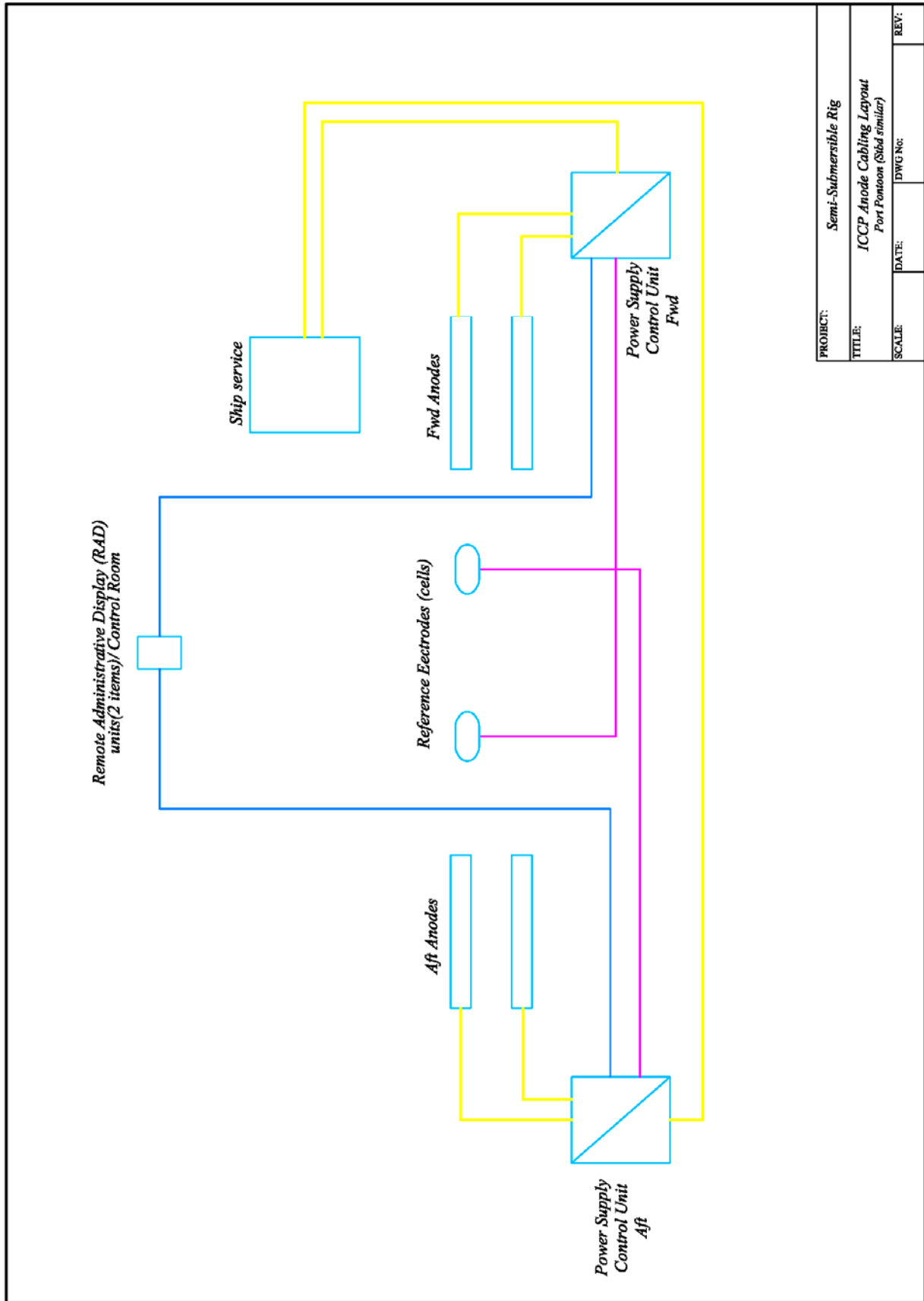
Πίνακας 5.8: Πίνακας των εξαρτημάτων του συστήματος ICCP

	<i>System Description</i>	<i>Qty</i>	<i>Remarks</i>
1	Power Supply units Aquamatic III ■ Wilson Walton International	4	1 Aft, 1Fwd, PS-STBD
2	Remote Administrative Display units Aquamatic III ■ Wilson Walton International	2	Control Room
3	Lead/Silver alloy thru hull anodes (175 Amp) ■ Wilson Walton International	8	2 Aft, 2 Fwd, PS-STBD
4	Light-purity zinc reference electrodes (cells), complete with 1m cable tail, installation kit ■ Wilson Walton International	4	(with 1 Aft, 1Fwd, PS-STBD
5	Cofferdams and cable glands	16	

Στη συνέχεια παρατίθενται τα απαραίτητα σχέδια του συστήματος ICCP, σχεδιασμένα μέσω του σχεδιαστικού λογισμικού πακέτου AutoCAD® της εταιρείας AUTODESK (βλέπε σχήμα 5.2 και σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.2: Διατακτικό σχέδιο εξαρτημάτων του συστήματος ICCP



Σχήμα 5.3: Διαγραμματικό σχέδιο καλωδίωσης του συστήματος ICCP

5.2.3 Ανάλυση των προτεινόμενων εξαρτημάτων του συστήματος ICCP^[31]

- **Μονάδες επεξεργασίας και παροχής ισχύος (Power supply units) της εταιρείας Wilson Walton International**

Επιλέγουμε να τοποθετήσουμε εντός των ποντονιών τέσσερις μονάδες ισχύος, μία μπροστά, μία πίσω, δεξιά και αριστερά. Η κάθε μία θα τροφοδοτεί τις δύο ανόδους του συστήματος ICCP με ηλεκτρικό ρεύμα.

Προδιαγραφή (Specification)

- ❖ Πηγή ισχύος (Power Source) : AC220 1P ή AC440 1P/3P ή AC690V 3P ή σύμφωνα με την απαίτηση του πελάτη
- ❖ Δυναμικότητα του ανορθωτή (Capacity of Rectifier) : 100 ~ 800 Amp, 12 ~ 24VDC
- ❖ Αριθμός ανόδων για κάθε μονάδα ισχύος (Anode number per PSu): 18 ea Max
- ❖ Αριθμός ηλεκτροδίων αναφοράς για κάθε μονάδα ισχύος (Reference electrode number per PSu) : 6 ea Max.
- ❖ Βαθμός στεγανότητας (IP grade) : IP23 ή IP44

- **Οθόνη απομακρυσμένης διαχείρισης (Remote administrative display unit) της εταιρείας Wilson Walton International**

Θα τοποθετηθούν επίσης δύο οθόνες απομακρυσμένης διαχείρισης με μεγάλο μέγεθος οθόνης LCD, οι οποίες επιτρέπουν στους μηχανικούς του πλοίου να ελέγχουν εύκολα όλες τις τιμές, χωρίς κύλιση της οθόνης. Επιπλέον παρέχει τη δυνατότητα, να μπορούν να βρίσκουν εύκολα τις θέσεις των ανόδων και των ηλεκτροδίων αναφοράς.

Πιο αναλυτικά:

- ❖ Ένδειξη του δυναμικού της γάστρας για κάθε ηλεκτρόδιο αναφοράς
- ❖ Ένδειξη του ρεύματος εξόδου σε κάθε άνοδο
- ❖ Ένδειξη συνολικού ρεύματος εξόδου για κάθε μονάδα ελέγχου ισχύος
- ❖ Ένδειξη της θερμοκρασίας για κάθε μονάδα ελέγχου ισχύος
- ❖ Ένδειξη σε περίπτωση συναγερμού σε κάθε μονάδα ελέγχου ισχύος:
Υπερπροστασία, υποπροστασία, υψηλό ρεύμα, υψηλή θερμοκρασία., διακοπή ρεύματος
- ❖ Ειδοποίηση σε περίπτωση συναγερμού
- ❖ Τα δεδομένα του συστήματος ICCP μεταφέρονται στο γενικό σύστημα συναγερμού του πλοίου.

○ **Άνοδοι (anodes) του συστήματος ICCP της εταιρείας Wilson Walton International**

Επιλέγεται να τοποθετηθούν οκτώ κατάλληλες άνοδοι ICCP πάνω στα ποντόνια της πλωτής ημιβυθισμένης πλατφόρμας, δύο μπροστά, δύο πίσω, δεξιά και αριστερά. Οι δύο άνοδοι του συστήματος ICCP (175Amps η κάθε μία) τροφοδοτούνται με ηλεκτρικό ρεύμα από τη μία μονάδα ισχύος κάθε φορά.

Πιο αναλυτικά:

Άνοδοι μολύβδου αργύρου (Lead silver anode) της εταιρείας Wilson Walton International

Τύπος: Γραμμικός (Linear)

Μοντέλο: SA820LM 175 Amps

○ **Ηλεκτρόδια αναφοράς (reference electrodes) του συστήματος ICCP της εταιρείας Wilson Walton International**

Επιλέγεται να τοποθετηθούν τέσσερα ηλεκτρόδια αναφοράς ICCP πάνω στα ποντόνια της πλωτής ημιβυθισμένης πλατφόρμας, ένα μπροστά, ένα πίσω, δεξιά και αριστερά. Τα ηλεκτρόδια αναφοράς στέλνουν σήμα στις μονάδες ισχύος.

Πιο αναλυτικά:

Ηλεκτρόδια αναφοράς (cells) χαμηλής καθαρότητας ψευδαργύρου της εταιρείας Wilson Walton International

Τύπος: Ηλεκτρόδιο αναφοράς (παραδοσιακού τύπου)

Μοντέλο: CR50E Καθαρός Ψευδάργυρος



μονάδα ισχύος/ελέγχου



άνοδος



ηλεκτρόδιο αναφοράς



Οθόνη απομακρυσμένης διαχείρισης

Σχήμα 5.4: Σχηματική απεικόνιση των εξαρτημάτων του συστήματος ICCP της εταιρείας Wilson Walton International ^[31]

5.3 Εξωτερική καθοδική προστασία με τη μέθοδο των θυσιαζόμενων ανόδων για την προστασία της βρεχόμενης επιφάνειας της δεδομένης κατασκευής^{[9],[10],[11],[12]}

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μέθοδος καθοδικής προστασίας μέσω θυσιαζόμενων ανόδων για προστασία της γάστρας (βρεχάμενα) δεν ενδείκνυται για το μέγεθος της επιφάνειας της δεδομένης πλωτής κατασκευής, αλλά στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μελέτη για καθοδική προστασία των εξωτερικών επιφανειών και με τη μέθοδο θυσιαζόμενων ανόδων, ώστε να γίνει αντιληπτό γιατί απορρίπτεται ως πρόταση. Αντίθετα σε μικρότερες ημιβυθισμένες πλωτές κατασκευές εξόρυξης πετρελαίου, αποτελεί την πλέον δημοφιλή πρόταση καθοδικής προστασίας των εξωτερικών επιφανειών που βρίσκονται στο νερό.

Ο αριθμός και ο τύπος των θυσιαζόμενων ανόδων που απαιτούνται για την προστασία της εξωτερικής γάστρας μιας θαλάσσιας κατασκευής υπολογίζονται κυρίως λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος, τη γεωμετρία, την κατηγορία επικαλύψεων και το διάστημα δεξαμενισμού.

Για την εξωτερική καθοδική προστασία της πλωτής ημιβυθισμένης κατασκευής επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε θυσιαζόμενες ανόδους αλουμινίου για την προστασία γάστρας της εταιρείας Skarpenord Corrosion AS. Οι λόγοι επιλογής ανόδων αλουμινίου έναντι ψευδαργύρου, που θα μπορούσαμε επίσης να έχουμε επιλέξει δίνονται αναλυτικά παρακάτω.

Λόγοι επιλογής ανόδων αλουμινίου έναντι ψευδαργύρου:

Οι άνοδοι αλουμινίου είναι γενικά μια πιο αποδοτική και οικονομική λύση από τις ανόδους ψευδαργύρου.

○ Καλύτερη κατανομή ρεύματος

Η τάση των ανόδων αλουμινίου είναι υψηλότερη από του ψευδαργύρου, με αποτέλεσμα την καλύτερη κατανομή ρεύματος προστασίας των ανόδων αλουμινίου.

○ Λιγότερο βάρος

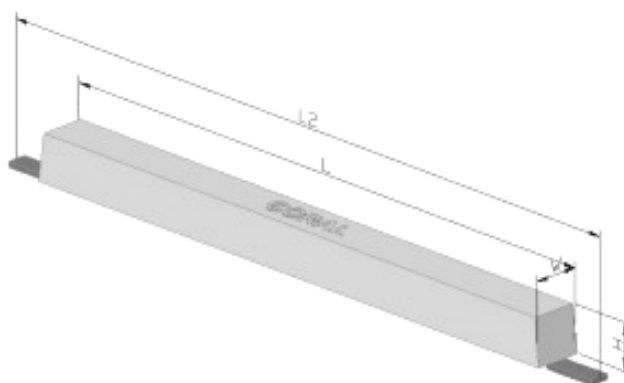
Η δυναμικότητα του αργιλίου (2.650 Ah/kg) είναι περίπου 3,5 φορές μεγαλύτερη από τον ψευδάργυρο (780Ah/kg). Ως εκ τούτου, το συνολικό απαιτούμενο βάρος ανόδων αλουμινίου είναι πολύ λιγότερο συγκριτικά με τις ανόδους ψευδαργύρου.

○ Πιο προσιτές

Χρησιμοποιώντας ανόδους αλουμινίου συνεπάγεται σημαντικά χαμηλότερο κόστος υλικού σε σύγκριση με ανόδους ψευδαργύρου.

5.3.1 Προτεινόμενες θυσιαζόμενες άνοδοι αλουμινίου (*Aluminium anodes*) για την προστασία της βρεχόμενης μεταλλικής επιφάνειας^[34]

Οι θυσιαζόμενες άνοδοι αλουμινίου για την προστασία της εξωτερικής επιφάνειας της εταιρείας Skarpenord Corrosion AS που επιλέχθηκαν είναι επίπεδες τύπου long flush mounted anode για στήριξη πάνω στη γάστρα (σχήμα 5.5). Κατασκευάζονται είτε με τρύπες για να βιδωθούν στα εξωτερικά ελάσματα της γάστρας είτε χωρίς τρύπες για συγκόλληση.



Σχήμα 5.5: Σχηματική απεικόνιση θυσιαζόμενων ανόδων της εξωτερικής μεταλλικής επιφάνειας CORAL® A-type της εταιρείας Skarpenord Corrosion AS^[34]

Τα τυπικά μεγέθη των διαθέσιμων ανόδων φαίνονται παρακάτω (πίνακας 5.9). Μπορούν επίσης να κατασκευαστούν και να είναι διαθέσιμα και άλλα είδη ή μεγέθη.

Πίνακας 5.9: Κατάλογος θυσιαζόμενων ανόδων της εξωτερικής μεταλλικής επιφάνειας CORAL® A-type της εταιρείας Skarpenord Corrosion AS

Type	Dimension (mm)				Insert (mm)	Weight (kg)	
	L	L2	H	W		Gross	Net
CORAL® A-5	140	180	20	70	15x2	0.45	0.4
CORAL® A-6	100	150	38	65	20x3	0.6	0.55
CORAL® A-10	210	255	27	80	20x3	1.0	0.8
CORAL® A-12-1	150	190	52	60	20x5	1.2	1.0
CORAL® A-15	150	250	38	100	20x3	1.5	1.3
CORAL® A-15A	215	300	30	95	25x5	1.5	1.2
CORAL® A-24	125	175	50	125	40x5	2.4	2.1
CORAL® A-25	305	365	40	102	25x5	2.5	2.1
CORAL® A-33	190	250	84	90	30x5	3.3	3.0
CORAL® A-43	85	160	130	150	40x6	4.3	4.0
CORAL® A-50	445	505	40	125	30x6	5.0	4.3
CORAL® A-54	230	290	92	100	30x5	5.4	5.0
CORAL® A-80	640	700	43	125	40x6	8.0	7.0
CORAL® A-116	800	880	50	125	40x6	11.6	10.0
CORAL® A-130	890	960	47	125	40x6	13.0	11.2

CORAL [®] A-132-1	340	400	122	130	30x5	12.7	12.0
CORAL [®] A-168	555	615	70	155	50x10	16.8	14.4
CORAL [®] A-180	1210	1290	47	125	40x6	18.0	15.5
CORAL [®] A-211	470	530	130	130	50x10	21.1	19.0
CORAL [®] A-220	1100	1180	85	105	40x6	22.0	19.8
CORAL [®] A-388	740	900	112	170	50x10	38.8	35.2
CORAL [®] A-350	1250	1460	95	95	40x12	35.0	29.6
CORAL [®] A-450	1610	1820	95	95	40x12	45.0	38.2
CORAL [®] A-550	1480	1690	110	110	50x12	55.2	47.3
CORAL [®] A-650	1750	1960	110	110	50x12	65.1	55.9
CORAL [®] A-750	2020	2230	110	110	50x12	75.0	64.5
CORAL [®] A-850	1950	2160	120	120	50x12	84.9	74.7
CORAL [®] A-950	2190	2400	120	120	50x12	95.2	83.9
CORAL [®] A-1050	1940	2150	135	135	50x12	105.1	95.0
CORAL [®] A-1150	2130	2340	135	135	50x12	115.3	104.3
CORAL [®] A-1250	2000	2210	145	145	60x12	125.3	112.8
CORAL [®] A-1350	2160	2370	145	145	60x12	135.2	121.8
CORAL [®] A-1450	2180	2390	150	150	60x12	145.4	131.9
CORAL [®] A-1550	2330	2540	150	150	60x12	155.3	141.0
CORAL [®] A-1650	2480	2690	150	150	60x12	165.3	150.1
CORAL [®] A-1750	2630	2840	150	150	60x12	175.2	159.2

Επιλεγμένος τύπος ανόδου για τη δεδομένη κατασκευή: CORAL[®] A-1750 AL. Θεωρητικά είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε τύπος ανόδου από τον προηγούμενο πίνακα, αλλά εξαιτίας της υψηλής απαίτησης σε ρεύμα προστασίας πρέπει να επιλεχθούν οι μεγαλύτεροι δυνατοί, ώστε ο απαιτούμενος αριθμός θυσιαζόμενων ανόδων να μην είναι τεράστιος, άρα και αποτρεπτικός στη χρήση.

Εγχειρίδιο θυσιαζόμενων ανόδων αλουμινίου CORAL[®] A Special Grade

Ο συγκεκριμένος τύπος ανόδου ανήκει σε μια ειδική κατηγορία κράματος ανόδου (υψηλής ποιότητας), η χημική σύσταση του οποίου προτιμάται από τις μεγαλύτερες εταιρείες εξόρυξης πετρελαίου, ακόμη και για περιπτώσεις πολύ μεγάλου βάθους νερού. Ο τύπος αυτός του κράματος είναι εγκεκριμένος από το Νορβηγικό Νηογνώμονα Det Norske Veritas.

Τεχνική προδιαγραφή (Technical Specification)

Στοιχεία κράματος (Alloying elements):	Zn	4.75 - 5.5 %
	In	0.016 - 0.020%
	Al	Balance
Άλλα στοιχεία (Other elements):	Si	0.08 - 0.12 %
	Cu	max. 0.0030 %
	Fe	max. 0.06 %
	Cd	max. 0.0020 %
Άλλα (Others):	Each	max. 0.02 %
Άλλα (Others):	Total	max. 0.050

Τεχνική συμπεριφορά ανόδου (Anode Performance Data ambient sea water)

Δυναμικότητα (Capacity):	2585 Ah/kg (1173 Ah/lb)
Ρυθμός κατανάλωσης (Consumption rate):	3.39 kg/Ayr (7.47 lbs/Ayr)
Δυναμικό κλειστού κυκλώματος (Closed circuit potential):	-1.09 volts (Ag/AgCl)
Ειδικό βάρος (Specific gravity):	2.78 kg/dm ³ (0.101 lbs/cu.in)

5.3.2 Υπολογιστικό μέρος θυσιαζόμενων ανόδων της εξωτερικής μεταλλικής επιφάνειας
[9],[10],[11],[12]

Το εξαγόμενο ρεύμα της κάθε ανόδου I_a είναι ουσιαστικά η διαφορά δυναμικού μεταξύ του υλικού της ανόδου και του χάλυβα της κατασκευής που πολώνεται σε επίπεδα προστασίας από την αντίσταση της ανόδου στον ηλεκτρολύτη. Αυτό εκφράζεται ως εξής:

$$I_a = \frac{\Delta V}{R_a}$$

Όπου:

I_a = Το εξαγόμενο ρεύμα ανόδου [Amperes]
(Current output of anode)

ΔV = Η διαφορά δυναμικού μεταξύ του υλικού της ανόδου και του χάλυβα προς προστασία [Volts]
(Driving potential, i.e., the difference between the potential of the anode and the protected steel potential)

R_a = Αντίσταση της ανόδου στον ηλεκτρολύτη [Ohms]
(Anodic resistance)

Υψηλότερα εξαγόμενα αποτελέσματα από τις ανόδους έχουμε όταν η εγκάρσια τομή της ανόδου είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με το μήκος της. Το δυναμικό του πολωμένου χάλυβα θα πρέπει να ληφθεί -0,8 volt (Ag / AgCl / ηλεκτρόδιο αναφοράς, σε θαλασσινό νερό), αν και μια πιο αρνητική τιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περιβάλλοντα όπου υπάρχει έντονη έκθεση σε θείο – αναγωγικά βακτήρια.

$$\Delta V = |(-1.09) - (-0.8)| = 0.29V$$

Υπολογισμός αντίστασης R_a μιας ανόδου, με μικρή διατομή σε σχέση με το μήκος της κατηγορίας *Long flush mounted anode* μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή του ακόλουθου τύπου:

$$\circ R_a = \frac{\rho}{2S}$$

Όπου:

ρ = Ειδική αντίσταση του θαλασσινού νερού [*ohm.cm*]
(Resistivity of sea-water)

S = Αριθμητικός μέσος όρος του μήκους και του πλάτους ανόδου [*cm*]
(Arithmetic mean of anode length and width)

L = Μήκος ανόδου [*cm*]
(Length of anode)

$$S = \frac{L+W}{2} = \frac{263+15}{2} = 139 \text{ cm}$$

$$R_a = \frac{\rho}{2S} = \frac{25}{278} = 0.0899 \text{ ohm}$$

$$I_a = \frac{0.29}{0.0899} = 3.226 \text{ Amps}$$

Η συνολική απαίτηση σε ρεύμα είναι:

$$\circ I_r = \frac{A I}{1000}$$

I_r = Απαιτούμενο ρεύμα [*Amperes*]
(Current required)

A = Εμβαδόν της μεταλλικής κατασκευής [*m²*]
(Area of steelwork)

I = Η πυκνότητα του ρεύματος [*mA / m²*]
(Current density)

$$\Delta\eta\lambda\alpha\delta\eta \quad \text{Current (Amps)} = \frac{\text{Area (m}^2\text{)} \times \text{current density (mA/m}^2\text{)}}{1000}$$

$$I_r = \frac{16545.6 \times 82.5}{1000} = 1365 \text{ Amps}$$

Ο αριθμός και ο τύπος των ανόδων που έχει επιλεγεί πρέπει να ικανοποιεί τόσο το συνολικό ρεύμα όσο και τη συνολική απαίτηση βάρους.

$$\text{Number of anodes} = \frac{\text{Current required (Total)}}{\text{Individual anode current output (Amps)}}$$

$$\text{Number of anodes} = \frac{\text{Weight required (Total)}}{\text{Individual anode net weight (kg)}}$$

Πιο αναλυτικά, ο αριθμός των ανόδων N που απαιτείται θα πρέπει να ικανοποιεί και τα δύο ακόλουθα χαρακτηριστικά:

$$\circ N = \frac{I_r}{I_a}$$

$$\circ N = \frac{W_r}{W_a}$$

Όπου:

I_r = Απαιτούμενο ρεύμα [Amperes]

I_a = Το εξαγόμενο ρεύμα ανόδου [Amperes]

W_r = Καθαρό βάρος του υλικού της ανόδου [kg]

W_a = Καθαρό βάρος της κάθε ανόδου [kg]

Το συνολικό βάρος του υλικού ανόδου υπολογίζεται ως εξής:

$$W_r = \frac{I_r \times Y \times 8760}{C \times U}$$

Όπου:

Y = Η διάρκεια ζωής της κατασκευής ή τα διαστήματα δεξαμενισμού σε έτη (Life of structure or appropriate dry-docking interval in years).

C = Πρακτική ηλεκτροχημική χωρητικότητα κράματος σε Ah /kg (Practical electrochemical capacity of the alloy).

U = Συντελεστής κατανάλωσης (*Utilisation factor*), δηλαδή το ποσοστό του καθαρού βάρους που έχει καταναλωθεί στο τέλος του κύκλου ζωής της ανόδου.

Συντελεστής κατανάλωσης:

- Για λεπτές ανόδους από απόσταση (*long slender stand off anodes*): 0,95
- Για πλατιές ανόδους από απόσταση (*short slender stand off anodes*): 0,90
- Για ανόδους μακριές προσαρτημένες πάνω στην κατασκευή (*long flush mounted anode*): 0,85
- Για ανόδους “bracelet” και άλλων σχημάτων (*bracelet anodes and others shapes*): 0,80

8760 = Ο αριθμός ωρών μέσα σε ένα χρόνο

$$W_r = \frac{1365 \times 40 \times 8760}{2585 \times 0.85} = 217679 \text{ kg}$$

$$N = \frac{W_r}{W_a} = \frac{217679}{159.2} = 1367$$

$$N = \frac{I_r}{I_a} \frac{1365}{3.226} = 423$$

Παρατηρούμε ότι οι δύο προηγούμενοι τύποι διαφοροποιούνται πολύ ως προς τα εξαγόμενα αποτελέσματα, αυτό συμβαίνει διότι ο τύπος του καθαρού βάρους του υλικού ανόδων W_r συμπεριλαμβάνει 40 χρόνια διάρκεια ζωής της κατασκευής (*Life of structure*) και όχι το χρονικό διάστημα δεξαμενισμού που στα πλοία συνήθως είναι μικρό (5 χρόνια), αφού οι πλωτές ημιβυθισμένες κατασκευές δεν αναμένεται να δεξαμενίζονται τακτικά. Όμως όπως ήδη έχουμε αναφέρει, ο αριθμός των ανόδων πρέπει να ικανοποιεί τόσο το συνολικό ρεύμα όσο και τη συνολική απαίτηση βάρους, άρα απαιτούνται 1367 άνοδοι. Από την εξαγόμενη τιμή $W_r = 217,679 \text{ Tones}$, παρατηρούμε ότι το βάρος των θυσιαζόμενων ανόδων είναι πολύ υψηλό, πράγμα που αυξάνει δραματικά το συνολικό βάρος της κατασκευής. Δηλαδή όχι μόνο το πολυάριθμο πλήθος τεμαχίων, το υψηλό κόστος εγκατάστασης, αλλά και το υψηλό πρόσθετο βάρος, αποτελούν αποτρεπτικό λόγο εφαρμογής αυτής της μεθόδου καθοδικής προστασίας για την προστασία της εξωτερικής επιφάνειας που είναι εκτεθειμένη στο θαλασσινό νερό.

5.4 Καθοδική προστασία με τη μέθοδο των θυσιαζόμενων ανόδων για την προστασία δεξαμενών^{[9],[10],[11],[12]}

Η προστασία των δεξαμενών είναι εξίσου πολύπλοκη όσο και το ίδιο το πρόβλημα της διάβρωσης. Αυτό οφείλεται στο ότι σε αυτές επικρατούν πολύ ιδιαίτερες συνθήκες, κυρίως στις δεξαμενές έρματος, όπως υψηλή θερμοκρασία, υψηλή υγρασία, παρουσία χλωριόντων (στο θαλασσινό νερό), συχνή εναλλαγή συνθηκών υγρό/ξηρό, κρύο/ζεστό περιβάλλον, μείωση ποσοστού συγκέντρωσης οξυγόνου, μικροβιολογική διάβρωση κ.λ.π.

Για τη βέλτιστη μελέτη πρέπει να καθίσταται γνωστό το μέγεθος της δεξαμενής, το σχήμα, οι περιοχές που πρέπει να προστατεύονται, η ποιότητα επικάλυψης, η κατάσταση φόρτωσης έρματος (χρονική διάρκεια που οι δεξαμενές είναι γεμάτες με νερό έρματος και η ποιότητα του υδάτινου έρματος). Αν δεν είναι όλα τα παραπάνω στοιχεία διαθέσιμα, υποθέσεις μπορούν να γίνουν με βάση τον όγκο και τον τύπο της δεξαμενής. Η σωστή κατανομή των ανόδων γίνεται βάση κάποιων κριτηρίων. Στο κάτω μέρος των δεξαμενών, όπου σπάνια στεγνώνει εντελώς, οι θυσιαζόμενες άνοδοι πρέπει να εγκατασταθούν όσο το δυνατόν πλησιέστερα στα ελάσματα πυθμένα.

Η πλέον και μόνη κατάλληλη μέθοδος καθοδικής προστασίας για τις δεξαμενές πλοίων και θαλασσιών κατασκευών είναι μέσω θυσιαζόμενων ανόδων και αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για δεξαμενές έρματος (ballast tanks), δεξαμενές πόσιμου νερού (potable water tanks) και δεξαμενές νερού από την εξόρυξη (drill water tanks). Οι πιο διαδεδομένες προτάσεις ως προς την επιλογή κατάλληλων υλικών για τις θυσιαζόμενες ανόδους είναι ο ψευδάργυρος και το αλουμίνιο για δεξαμενές με θαλασσινό νερό, αλλά το μαγνήσιο αποτελεί την καλύτερη λύση ως υλικό ανόδου για δεξαμενές πόσιμου νερού.

5.4.1 Προτεινόμενη καθοδική προστασία για τις δεξαμενές έρματος της πλωτής ημιβυθισμένης κατασκευής^{[20],[32]}

Για την καθοδική προστασία των δεξαμενών έρματος της πλωτής ημιβυθισμένης κατασκευής επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν θυσιαζόμενες άνοδοι αλουμινίου για εσωτερικές δεξαμενές της εταιρείας Cathwell AS. Οι λόγοι επιλογής ανόδων αλουμινίου έναντι ψευδαργύρου, που θα μπορούσαν επίσης να έχουν επιλεγθεί είναι αρκετοί.

Λόγοι επιλογής ανόδων αλουμινίου έναντι ψευδαργύρου:

Οι άνοδοι αλουμινίου είναι γενικά πιο αποδοτική και οικονομική λύση από τις ανόδους ψευδαργύρου.

- ο **Καλύτερη κατανομή ρεύματος**

Η τάση των ανόδων αλουμινίου είναι υψηλότερη από του ψευδάργυρου, με αποτέλεσμα την καλύτερη κατανομή ρεύματος προστασίας των ανόδων αλουμινίου.

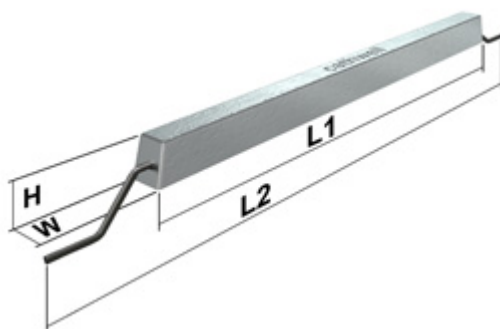
ο **Λιγότερο βάρος**

Η δυναμικότητα του αργιλίου (2.650 Ah /kg) είναι περίπου 3,5 φορές μεγαλύτερη από τον ψευδάργυρο (780 Ah/kg). Ως εκ τούτου, το συνολικό απαιτούμενο βάρος ανόδων αλουμινίου είναι πολύ λιγότερο συγκριτικά με τις ανόδους ψευδαργύρου.

ο **Πιο προσιτές**

Χρησιμοποιώντας ανόδους αλουμινίου συνεπάγεται σημαντικά χαμηλότερο κόστος υλικού σε σύγκριση με ανόδους ψευδαργύρου.

Θυσιαζόμενες άνοδοι αλουμινίου για δεξαμενές έρματος με βραχίονα τύπου DC της εταιρείας Cathwell A



Σχήμα 5.6: Σχηματική απεικόνιση θυσιαζόμενων ανόδων δεξαμενών έρματος της εταιρείας Cathwell AS³²¹

Πίνακας 5.10: Κατάλογος θυσιαζόμενων ανόδων δεξαμενών έρματος της εταιρείας Cathwell AS³²¹

Anode type	Weight (kg)		Dimensions (mm)			
	Gross	Net	L	L2	H	W
105-TAL-DC	10.3	8.6	1250	1550	48	65
130-TAL-DC	12.5	11.2	1245	1545	60	68
160-TAL-DC	16.0	13.7	1630	1930	54	70
200-TAL-DC	18.3	16.1	1600	1900	61	76
230-TAL-DC	23.0	20.4	2100	2300	56	74
320-TAL-DC	33.8	31.5	1600	1900	85	96

Επιλεγμένος τύπος ανόδου για τη δεδομένη κατασκευή: 320 - TAL-DC

Τεχνική συμπεριφορά. (Technical performance)

- Δυναμικότητα (Capacity): 2651 Ah/kg
- Ρυθμός κατανάλωσης (Consumption rate): 3.30 kg/Ayear

- Ειδικό βάρος (Specific gravity): 2.78 kg/dm³
- Δυναμικό κλειστού κυκλώματος (Closed circuit potential): -1100 mV vs. Ag/AgCl/seawater

Χημική σύσταση (Chemical composition, % by weight)

- Ψευδάργυρος, Zinc (Zn): min 2.5, max 5.5
- Ίνδιο, Indium (In): min 0.015, max 0.04
- Χαλκός, Copper (Cu): max 0.005
- Σίδηρος, Iron (Fe): max 0.09
- Πυρίτιο, Silicon (Si): max 0.10
- Διάφορα άλλα, Others (each): max 0.02
- Αλουμίνιο, Aluminium: remainder (κατάλοιπο)

5.4.2 Υπολογιστικό μέρος απαιτούμενων θυσιαζόμενων ανόδων αλουμινίου για δεξαμενές έρματος^{[9],[10],[11],[12]}

Για τους υπολογισμούς θα δοθούν αναλυτικά οι τύποι υπολογισμού του απαιτούμενου αριθμού θυσιαζόμενων ανόδων καθοδικής προστασίας των δεξαμενών έρματος για το συγκεκριμένο τύπο ανόδων που επιλέχθηκαν. Δεδομένου ότι τα απαραίτητα στοιχεία υπολογισμού (Tank Arrangement plan, construction plans) των εσωτερικών επιφανειών όλων των μεταλλικών μερών των δεξαμενών δεν ήταν διαθέσιμα, δεν κατέστη δυνατό να βρεθεί το τελικό αποτέλεσμα για τον απαιτούμενο αριθμό θυσιαζόμενων ανόδων.

Το εξαγόμενο ρεύμα της κάθε ανόδου I_a είναι ουσιαστικά η διαφορά δυναμικού μεταξύ του υλικού της ανόδου και του χάλυβα της κατασκευής που πολώνεται σε επίπεδα προστασίας από την αντίσταση της ανόδου στον ηλεκτρολύτη. Αυτό εκφράζεται ως εξής:

$$I_a = \frac{\Delta V}{R_a}$$

Όπου:

$I_a =$ Το εξαγόμενο ρεύμα ανόδου [Amperes]
Current output of anode

$\Delta V =$ Η διαφορά δυναμικού μεταξύ του υλικού της ανόδου και του χάλυβα προς προστασία [Volts].
Driving potential, i.e., the difference between the potential of the anode and the protected steel potential.

$R_a =$ Αντίσταση της ανόδου στον ηλεκτρολύτη [Ohms]
anodic resistance

Υψηλότερα εξαγόμενα αποτελέσματα από τις ανόδους έχουμε όταν η εγκάρσια τομή της ανόδου είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με το μήκος της. Το δυναμικό του πολωμένου χάλυβα θα πρέπει να ληφθεί -0,8 volt (Ag / AgCl / ηλεκτρόδιο αναφοράς, σε θαλασσινό νερό), αν και μια πιο αρνητική τιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτές τις τοποθεσίες όπου υπάρχει ενεργό θειικό άλας που περιορίζει τα βακτήρια.

$$\Delta V = |(-1.1) - (-0.8)| = 0.3V$$

Υπολογισμός αντίστασης μιας ανόδου, R_a , με μικρή διατομή σε σχέση με το μήκος της και με απόσταση μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή του ακόλουθου τύπου:

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

Όπου:

ρ = Ειδική αντίσταση του θαλασσινού νερού [ohm.cm]
Resistivity of sea-water

L = Μήκος ανόδου [cm]
Length of anode

r = Ισοδύναμη ακτίνα της ανόδου [cm]
Equivalent radius of anode

$\ln = \log_e$

$$r = \sqrt{\frac{a}{\pi}}$$

a = Εμβαδόν διατομής της ανόδου [cm²]

$$a = 8.5 \times 9.6 = 81.6 \text{ cm}^2$$

$$r = \sqrt{\frac{81.6}{3.14}} = 5.098 \text{ cm}$$

$$R_a = \frac{25}{2 \times 3.14 \times 160} \left[\ln \left(\frac{4 \times 160}{5.098} \right) - 1 \right] = 0.0954 \text{ Ohm}$$

$$I_a = \frac{0.3}{0.0954} = 3.14 \text{ Amps}$$

Η συνολική απαίτηση σε ρεύμα είναι:

$$I_r = \frac{A I}{1000}$$

I_r = Απαιτούμενο ρεύμα [Amperes]
(Current required)

A = Εμβαδόν της μεταλλικής κατασκευής [m^2]
(Area of steelwork)

I = Η πυκνότητα του ρεύματος, [mA / m^2]
(Current density)

$$\Delta\eta\lambda\alpha\delta\eta \quad \text{Current (Amps)} = \frac{\text{Area (m}^2\text{)} \times \text{current density (mA/m}^2\text{)}}{1000}$$

Ο αριθμός και ο τύπος των ανόδων που έχει επιλεγεί πρέπει να ικανοποιεί τόσο το συνολικό ρεύμα όσο και συνολική απαίτηση βάρους.

$$\text{Number of anodes} = \frac{\text{Current required (Total)}}{\text{Individual anode current output (Amps)}}$$

$$\text{Number of anodes} = \frac{\text{Weight required (Total)}}{\text{Individual anode net weight (kg)}}$$

Πιο αναλυτικά, ο αριθμός των ανόδων N που απαιτείται θα πρέπει να ικανοποιεί και τα δύο ακόλουθα χαρακτηριστικά:

$$N = \frac{I_r}{I_a}$$

$$N = \frac{W_r}{W_a}$$

Όπου:

I_r = Απαιτούμενο ρεύμα [Amperes]

I_a = Το εξαγόμενο ρεύμα ανόδου [Amperes]

W_r = Καθαρό βάρος του υλικού της ανόδου [kg]

W_a =Καθαρό βάρος κάθε ανόδου [kg]

Το συνολικό βάρος του υλικού ανόδου υπολογίζεται ως εξής:

$$W_r = \frac{I_r \times Y \times 8760}{C \times U}$$

Όπου:

Y = Η διάρκεια ζωής της κατασκευής ή τα διαστήματα δεξαμενισμού σε έτη,
(Life of structure or appropriate dry-docking interval in years)

C = Πρακτική ηλεκτροχημική ικανότητα κράματος σε Ah /kg,
(Practical electrochemical capacity of the alloy)

U = Συντελεστής κατανάλωσης (consumption rate), δηλαδή, το ποσοστό του καθαρού βάρους που έχει καταναλωθεί στο τέλος του κύκλου ζωής της ανόδου.

Συντελεστής κατανάλωσης:

- Για λεπτές ανόδους από απόσταση (long slender stand off anodes): 0,95
- Για πλατιές ανόδους από απόσταση (short slender stand off anodes): 0,90
- Για ανόδους μακριές προσαρτημένες πάνω στην κατασκευή(long flush mounted anode): 0,85
- Για ανόδους “bracelet” και άλλων σχημάτων (bracelet anodes and others shapes): 0,80

8760 = Ο αριθμός ωρών μέσα σε ένα χρόνο

5.4.3 Προτεινόμενη καθοδική προστασία για τις δεξαμενές ποσίμου νερού και νερού εξόρυξης της πλωτής ημιβυθισμένης κατασκευής^[35]

Για την καθοδική προστασία των δεξαμενών ποσίμου (potable water tanks) και νερού από την εξόρυξη (drill water tanks) της πλωτής ημιβυθισμένης κατασκευής επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε θυσιαζόμενες ανόδους μαγνησίου για δεξαμενές της εταιρείας Cathwell AS. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιούμε τα ίδια τυπολόγια με το προηγούμενο κεφάλαιο για τις δεξαμενές έρματος, αλλά πάλι δεν είχαμε τα απαραίτητα στοιχεία υπολογισμού (Tank Arrangement plan, construction plan) των εσωτερικών επιφανειών όλων των μεταλλικών μερών των δεξαμενών, όποτε δεν αναγράφουμε τον απαιτούμενο αριθμό θυσιαζόμενων ανόδων.

Τεχνική συμπεριφορά (Technical performance)

Στοιχεία τεχνικής συμπεριφοράς:	Standard grade cast	High grade cast
Αποδοτικότητα, (%)	>50	>50
Δυναμικό κλειστού κυκλώματος (V)	-1.52 to -1.57	-1.64 to -1.69
Δυναμικό ανοικτού κυκλώματος (V)	-1.57 to -1.62	-1.77 to -1.82

Χημική σύσταση (Chemical composition, % by weight)

Στοιχεία (Elements)	Normal grade cast (content %)	High grade cast (content %)
Αλουμίνιο (Al)	5.30-6.70	≤ 0.001
Μαγγάνιο (Mn)	0.15-0.70	0.50-1.30
Ψευδάργυρος (Zn)	2.30-3.70	≤ 0.020
Νικέλιο (Ni)	≤ 0.003	0.001
Χαλκός (Cu)	≤ 0.050	≤ 0.015
Σίδηρος (Fe)	≤ 0.003	≤ 0.020
Πυρίτιο (Si)	≤ 0.100	≤ 0.040
Άλλα	≤ 0.300	≤ 0.300

Χημική σύσταση για κοινό χυτό μαγνήσιο σύμφωνα με ASTM B 843 AZ63B και για υψηλής ποιότητας χυτό μαγνήσιο σύμφωνα με ASTM B 843 M1C.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ COMSOL Multiphysics® 4.3b

6.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων ΜΠΣ ^[30]

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος υπολογισμού προσεγγιστικών λύσεων διαφορικών εξισώσεων, συνήθων και μερικών, μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Αρχικά, η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα ήταν δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα ήταν πάρα πολύ απλά. Όμως, υπήρχε η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα και για αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι.

Μία τέτοια μέθοδος είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι ότι έχει αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου ήταν τόσο μεγάλη, που ακόμα και σήμερα χρησιμοποιείται και σε ερευνητικό επίπεδο, αλλά και στη βιομηχανία για τον υπολογισμό και τη μελέτη διάφορων κατασκευών.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία εξέλιξη των μητρωϊκών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων. Η βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι, όπως και στη μητρωϊκή ανάλυση, η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με συστατικά στοιχεία (συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά) τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων.

6.2 Το Λογισμικό Comsol Multiphysics 4.3b ^[30]

Η διάβρωση κοστίζει πάνω από ένα τρισεκατομμύριο δολάρια κάθε χρόνο παγκοσμίως και εμφανίζεται περισσότερο λόγω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας ή σε υγρά περιβάλλοντα ή σε περιβάλλοντα με υγρασία. Το λογισμικό COMSOL Multiphysics® Corrosion Module επιτρέπει στους μηχανικούς και τους επιστήμονες να ερευνήσουν αυτές τις διαδικασίες, να αποκτήσουν μια κατανόηση του βαθμού στον οποίο θα μπορούσε να συμβεί η διάβρωση κατά τη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής και να εφαρμόσουν προληπτικά μέτρα για την αναστολή της ηλεκτροχημικής διάβρωσης, με σκοπό την προστασία των κατασκευών τους. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για την προσομοίωση της διάβρωσης σε μικροκλίμακα, προκειμένου να διερευνηθούν οι θεμελιώδεις μηχανισμοί διάβρωσης και σε μεγαλύτερες

κλίμακες, ώστε να καθορίσουν τον τρόπο προστασίας κατασκευών μεγαλύτερης κλίμακας από τη διάβρωση.

Για την προτυποποίηση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης Comsol Multiphysics 4.3b. Αυτό το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM) για διάφορες φυσικές και μηχανικές εφαρμογές, ειδικά σε συνδυασμό με φαινόμενα μεταφοράς, για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων (Partial Differential Equations / PDEs) με τις αντίστοιχες αρχικές και συνοριακές συνθήκες. Το λογισμικό COMSOL Multiphysics® είναι μια γενικής χρήσης πλατφόρμα, που βασίζεται σε προηγμένες αριθμητικές μεθόδους, για τη μοντελοποίηση και προσομοίωση προβλημάτων με βάση τη φυσική. Με το λογισμικό αυτό επιλύονται ποικίλα προβλήματα με τη βοήθεια εργαλείων για επιστημονικά πεδία, όπως η μηχανική, η ηλεκτρολογία, η ρευστομηχανική και η χημεία.

Το λογισμικό COMSOL Multiphysics® διαθέτει ένα αποτελεσματικό πολύπλευρο περιβάλλον που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση και την επίλυση προβλημάτων όλων των επιστημονικών πεδίων. Το λογισμικό παρέχει ένα ισχυρό ολοκληρωμένο περιβάλλον για εύκολη μοντελοποίηση της γεωμετρίας και την πρόσβαση σε όλες τις λειτουργίες σε "παραθυρικό" περιβάλλον των windows. Δίνεται η δυνατότητα να επιλύονται τα συμβατικά μοντέλα ενός επιστημονικού πεδίου σε άλλα πεδία και μάλιστα ταυτόχρονα. Επιπλέον η χρήση του λογισμικού δεν προϋποθέτει βαθειά γνώση μαθηματικών ή αριθμητικής ανάλυσης.

Χρησιμοποιώντας το εύχρηστο λογισμικό περιβάλλον και την προηγμένη υποδομή σε ιδιότητες των υλικών, είναι δυνατό να κατασκευασθούν μοντέλα, καθορίζοντας τα σχετικά φυσικά μεγέθη όπως είναι οι ιδιότητες των υλικών, τα διάφορα φορτία, οι περιορισμοί, χωρίς τον καθορισμό των βασικών εξισώσεων. Είναι δυνατό βέβαια να εφαρμόσουμε αυτές τις μεταβλητές, ή τους αριθμούς απευθείας σε στερεά και υγρά πεδία, όρια ή σημεία ανεξάρτητα από το πλέγμα που έχουμε ορίσει. Το λογισμικό COMSOL τότε συγκεντρώνει εσωτερικά ένα σύνολο εξισώσεων που αντιπροσωπεύουν το μοντέλο. Για την επίλυση των μοντέλων το λογισμικό συνθέτει και επιλύει το πρόβλημα χρησιμοποιώντας ένα σύνολο προηγμένων εργαλείων αριθμητικής ανάλυσης. Το λογισμικό επιλύει με τη βοήθεια του προσαρμοσμένου πλέγματος (αν επιλεγεί) και γίνεται έλεγχος λαθών χρησιμοποιώντας μια ποικιλία αριθμητικών αναλύσεων.

6.3 Το Λογισμικό Comsol Multiphysics 4.3b, Corrosion Module ^[30]

Το Comsol Multiphysics αποτελείται από διάφορα υποπρογράμματα το κάθε ένα εκ των οποίων αποτελεί ένα αυτοτελές μοντέλο με εξισώσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος, όταν αυτό οριστεί πλήρως από το χρήστη. Για να οριστεί πλήρως ένα πρόβλημα (αφού σχεδιαστεί η γεωμετρία) πρέπει για κάθε μοντέλο να οριστούν οι εξισώσεις, οι συνοριακές συνθήκες, οι αρχικές τιμές και οι σταθερές που περιέχονται στις εξισώσεις κάθε μοντέλου.

Το κομμάτι του λογισμικού που ασχολείται με τη διάβρωση ονομάζεται Corrosion Module και αποτελεί υποκατηγορία του επιστημονικού πεδίου της ηλεκτροχημείας.

Ουσιαστικά με αυτό επιτυγχάνεται απευθείας μοντελοποίηση της ηλεκτροχημικής διάβρωσης και γίνεται προσδιορισμός των βέλτιστων προτεινόμενων συστημάτων καθοδικής προστασίας. Περιλαμβάνει επίσης την προσομοίωση του συστήματος καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενο ρεύμα (ICCP) και την προσομοίωση της καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενες ανόδους, όπου το ανοδικό ρεύμα επιβάλλεται στο διαβρωμένο υλικό για να εξασφαλίσει την παθητικοποίηση της προστατευόμενης κατασκευής. Κατά την αναγνώριση περιοχών της κατασκευής που είναι ευαίσθητες σε επιταχυνόμενη διάβρωση, μπορούμε να προδιαγράψουμε που συγκεκριμένα θα τοποθετηθούν οι θυσιαζόμενες άνοδοι και που θα πρέπει να επιβληθούν τα καθοδικά ή τα ανοδικά ρεύματα προστασίας.

Το Corrosion Module περιλαμβάνει όλα τα εργαλεία και ολοκληρωμένα παραδείγματα μοντέλων που επιτρέπουν μια άμεση προσέγγιση προσομοίωσης όλων των ηλεκτροχημικών διεργασιών διάβρωσης. Η μετακίνηση κατασκευών μέσα σε διαβρωτικό περιβάλλον αντιμετωπίζεται με τη δυναμική μοντελοποίηση της επιφάνειας διάβρωσης και του ηλεκτρολύτη που βρίσκεται σε επαφή με αυτή την επιφάνεια. Διαθέτει επίσης εργαλεία για τη μοντελοποίηση του δυναμικού διάβρωσης και της κατανομής του ρεύματος των διαδικασιών της διάβρωσης όπου οι ηλεκτροχημική κινητική αντίδραση μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση Tafel, Butler-Volmer, ή άλλες εξισώσεις που ορίζονται από το χρήστη. Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις επιλύονται πλήρως μαζί με ηλεκτρικά δυναμικά σε ηλεκτρολύτες και μεταλλικές κατασκευές, ενώ ομογενείς χημικές αντιδράσεις και μοναδικά φαινόμενα κατά τη διάβρωση αναδεικνύονται, όπως η αλλαγή του σχήματος μιας μεταλλικής επιφάνειας.

Η διάβρωση μπορεί να έχει επιπτώσεις επί μίας κατασκευής με την πάροδο του χρόνου και μπορεί να καταστεί εντελώς καταστροφική. Καθώς η διάβρωση προκαλεί την αφαίρεση (μείωση) υλικού από μια κατασκευή, μπορεί αυτή να θέσει σε κίνδυνο τη δομική συμπεριφορά και την κατασκευαστική αντοχή. Για αυτό σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορούμε με το λογισμικό αυτό να κάνουμε κατασκευαστική ανάλυση σε συνδυασμό με την ανάλυση της διάβρωσης για να διαπιστώσουμε ποια τμήματα της κατασκευής έχουν εκτεθεί σε υψηλές πιέσεις και σε υψηλές τάσεις. Οπότε για την κατανόηση των επιπτώσεων της διάβρωσης και της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού της αντιδιαβρωτικής προστασίας, μπορούν να συνδυαστούν δύο επιστημονικά πεδία του λογισμικού, αυτό της διάβρωσης με αυτό της μηχανικής. Αυτό είναι εφικτό χάρη στην εκτεταμένη δυνατότητα του COMSOL Multiphysics, να επιτρέπει απευθείας αξιοποίηση μοντέλων που κατασκευάστηκαν σε ένα επιστημονικό πεδίο του λογισμικού από οποιαδήποτε άλλο.

6.4 Προσομοίωση καθοδικής προστασίας για τη δεδομένη πλωτή ημιβυθισμένη εξέδρα με τη μέθοδο ICCP, μέσω του λογισμικού COMSOL Multiphysics® 4.3b ^[28]

Η μέθοδος καθοδικής προστασίας ICCP είναι μια συνήθης τακτική που χρησιμοποιείται ευρέως για την άμβλυνση της διάβρωσης της γάστρας του πλοίου ή μιας υπεράκτιας κατασκευής, κατά την οποία ένα εξωτερικό ρεύμα εφαρμόζεται στην επιφάνεια της μεταλλικής κατασκευής, πολωμένο σε ένα χαμηλότερο δυναμικό. Η επίλυση του προβλήματος μέσω ενός λογισμικού με πεπερασμένα στοιχεία περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. Δημιουργία γεωμετρίας κατασκευής
2. Εισαγωγή παραμέτρων προβλήματος
3. Δημιουργία πλέγματος στοιχείων
4. Επίλυση

6.4.1 Θεωρία επίλυσης και παράμετροι του προβλήματος

Για την επίλυση θα χρησιμοποιήσουμε τη θεωρία της δεύτερης τάξης κατανομής του ρεύματος (Secondary Current Distribution physics), ώστε να βρούμε το δυναμικό του ηλεκτρολύτη Φ_l (V) στην περιοχή του ηλεκτρολύτη σύμφωνα με:

$$i_l = -\sigma_l \nabla \Phi_l \quad (1)$$

$$\nabla i_l = 0$$

που συνεπάγεται $\nabla^2 \Phi_l = 0$ (εξίσωση Laplace)

Όπου:

∇^2 : Είναι ο τελεστής Laplace, $\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$

i_l [A/m²] : Είναι το διάνυσμα της πυκνότητας ρεύματος του ηλεκτρολύτη (electrolyte current density vector) και

σ_l [S/m] : Είναι η αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη (electrolyte conductivity)

- ❖ Χρησιμοποιήθηκαν οι συνοριακές συνθήκες **Electrolyte - Current** για να καθορίσουμε το συνολικό ρεύμα

- ❖ Χρησιμοποιήθηκαν οι συνοριακές συνθήκες **Electrolyte - Electrode Boundary Interface** στην επιφάνεια του ηλεκτρολύτη, το οποίο θα καθορίζει την οριακή συνθήκη για το δυναμικό του ηλεκτρολύτη.

$$n \cdot i_l = \sum_m i_{loc,m} \quad (2)$$

Όπου:

$i_{loc,m}$ [A/m²]: Είναι η πυκνότητα του ρεύματος από την ξεχωριστή αντίδραση του ηλεκτροδίου, τοπικά (local individual electrode reaction current density).

- ❖ Χρησιμοποιούμε την εξίσωση Butler-Volmer (Expression) για να προσομοιώσουμε την αντίδραση του ηλεκτροδίου στην επιφάνεια της γάστρας της πλωτής κατασκευής που μελετάται. Αυτό θα καθορίσει την πυκνότητα του ρεύματος σε:

$$i_{loc} = i_0 \left[\exp\left(\frac{a_a F n}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{a_c F n}{RT}\right) \right] \quad (3)$$

Όπου η υπέρταση (overpotential) υπολογίζεται ως:

$$n = \Phi_{S,ext} - \Phi_l - E_{eq} \quad (4)$$

Οι παράμετροι που θα χρησιμοποιήσουμε στην εξίσωση Butler-Volmer (Expression) για τη γάστρα και τον ηλεκτρολύτη δίνονται στον παρακάτω πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Οι κινητικοί παράμετροι του ηλεκτροδίου (electrode kinetics parameters)

Properties		Units
Sea water conductivity	5	[S/m]
Equilibrium Potential of steel alloy vs. Ag/AgCl	-0.54	[V]
Exchange Current Density of steel alloy (i_0)	2.3E-01	[mA/cm ²]
Anodic Transfer Coefficient of steel alloy	0.6	[1]
Cathodic Transfer Coefficient of steel alloy	0.06	[1]
Applied current at anode (I_{tot})	1241	[A]
Initial Values electrolyte potential	0,5	[phil]

* Δίνονται από το λογισμικό electric potential:0 phis και boundary condition electric potential:Φ=0 και T=25° C.

- ❖ Χρησιμοποιώντας τις προεπιλεγμένες συνθήκες μόνωσης για όλα τα όρια των επιφανειών της γάστρας της θαλάσσιας κατασκευής:

$$n \cdot i_l = 0 \quad (5)$$

Όπου n: είναι ένα κανονικό διάνυσμα που προσδιορίζει το πεδίο ορισμού.

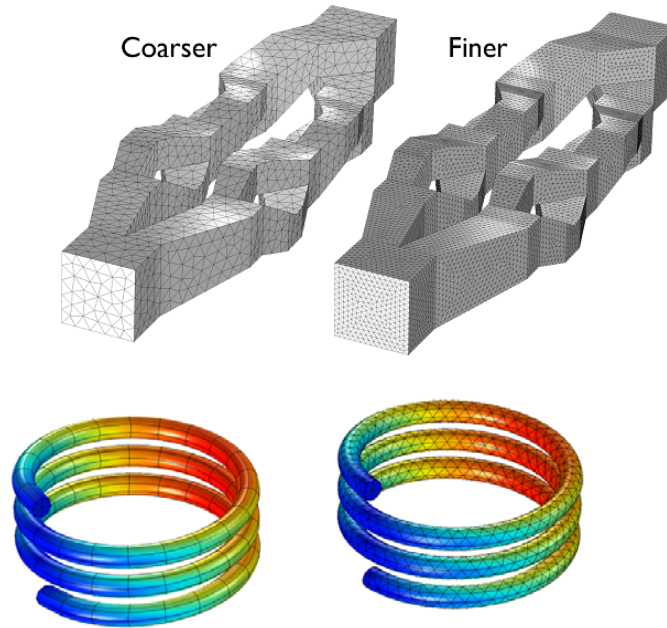
Χρησιμοποιείται η συνθήκη άπειρου ηλεκτρολύτη (*Infinite Electrolyte*) στα εξωτερικά όρια της περιοχής του ηλεκτρολύτη για να περιγραφεί η άπειρη έκταση του ωκεανού. Για λόγους συμμετρίας θεωρείται η επιφάνεια του ωκεανού και τα μέσα του επιπέδου της θαλάσσιας κατασκευής ως επίπεδα συμμετρίας. Αυτό θα διαμορφώσει την αγωγιμότητα έξω από την κατασκευασμένη γεωμετρία, με τη χρήση της μεθόδου των συνοριακών ορίων.

6.4.2 Δημιουργία πλέγματος στοιχείων

Η μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στον κατακερματισμό της κατασκευής σε μικρά δομικά τμήματα τα στοιχεία (elements). Η επιλογή του κατάλληλου πλέγματος στοιχείων που δημιουργείται σε ένα μοντέλο είναι πολύ σημαντικό, καθώς από αυτή επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Οι παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη δημιουργία πλέγματος είναι:

Μέγεθος στοιχείων (Element Size):

Ο καθορισμός του κατάλληλου μεγέθους πλέγματος για τη γεωμετρία που μελετάται είναι από τα πιο κρίσιμα στάδια της διαδικασίας προσομοίωσης και μπορεί να θεωρηθεί ζωτικής σημασίας για την επίτευξη των καλύτερων αποτελεσμάτων. Ωστόσο, επειδή είναι δύσκολο να προσδιοριστεί, το λογισμικό COMSOL Multiphysics διαθέτει εννέα προκαθορισμένα μεγέθη πλέγματος, που κυμαίνονται από εξαιρετικά λεπτό (Extremely fine) ως εξαιρετικά χοντρό (Extremely coarse) με το κανονικό (Normal) να βρίσκεται ακριβώς στη μέση. Αυτά έχουν κωδικοποιηθεί στο λογισμικό (για ευκολία στη χρήση), ώστε να δημιουργούν υψηλής ποιότητας πλέγμα για τις περισσότερες γεωμετρίες και εφαρμογές. Βέβαια, η προκαθορισμένη ανάλυση πλέγματος μπορεί να τροποποιηθεί, ανάλογα την περίπτωση. Στα παρακάτω σχήματα βλέπουμε δύο αντικείμενα με διαφορετικές αναλύσεις πλέγματος (βλέπε επόμενο σχήμα 6.1 ανάλυση πλέγματος Coarser & Finer).

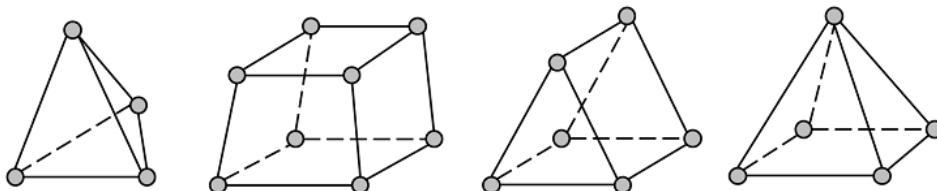


Σχήμα 6.1: Μοντέλα με ανάλυση πλέγματος Coarser & Finer

Για την πλωτή κατασκευή που μελετάται, έγινε επιλογή ανάλυσης πλέγματος: **Εξαιρετικά λεπτή (Extremely fine)** με minimum element size: 0,043 m και maximum element size: 4,3 m, ενώ για τον ηλεκτρολύτη, **Λεπτό (Fine)** με minimum element size: 2,15 m και maximum element size: 17,2 m.

Είδος πλέγματος:

Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί τύποι στοιχείων (βλέπε σχήμα 6.2) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία πλέγματος, τα τετραεδρικά στοιχεία (Tetrahedral elements), τα εξαεδρικά (Hexahedral elements), τα πρισματικά (Prism elements) και τα στοιχεία πυραμίδας (Pyramid element). Οι γκρι κύκλοι παριστάνουν τους κόμβους (nodes).



Σχήμα 6.2: Είδη στοιχείων πλέγματος (element type)

Επιλέχθηκε Ελεύθερο Τετραεδρικό (Free Tetrahedral)

Ο αριθμός των στοιχείων:

Ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του πλέγματος (όλης της γεωμετρίας) ήταν:

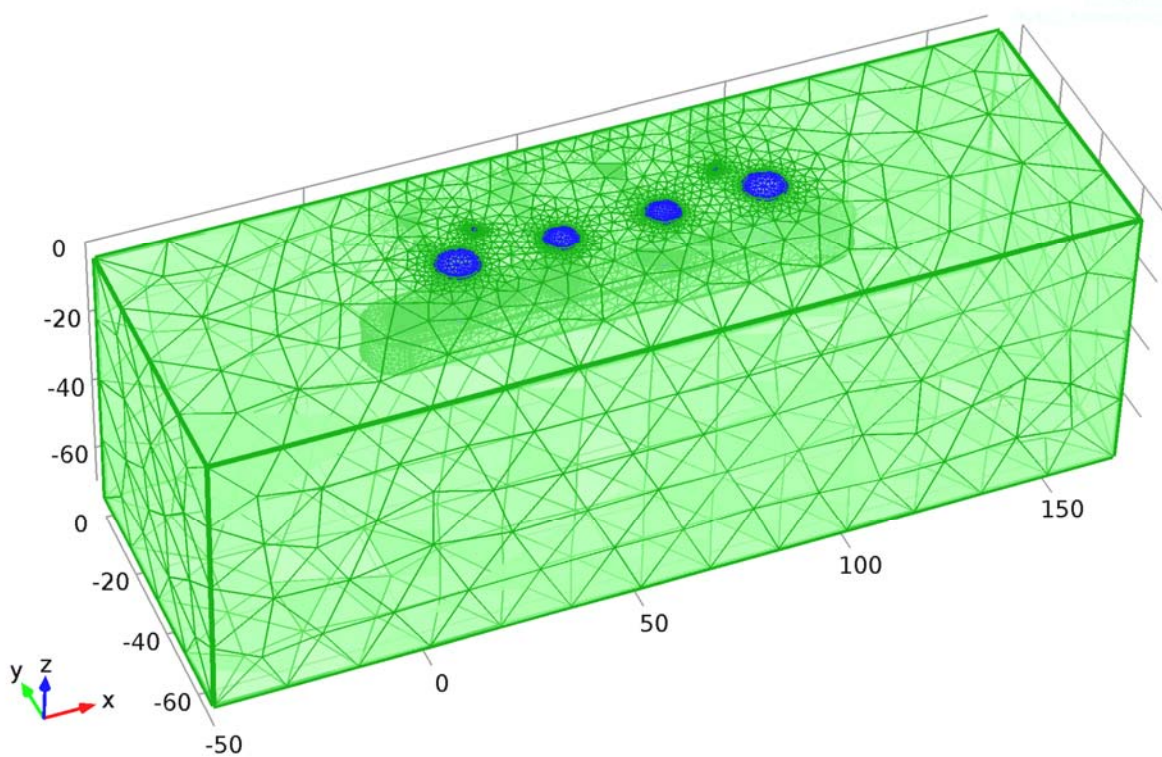
Tetrahedral elements: 488273

Triangular elements: 39350

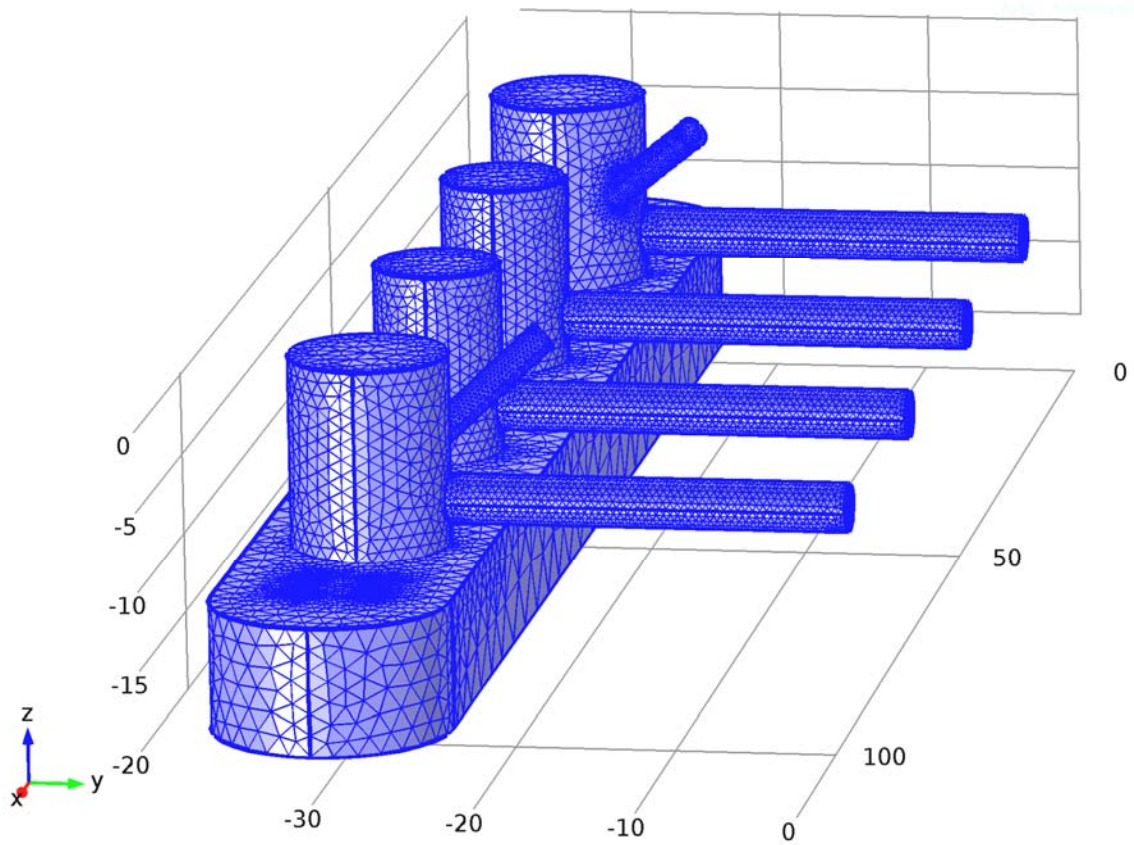
Edge elements: 3368

Vertex elements: 182

Τα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα (σχήμα 6.3 και σχήμα 6.4).



Σχήμα 6.3: Το πλέγμα (mesh) του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε (κατασκευή και ηλεκτρολύτης)

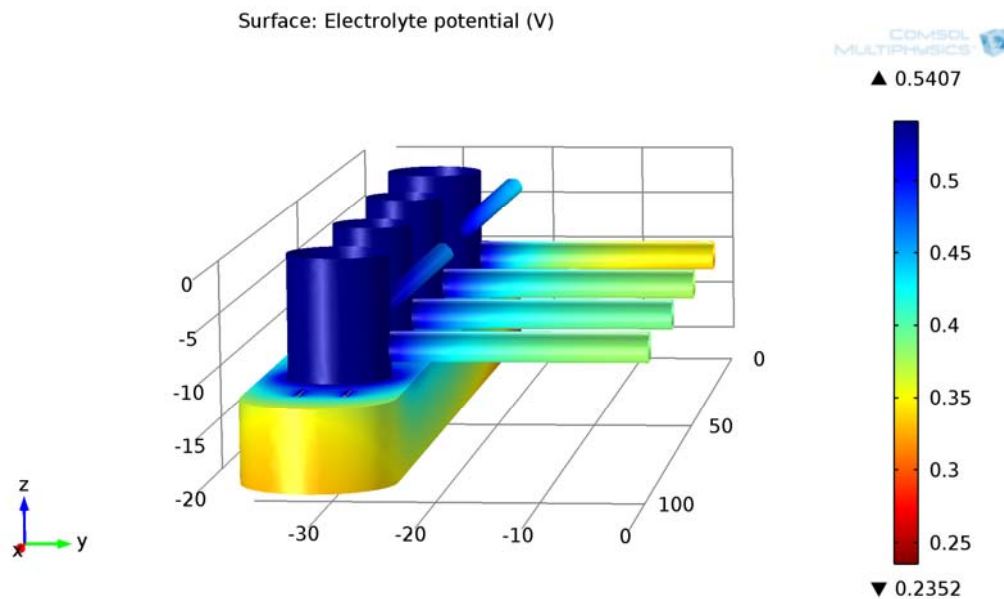


Σχήμα 6.4: Το πλέγμα (mesh analysis: Extremely fine) στην πλοτή κατασκευή

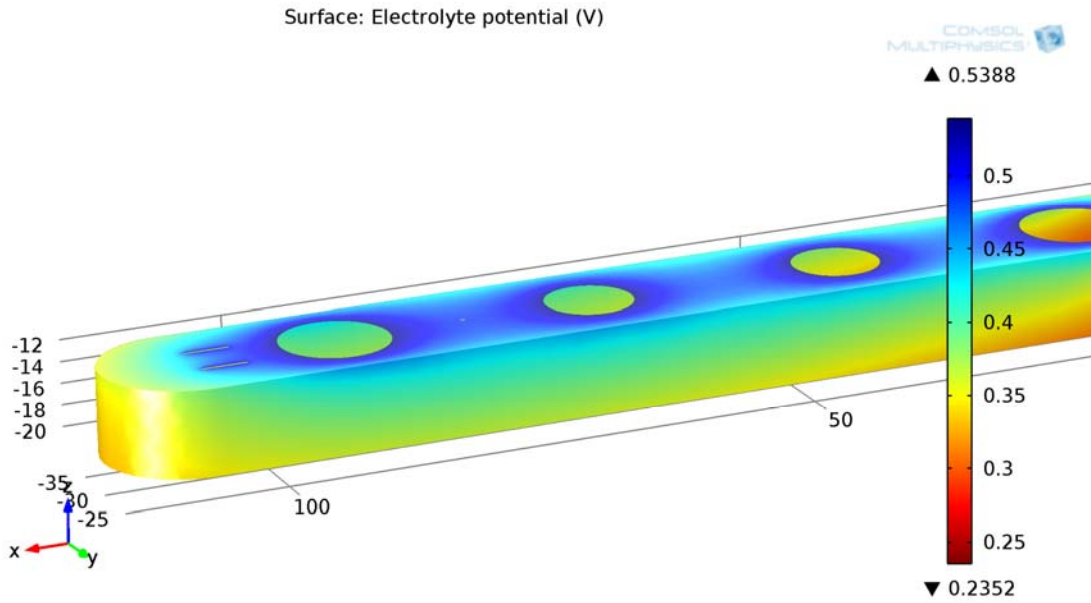
6.4.3 Επίλυση (Solution) και αποτελέσματα

Σε αυτό το στάδιο γίνεται ορισμός του είδους της ανάλυσης βάση του οποίου θα γίνει η επίλυση του προβλήματος (δηλαδή γραμμική ή μη γραμμική), έχει επιλεγθεί γραμμική. Τα αποτελέσματα του λογισμικού, που παρατίθενται παρακάτω βοηθούν να εξακριβωθεί κατά πόσον η επιλογή των θέσεων των ανόδων είναι η καλύτερη δυνατή (ομοιόμορφη κατανομή) και να διαπιστωθεί εάν έχουμε προστατέψει επαρκώς. Πιο αναλυτικά παρουσιάζεται παρακάτω η γραφική παράσταση της κατανομής του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στην εξωτερική επιφάνεια της γάστρας όλης της ημιβυθισμένης κατασκευής (σχήμα 6.5) και ξεχωριστά για κάθε κατασκευαστικό στοιχείο (σχήμα 6.6- σχήμα 6.8). Γίνεται αντιληπτό ότι η πιθανή κατανομή δυναμικού σε όλη επιφάνεια της γάστρας είναι αρκετά ομοιόμορφη. Στο σχήμα 6.9 αναπαρίσταται η κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος του ηλεκτρολύτη στην εξωτερική επιφάνεια της ημιβυθισμένης κατασκευής

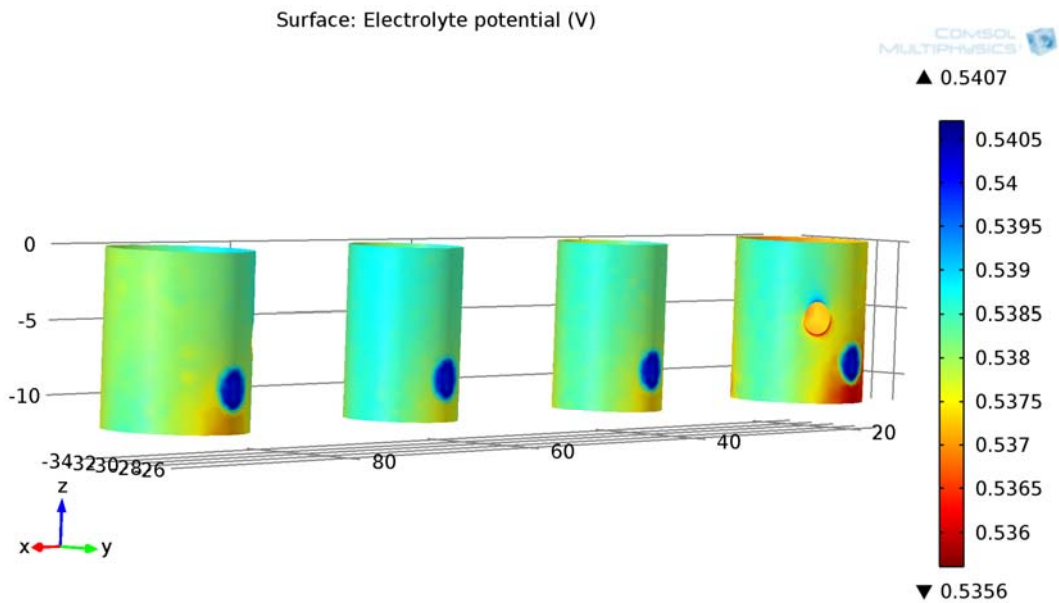
Το δυναμικό του ηλεκτρολύτη είναι υψηλότερο κοντά στην επιφάνεια της ανόδου, σε σύγκριση με την υπόλοιπη επιφάνεια της πλωτής κατασκευής. Το υψηλότερο δυναμικό στην επιφάνεια της κατασκευής που μελετάται βρίσκεται να είναι πολύ κάτω από το δυναμικό ισορροπίας που καταδεικνύει την καθοδική δραστηριότητα στην επιφάνεια. Η κατανομή της πυκνότητας ρεύματος τοπικά επιβεβαιώνει την καθοδική αντίδραση στην επιφάνεια της κατασκευής, υποδεικνύοντας ότι το εφαρμοζόμενο ρεύμα 1241A για bare steel ή 700A αν το υπολογίζαμε με παραμέτρους coating category III, (μισό, διότι στη μοντελοποίηση έχουμε κατασκευάσει τη μισή κατασκευή), επαρκώς προστατεύει τη μεταλλική κατασκευή από τη διάβρωση. Παρατίθεται επίσης στα αποτελέσματα, διάγραμμα κατανομής της πυκνότητας ρεύματος του ηλεκτρολύτη στην εξωτερική επιφάνεια της ημιβυθισμένης κατασκευής (σχήμα 6.9), ώστε να ελεγχθεί η ομοιόμορφη κατανομή.



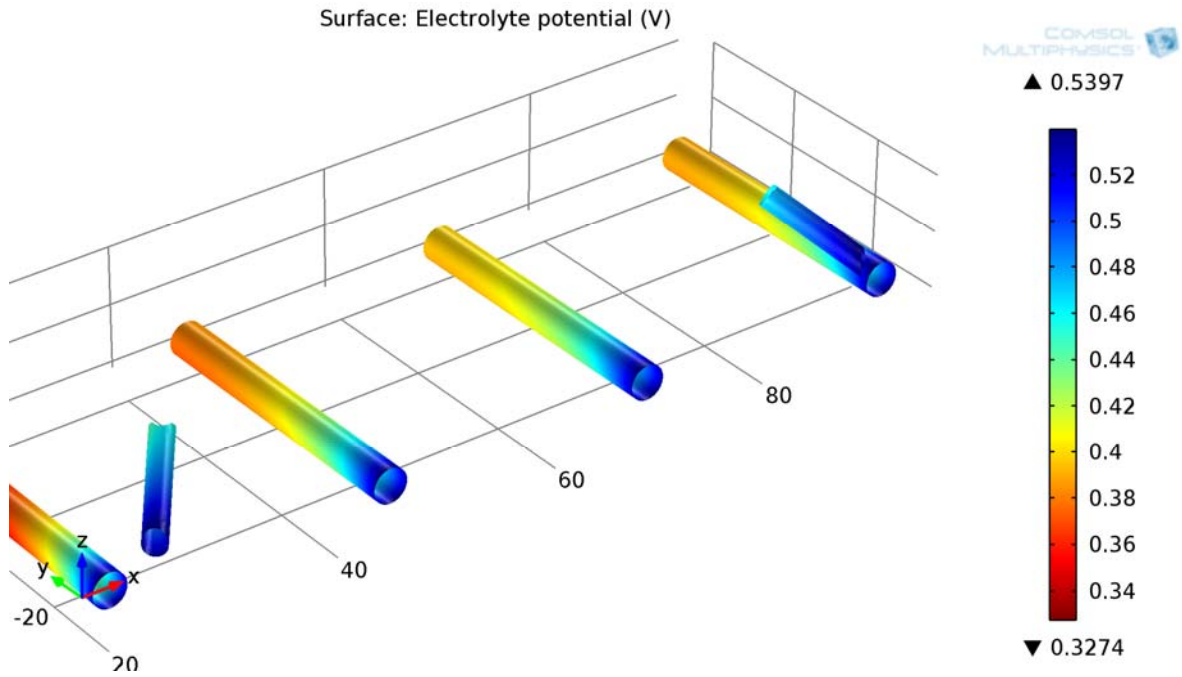
Σχήμα 6.5: Απεικόνιση κατανομής του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στην εξωτερική επιφάνεια της ημιβυθισμένης κατασκευής



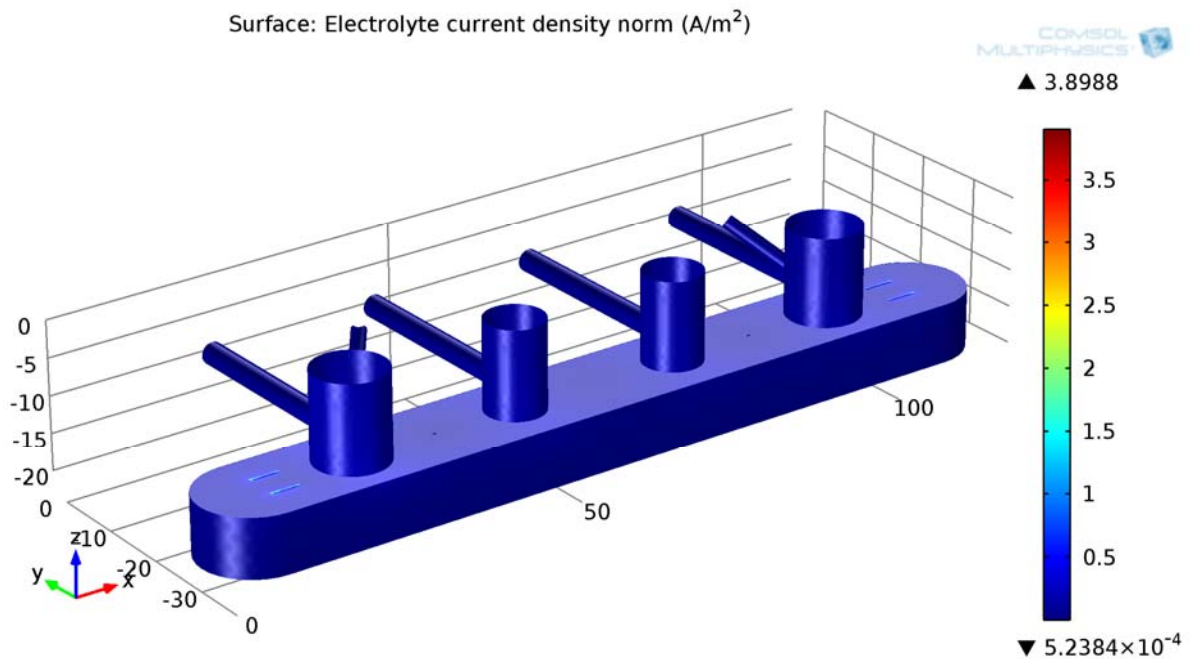
Σχήμα 6.6: Απεικόνιση κατανομής του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στην εξωτερική επιφάνεια του ποντογιού της ημιβυθισμένης κατασκευής



Σχήμα 6.7: Απεικόνιση κατανομής του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στην εξωτερική επιφάνεια των κυλίνδρων της ημιβυθισμένης κατασκευής



Σχήμα 6.8: Απεικόνιση κατανομής του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στην εξωτερική επιφάνεια των bracing της ημιβυθισμένης κατασκευής



Σχήμα 6.9: Απεικόνιση κατανομής της πυκνότητας του ρεύματος του ηλεκτρολύτη στην εξωτερική επιφάνεια της ημιβυθισμένης κατασκευής

6.4.4 Διαδικασία μοντελοποίησης

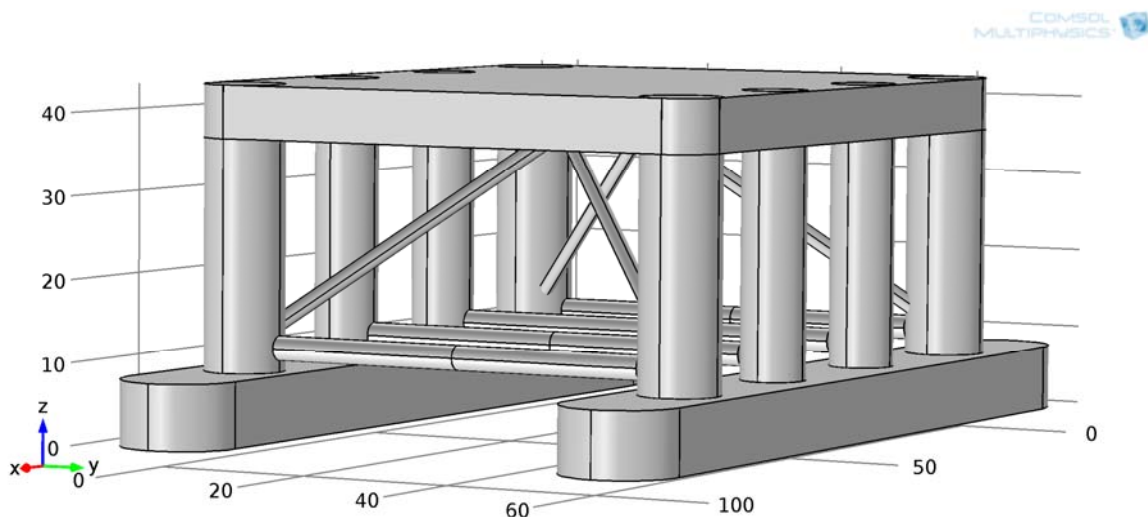
Ανοίγουμε το λογισμικό.

Model Wizard

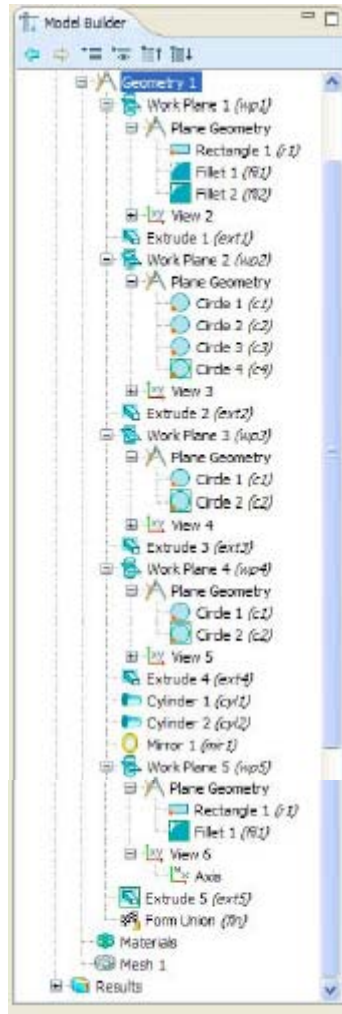
1. Στο παράθυρο του Model Wizard =>
2. Επιλέγουμε 3D στο πεδίο Select Space Dimensions και κατόπιν =>
3. Επιλέγουμε επόμενο =>
4. Στο πεδίο Add physics, επιλέγουμε Electrochemistry (Ηλεκτροχημεία) και =>Secondary Current Distribution (siec) κατανομή ρεύματος δεύτερης τάξης =>
5. Επιλέγουμε επόμενο =>
6. Στο πεδίο Select Study Type, επιλέγουμε Stationary (στατικώς) =>
7. Επιλέγουμε Finish.

Geometry (Δημιουργία γεωμετρίας μοντέλου)

Η γεωμετρία (βλέπε σχήμα 6.10) δημιουργείται από την αρχή ή εισάγεται από κάποιο συμβατό αρχείο. Λόγω εύκολης γεωμετρίας δημιουργήθηκε σε αυτό το λογισμικό. Η γεωμετρία δημιουργήθηκε με απλές εντολές, έχοντας αρχικά φτιάξει τα κατάλληλα Work Planes (επίπεδα). Οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για λόγους καλύτερης κατανόησης αποδίδονται σχηματικά παρακάτω.



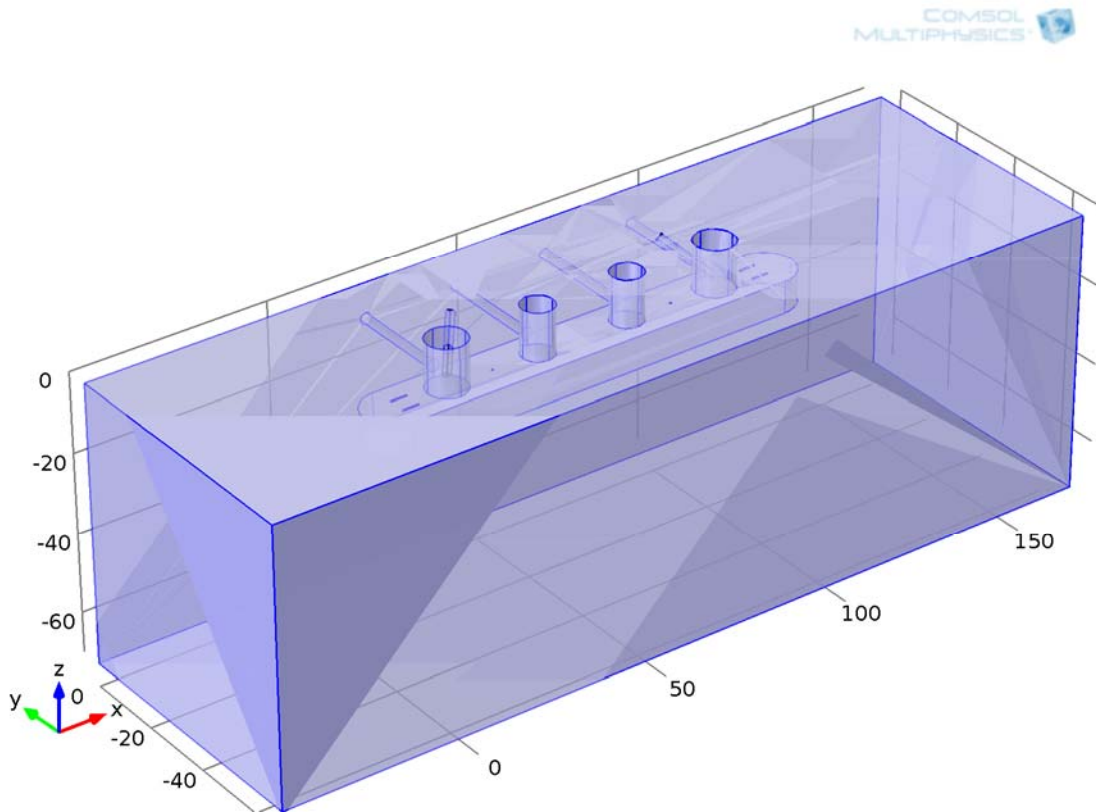
Σχήμα 6.10: Απεικόνιση της γεωμετρίας για τη δεδομένη πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή



Τη γεωμετρία τη δημιουργούμε αρχικά ολόκληρη (Port Side & Stbd Side), αλλά λόγω της συμμετρίας που υπάρχει στους υπολογισμούς θα θεωρήσουμε τη μισή κατασκευή, προσαρμόζοντας την ποσότητα current input. Για να ολοκληρωθεί η γεωμετρία πρέπει να δημιουργήσουμε και τον ηλεκτρολύτη (τη θάλασσα).

1. Στο παράθυρο του Model Builder, δεξί κλικ στο σημείο Geometry 1 και επιλέγουμε την εντολή Block
2. Στο παράθυρο του Block, στο πεδίο Object Type επιλέγουμε από τη λίστα επιλογής, Solid
3. Στο πεδίο Size and Shape , πληκτρολογούμε width: 215m, Depth: 70m, Height: 70m
4. Στο πεδίο Axis, Axis type επιλέγουμε από τη λίστα επιλογής, z- Axis

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η γεωμετρία του ηλεκτρολύτη αναφορικά με τη δεδομένη κατασκευή σχήμα 6.11).



Σχήμα 6.11: Απεικόνιση της μισής γεωμετρίας για τη δεδομένη πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή μαζί με τον ηλεκτρολύτη

Parameters

1. Στο παράθυρο του Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ στο σημείο Global Definitions και επιλέγουμε Parameters
2. Στο πεδίο Parameters γράφουμε τις παραμέτρους αναλυτικά (βλέπε πίνακα 6.1) ή τις εισάγουμε από αρχείο.

Secondary Current Distribution

Ξεκινάμε να θέτουμε το πρόβλημα.

Electrolyte 1

Στο παράθυρο Electrolyte, locate the Electrolyte section, από τη λίστα σ_1 , επιλέγουμε User defined και στο αντίστοιχο πεδίο πληκτρολογούμε sigma.

Electrolyte Current 1

Προσδιορίζουμε το συνολικό ρεύμα στην επιφάνεια των ανόδων.

1. Στο παράθυρο του Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ στο σημείο Secondary Current Distribution και επιλέγουμε Electrolyte => Electrolyte Current
2. Στο παράθυρο του Electrolyte Current, στο πεδίο Boundary Selection επιλέγουμε από τη λίστα επιλογής, Άνοδοι
3. Στο σημείο I_1 , total, πληκτρολογούμε Itot.

Electrolyte-Electrode Boundary Interface 1

Προσδιορίζουμε την κινητική εξίσωση του ηλεκτροδίου

1. Στο παράθυρο του Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ στο Secondary Current Distribution και επιλέγουμε Electrolyte=>Electrolyte=>Electrode Boundary Interface
2. Στο παράθυρο του Electrolyte-Electrode Boundary Interface, στο πεδίο Boundary Selection επιλέγουμε από τη λίστα επιλογής Anodes ICCP

Electrode Reaction 1

1. Στο παράθυρο του Model Builder, ανοίγουμε (expand) το the Electrolyte-Electrode Boundary Interface και επιλέγουμε Electrode Reaction 1
2. Στο πεδίο Equilibrium Potential 3, στο σημείο $E_{eq,ref}$ πληκτρολογούμε E_{eq_steel}
3. Στο πεδίο Electrode Kinetics από τη λίστα στο σημείο Kinetics expression type list, επιλέγουμε Butler-Volmer.
4. Στο σημείο i_0 πληκτρολογούμε $i0_steel$
5. Στο σημείο α_a πληκτρολογούμε α_{aa_steel}
6. Στο σημείο α_c πληκτρολογούμε α_{ac_steel}

Infinite Electrolyte 1

Προσθέτουμε Infinite Electrolyte για να περιγράψουμε την άπειρη εξίσωση του ηλεκτρολύτη. Χρήση επιπέδων συμμετρίας για την περιγραφή της επιφάνειας του ωκεανού και των επιπέδων συμμετρίας στη δεδομένη κατασκευή.

1. Στο παράθυρο Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ στο Secondary Current Distribution και επιλέγουμε Electrolyte =>Infinite Electrolyte
2. Επιλέγουμε τα όρια 1 και 2 μόνο
3. Επιλέγουμε τα όρια 1–3 και 5 μόνο
4. Στο παράθυρο του Infinite Electrolyte, στο πεδίο Electrolyte, πληκτρολογούμε στη θέση σ_i , πληκτρολογούμε sigma.
5. Ανοίγουμε το πεδίο Symmetry Planes section. Επιλέγουμε το επίπεδο yz-plane.

Δεν χρειάζεται να ορίσουμε τίποτε περισσότερο για συνοριακές συνθήκες αφού εφαρμόζονται συνθήκες μόνωσης από μόνες τους (by Default).

Initial Values 1

Δίνοντας μια αρχική τιμή για το δυναμικό του ηλεκτρολύτη, μειώνουμε τον υπολογιστικό χρόνο.

1. Στο παράθυρο Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ στο Secondary Current Distribution και επιλέγουμε Initial Values 1.
2. Στο παράθυρο Initial Values, στο πεδίο electrolyte potential φιλ πληκτρολογούμε 0.5.

Mesh (Πλέγμα)

Δημιουργούμε πλέγμα με υψηλότερη ανάλυση για την κατασκευή και πλέγμα υψηλής για τον ηλεκτρολύτη. Στο γενικό size του πλέγματος είναι προεπιλεγμένο το normal, για τον ηλεκτρολύτη επιλέγουμε fine.

1. Στο παράθυρο του Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ στο σημείο Mesh 1 και επιλέγουμε Free Tetrahedral.
2. Πηγαίνουμε στο παράθυρο Free Tetrahedral settings, στο πεδίο Domain Selection, στο σημείο Geometric entity level list, επιλέγουμε Domain.
3. Στο σημείο Select επιλέγουμε Manual επιλέγουμε την κατασκευή.

Size 1

1. Κάνουμε δεξί κλικ στο Free Tetrahedral 1 και επιλέγουμε Size
2. Πηγαίνουμε στο παράθυρο του Size, Geometric Entity Selection, στο πεδίο Geometric Entity level από την προκαθορισμένη λίστα, επιλέγουμε Domain και επιλέγουμε στο πεδίο Selections Manual.
3. Στο παράθυρο του Geometric Entity Selection, στο πεδίο Element Size => Από την προκαθορισμένη λίστα, επιλέγουμε Extremely fine.

Size 2

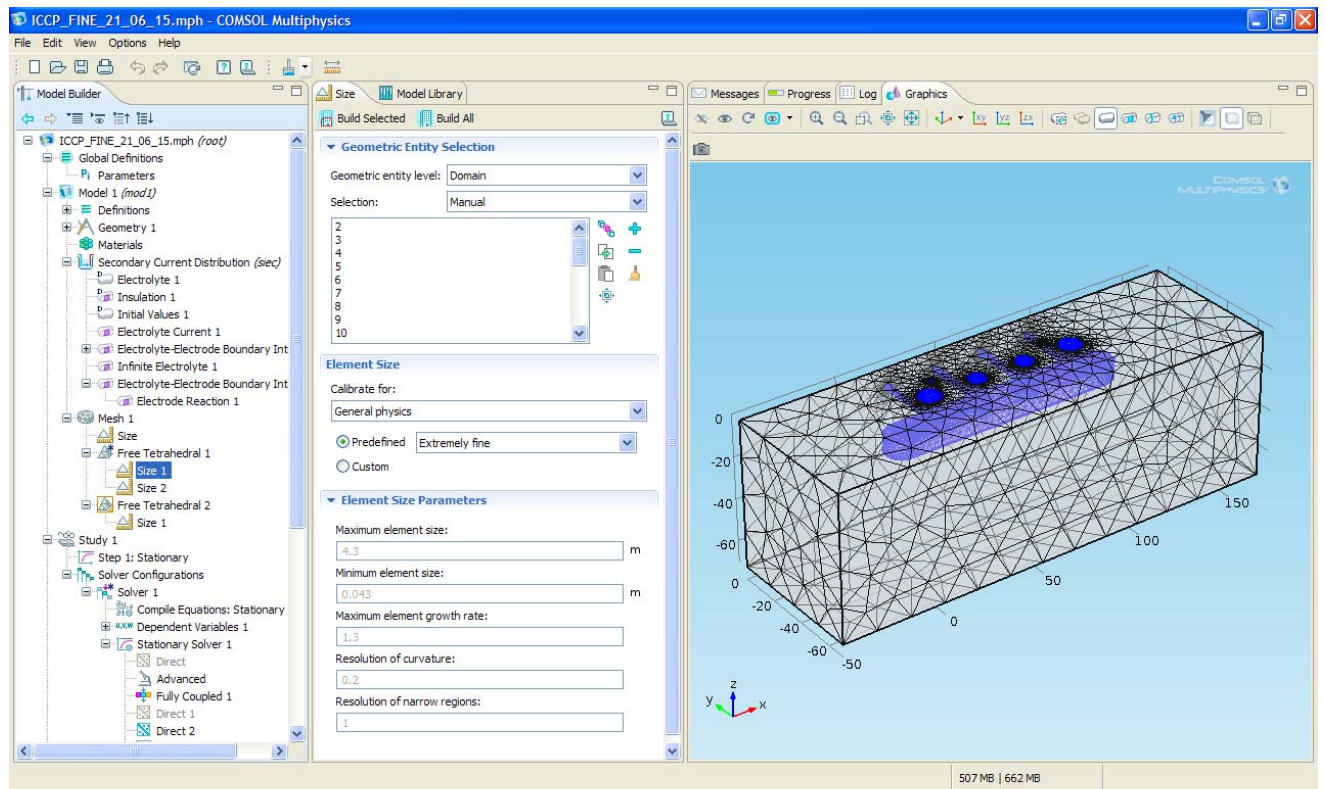
1. Κάνουμε δεξί κλικ στο Free Tetrahedral 1 και επιλέγουμε Size
2. Πηγαίνουμε στο παράθυρο του Size, Geometric Entity Selection, στο πεδίο Geometric Entity level από την προκαθορισμένη λίστα, επιλέγουμε Boundary και επιλέγουμε στο πεδίο Selections Pontoons and Columns.
3. Στο πεδίο Element Size => Από την προκαθορισμένη λίστα, επιλέγουμε Extremely fine.

Free Tetrahedral 2

Στο παράθυρο του Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ στο σημείο Mesh 1 και επιλέγουμε Free Tetrahedral. Στο πεδίο Domain selection και πιο συγκεκριμένα στο πεδίο Geometric Entity level επιλέγουμε Remaining.

Size 1 (βλέπε σχήμα 6.12)

1. Κάνουμε δεξί κλικ στο Free Tetrahedral 2 και επιλέγουμε Size
2. Πηγαίνουμε στο παράθυρο του Size, Geometric Entity Selection, στο πεδίο Geometric Entity level από την προκαθορισμένη λίστα, επιλέγουμε Boundary και επιλέγουμε στο πεδίο Selections Bracing surface.
3. Στο πεδίο Element Size => Από την προκαθορισμένη λίστα, επιλέγουμε Extremely fine.

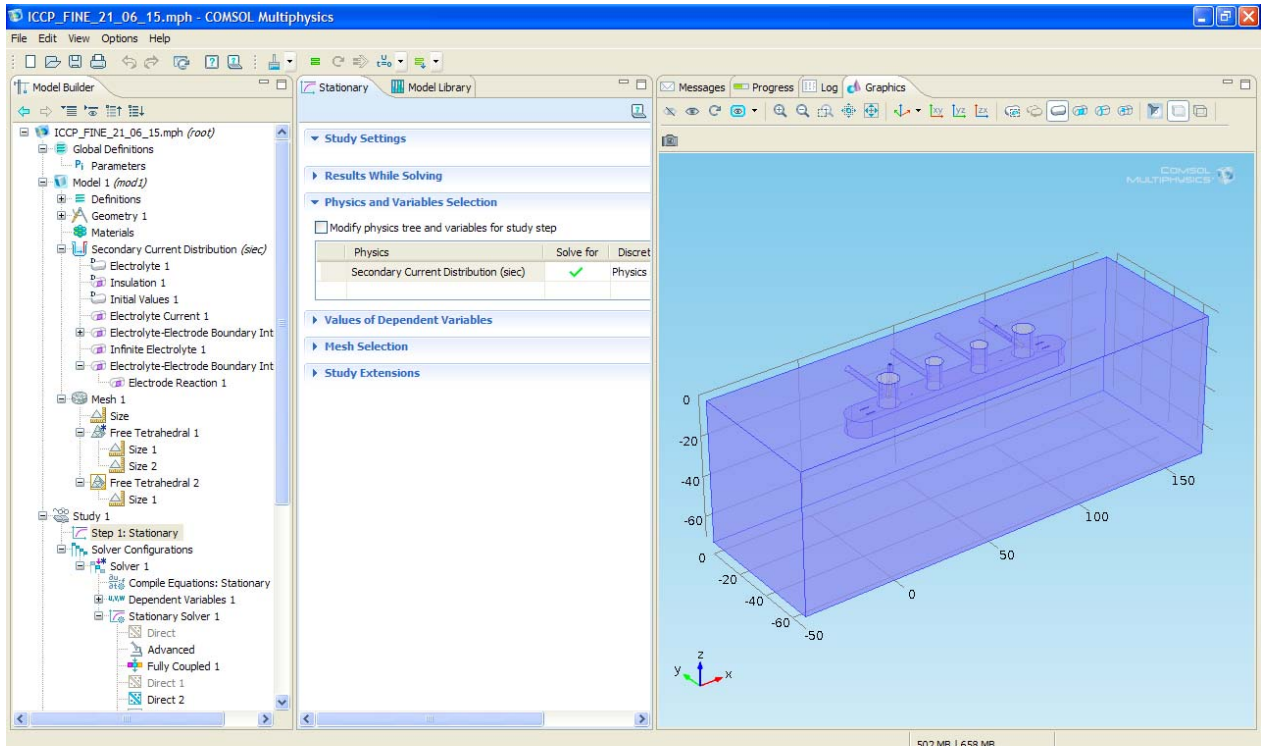


Σχήμα 6.12: Απεικόνιση στοιχείων του πλέγματος (element size parameters, mesh: Extremely fine) από το λογισμικό

Study 1 (βλέπε σχήμα 6.13)

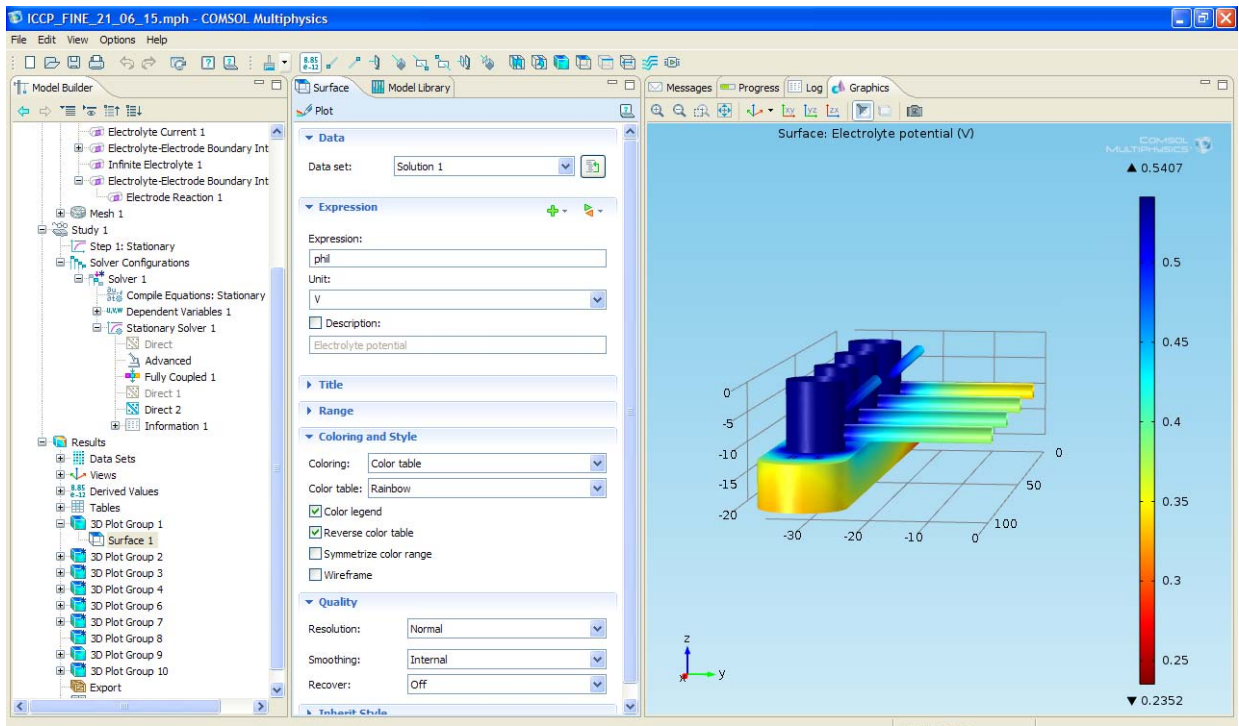
Επιλύουμε το πρόβλημα

1. Στο παράθυρο Model Builder, επιλέγουμε Study 1
2. Στο πεδίο Study settings από-επιλέγουμε την επιλογή Generate default plots
3. Πατάμε το κουμπί Compute



Σχήμα 6.13: Απεικόνιση της επίλυσης από το λογισμικό

Results (βλέπε σχήμα 6.14)



Σχήμα 6.14: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων της κατανομής δυναμικού του ηλεκτρολύτη από το λογισμικό

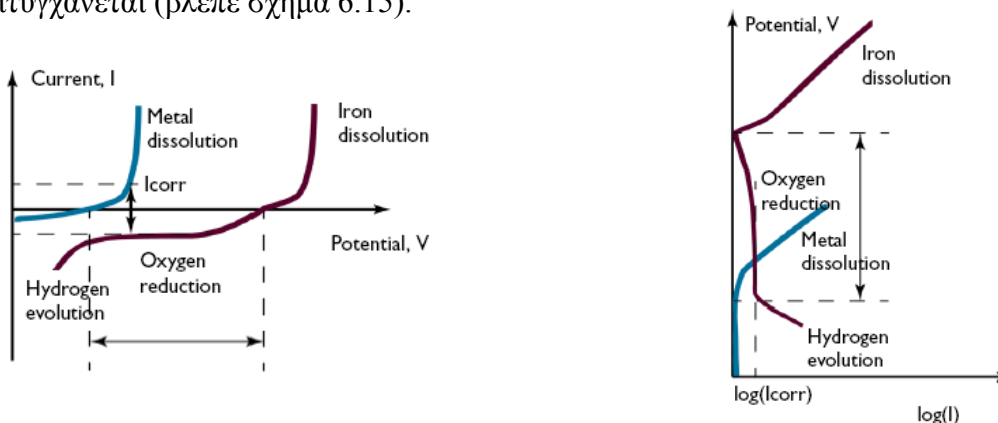
6.5 Προσομοίωση καθοδικής προστασίας για τη δεδομένη πλωτή ημιβυθισμένη εξέδρα με τη μέθοδο θυσιαζόμενων ανόδων, μέσω του λογισμικού COMSOL Multiphysics® 4.3b ^[29]

Οι μεταλλικές κατασκευές που βρίσκονται μέσα σε θαλασσινό νερό προστατεύονται από τη διάβρωση μέσω της καθοδικής προστασίας. Αυτή η προστασία μπορεί να επιτευχθεί με κάποιο εξωτερικά επιβαλλόμενο ρεύμα ή χρησιμοποιώντας θυσιαζόμενες ανόδους. Η χρήση των θυσιαζόμενων ανόδων συχνά προτιμάται λόγω της απλότητας τους. Η βασική αρχή της καθοδικής προστασίας, με τη χρήση θυσιαζόμενων ανόδων είναι αρκετά απλή. Η επίλυση του προβλήματος μέσω ενός λογισμικού με πεπερασμένα στοιχεία περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. Δημιουργία γεωμετρίας κατασκευής
2. Εισαγωγή παραμέτρων προβλήματος
3. Δημιουργία πλέγματος στοιχείων
4. Επίλυση

6.5.1 Θεωρία επίλυσης και παράμετροι του προβλήματος

Υποθέτοντας ότι μια μία χαλύβδινη μεταλλική κατασκευή είναι συνδεδεμένη με ένα λιγότερο ευγενές μέταλλο, παραδείγματος χάριν αλουμίνιο, το μέταλλο αυτό προκαλεί τις θυσιαζόμενες ανόδους να είναι ανοδικά πολωμένες και τη χαλύβδινη κατασκευή να είναι καθοδικά πολωμένη, όταν τα ηλεκτρόδια εμβαπτίζονται σε θαλασσινό νερό. Οι άνοδοι διαλύονται μέσω της ανοδικής διάλυσης του μετάλλου, ενώ στην επιφάνεια της μεταλλικής κατασκευής πραγματοποιείται αναγωγή του οξυγόνου. Η παροχή οξυγόνου είναι αυτό που συχνά περιορίζει την πυκνότητα ρεύματος για την αναγωγή του οξυγόνου, πράγμα που σημαίνει ότι στην επιφάνεια της χαλύβδινης μεταλλικής κατασκευής μια χαμηλή τιμή ρεύματος (σχεδόν σταθερή) πάνω από μερικές εκατοντάδες millivolts του δυναμικού επιτυγχάνεται (βλέπε σχήμα 6.15).



Σχήμα 6.15: Σχηματική απεικόνιση της πόλωσης των θυσιαζόμενων ανόδων (μπλε καμπύλη) και της αντίδρασης αναγωγής του οξυγόνου στην επιφάνεια του χάλυβα (κόκκινη καμπύλη) ^[18]

Η κόκκινη καμπύλη αναπαριστά την πόλωση της επιφάνειας του χάλυβα, ενώ η μπλε καμπύλη είναι η πόλωση της θυσιαζόμενης ανόδου. Στα αριστερά, τα ρεύματα στη χαλύβδινη μεταλλική κατασκευή (κόκκινο) και στις θυσιαζόμενες ανόδους (μπλε) παριστάνονται γραφικά σε συνάρτηση με το δυναμικό που μετράται παίρνοντας μία κοινή κλίμακα αναφοράς. Η γραφική παράσταση στα δεξιά δείχνει το ηλεκτρικό δυναμικό ως συνάρτηση του λογαρίθμου της απόλυτης τιμής του ρεύματος. Όπως φαίνεται στα αριστερά διαγράμματα, η αναγωγή του οξυγόνου επιτυγχάνεται στην επιφάνεια του χάλυβα κατά μήκος της περιοχής του καθοδικού ρεύματος και είναι ορατό στο οριζόντιο τμήμα της κόκκινης καμπύλης. Στη δεξιά γραφική παράσταση, το κατακόρυφο τμήμα της κόκκινης καμπύλης αναπαριστά την αναγωγή του οξυγόνου. Το σύστημα λειτουργεί στο σημείο όπου το καθοδικό ρεύμα (κόκκινο) είναι ίσο σε μέγεθος (αλλά με αντίθετο πρόσημο) από το ανοδικό ρεύμα.

Η μεταβολή του σχήματος της μπλε καμπύλης εξαρτάται από τον αριθμό και την κατανομή των ανόδων του συστήματος. Ο μελετητής του συστήματος πρέπει να εξασφαλίζει ότι τα διαφορετικά τμήματα της χαλύβδινης κατασκευής είναι εντός του επιτρεπτού εύρους τιμών του δυναμικού προστασίας από διάβρωση (το "επίπεδο" τμήμα της κόκκινης καθοδικής καμπύλης), διαφορετικά η κατασκευή δεν είναι πλήρως προστατευμένη και μπορεί να αρχίσει να διαβρώνεται. Το εύρος τιμών της αναγωγής του οξυγόνου (στην καμπύλη) είναι μερικές εκατοντάδες millivolts. Επιπλέον, οι άνοδοι πρέπει να είναι σε θέση να παρέχουν το απαιτούμενο δυναμικό, ώστε να διατηρείται το επιθυμητό ρεύμα. Το πρώτο βήμα στο σχεδιασμό ενός συστήματος καθοδικής προστασίας είναι να διερευνηθεί το δυναμικό της χαλύβδινης κατασκευής, θεωρώντας ένα σταθερό καθοδικό ρεύμα (αναγωγή οξυγόνου). Το δυναμικό πρέπει να είναι εντός του απαιτούμενου εύρους τιμών, όπου η αναγωγή του οξυγόνου θα προστατεύει την κατασκευή και θα αποφεύγεται η έκλυση υδρογόνου, η οποία μπορεί τελικά να προκαλέσει ψαθυροποίηση.

Στις επιφάνειες των θυσιαζόμενων ανόδων, εφαρμόζεται ένα σταθερό δυναμικό, υποθέτοντας μια συνεχώς αυξανόμενη κινητική εξίσωση. Η υπόθεση αυτή συνεπάγεται ότι μια πολύ μικρή αλλαγή στο παραπάνω δυναμικό στις επιφάνειες οδηγεί σε πολύ μεγάλη αλλαγή στην πυκνότητα του ρεύματος και επομένως είναι λογικό να ρυθμίζεται σε μια σταθερή τιμή δυναμικού. Στην επιφάνεια της καθόδου, θεωρείται ότι η μείωση του οξυγόνου λαμβάνει χώρα στη χαμηλότερη τιμή πυκνότητας του ρεύματος, περιορισμένη από το ρυθμό μεταφοράς του διαλυμένου οξυγόνου στην επιφάνεια. Αυτό προσδίδει στην επιφάνεια της χαλύβδινης κατασκευής συντομικές συνθήκες σταθερής πυκνότητας ρεύματος. Όλα τα άλλα όρια είναι μονωμένα.

Στο θαλασσινό νερό, η χημική σύσταση θεωρείται ότι ποικίλλει σε πολύ μικρό βαθμό και η διάδοση των ιόντων που μεταφέρουν το ρεύμα είναι αμελητέα σε σχέση με τη συμβολή στη μετανάστευση αυτών των ιόντων στο ηλεκτρικό πεδίο. Αυτή η υπόθεση, μαζί με τις συντομικές συνθήκες, επιτρέπει τη χρήση μιας ανάλυσης πρώτης τάξης για την κατανομή ρεύματος (Primary Current Distribution) στο σύστημα, όπου λαμβάνεται υπόψη μόνο η επίδραση των ωμικών αποτελεσμάτων για τη δεδομένη γεωμετρία. Το μοντέλο μπορεί εύκολα να αλλάξει σε ανάλυση δεύτερης τάξης για την κατανομή ρεύματος (Secondary Current Distribution), προκειμένου να προστεθούν οι κινητικές αντιδράσεις και οι αντιδράσεις ηλεκτροδίου σε ένα δεύτερο στάδιο (μια τρίτης τάξης ανάλυση της κατανομής

του ρεύματος που θα λάμβανε υπόψη τη μεταφορά των φορτισμένων σωματιδίων είναι επίσης δυνατή στο Corrosion Module).

Στα αποτελέσματα μετά την επίλυση μας δίνεται το δυναμικό του ηλεκτρολύτη στην επιφάνεια της χαλύβδινης κατασκευής και στις ανόδους. Το δυναμικό στην επιφάνεια της χαλύβδινης κατασκευής ποικίλει αρκετές εκατοντάδες millivolts, ανάλογα με τη θέση. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση από την άνοδο, τόσο χαμηλότερο θα είναι το δυναμικό, ένα αναμενόμενο αποτέλεσμα αφού το ρεύμα στον ηλεκτρολύτη ρέει από την άνοδο στην κάθοδο.

Μπορούμε να συνδέσουμε το δυναμικό του ηλεκτρολύτη Φ_1 με το δυναμικό του ηλεκτροδίου θεωρώντας ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς τοποθετημένο στον ηλεκτρολύτη σε κοντινή θέση στην επιφάνεια του χάλυβα. Το ηλεκτρικό δυναμικό ενός ηλεκτροδίου αναφοράς είναι $\Phi_{s, ref}$:

$$\Phi_{s, ref} = E_{eq, ref} + \Phi_1 \quad (1)$$

Το ηλεκτρικό δυναμικό Φ_s της επιφάνειας του χάλυβα διατηρείται σταθερό λόγω της υψηλής αγωγιμότητας του μετάλλου, το δυναμικό της επιφάνειας του χάλυβα σε σχέση με το ηλεκτρόδιο αναφοράς γίνεται:

$$E_{vs, ref} = \Phi_s - \Phi_{s, ref} = \Phi_s - (E_{eq, ref} + \Phi_1) \quad (2)$$

Συνδυάζοντας την εξίσωση 2 με το εξαγόμενα αποτελέσματα μπορούμε να διαπιστώσουμε εάν η επιφάνεια της χαλύβδινης κατασκευής μας είναι επαρκώς προστατευμένη. Οι παράμετροι του προβλήματος φαίνονται στον Πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2: Οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση

<i>Properties</i>		<i>Units</i>
<i>Sea water conductivity</i>	5	<i>[S/m]</i>
<i>limited current for oxygen reduction at cathode</i>	-0.15	<i>[A/m²]</i>
<i>Initial Values electrolyte potential</i>	0	<i>[phi]</i>

* Δίνονται από το λογισμικό electric potential:0 phi και boundary condition electric potential:Φ=0 και T=25^ο C.

Ομοίως ισχύουν: $i_l = -\sigma_l \nabla \Phi_l$ και $\nabla i_l = 0$.

6.5.2 Δημιουργία πλέγματος στοιχείων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στον κατακερματισμό της κατασκευής σε μικρά δομικά τμήματα, τα στοιχεία. Η επιλογή του κατάλληλου πλέγματος στοιχείων που δημιουργείται σε ένα μοντέλο είναι πολύ σημαντικό, καθώς από αυτό επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Μέγεθος στοιχείων (Element Size):

Για την πλωτή κατασκευή μας επιλέξαμε ανάλυση πλέγματος: Λεπτή (fine) για την πλωτή κατασκευή μας με minimum element size: 1,55 m και maximum element size: 12,4 m, ενώ για τον ηλεκτρολύτη, Χονδρότερη (Coarser) με minimum element size: 6,2 m και maximum element size: 29,4 m (βλέπε σχήμα 6.16 και σχήμα 6.17). Η συγκεκριμένη ανάλυση ήταν η υψηλότερη δυνατή διότι δεν επαρκούσε η μνήμη του υπολογιστή σε μεγαλύτερη ανάλυση.

Είδος πλέγματος:

Επιλέξαμε Ελεύθερο τετραεδρικό (Free Tetrahedral)

Ο αριθμός των στοιχείων:

Ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του πλέγματος (όλης της γεωμετρίας) ήταν:

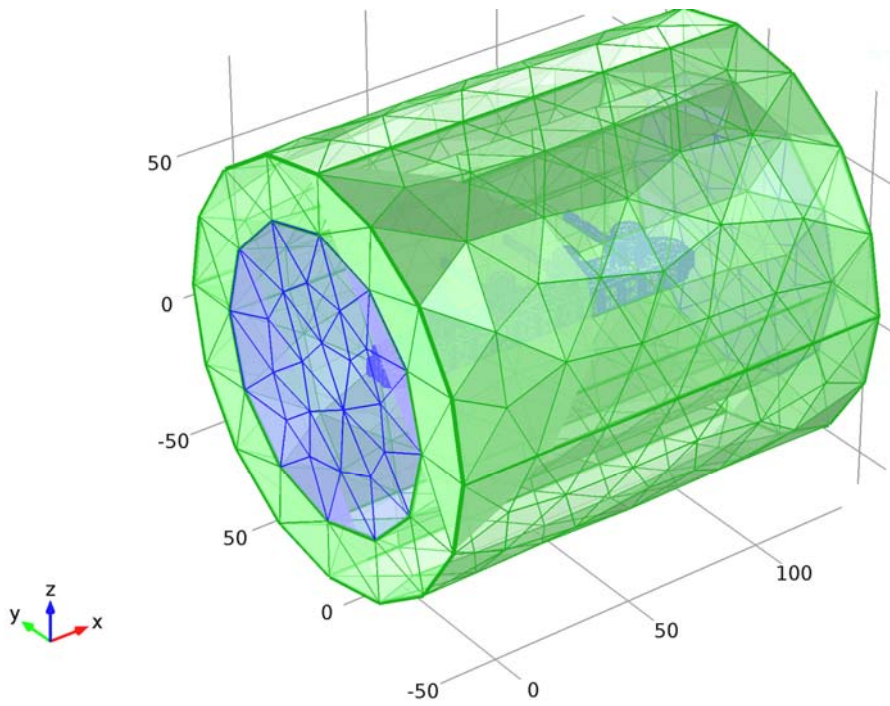
Tetrahedral elements: 64034

Triangular elements: 11520

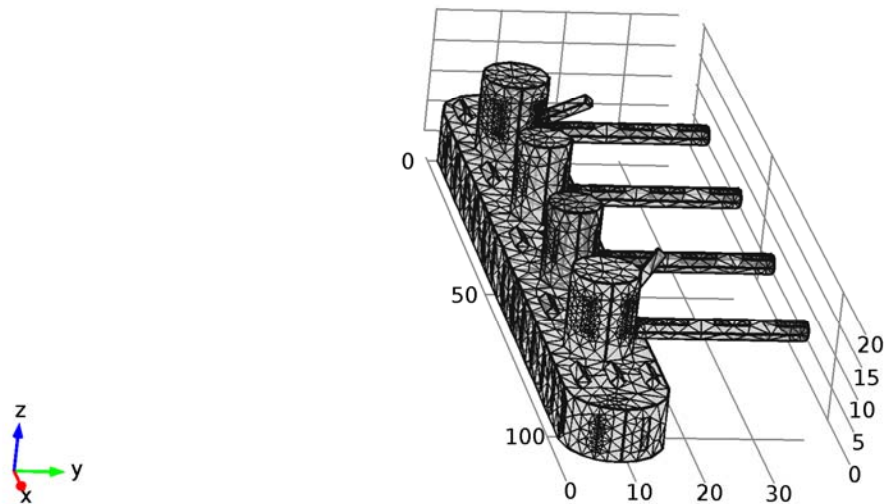
Edge elements: 3491

Vertex elements: 1040

Η ανάλυση πλέγματος που χρησιμοποιήσαμε στο μοντέλο παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα (σχήμα 6.16 και σχήμα 6.17).



Σχήμα 6.16: Η ανάλυση πλέγματος του μοντέλου (πλωτή κατασκευή και ηλεκτρολύτης) που χρησιμοποιήθηκε (μνήμη RAM ηλεκτρονικού υπολογιστή 2GB)

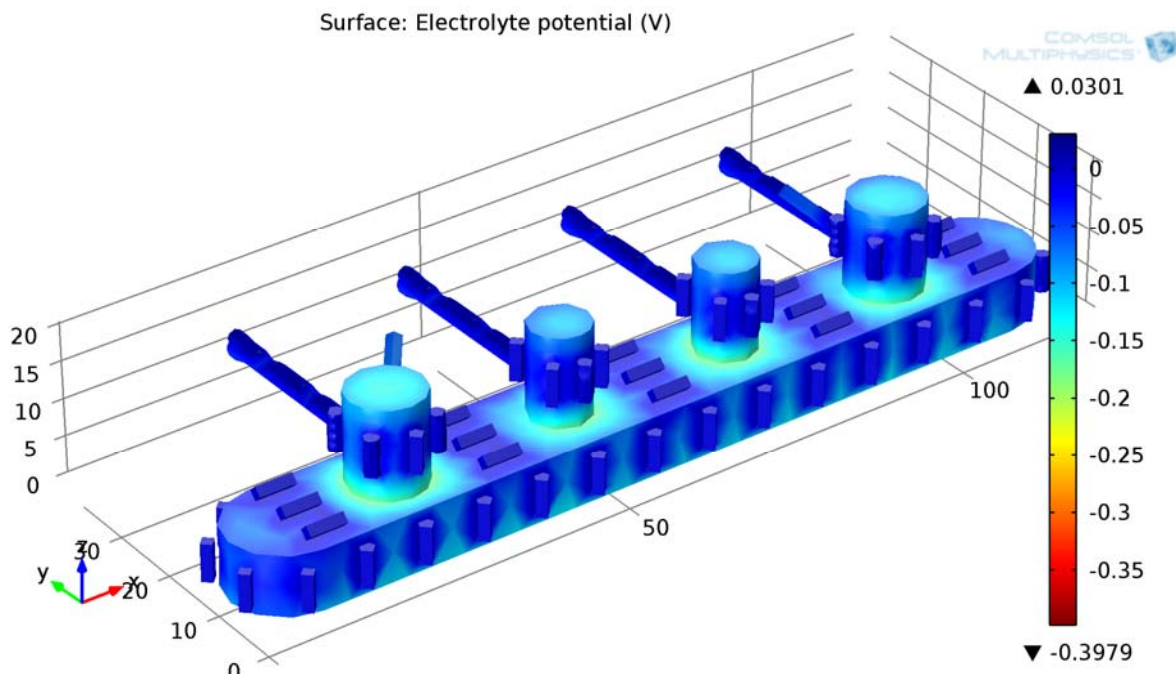


Σχήμα 6.17: Η ανάλυση πλέγματος: Λεπτή (fine) στην κατασκευή

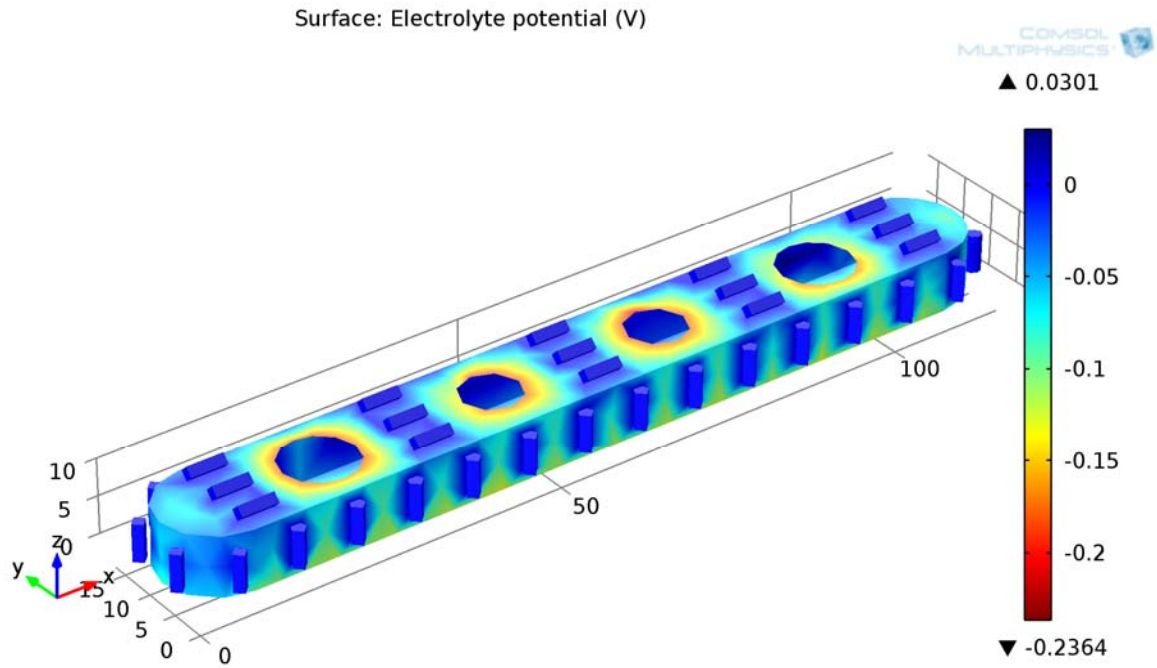
6.5.3 Επίλυση (Solution) και αποτελέσματα

Στο στάδιο αυτό ορίζουμε το είδος της ανάλυσης βάση του οποίου θα γίνει η επίλυση του προβλήματος (δηλαδή γραμμική ή μη γραμμική) και επιλύουμε, εμείς επιλέξαμε γραμμική. Τα αποτελέσματα του λογισμικού, που παρατίθενται παρακάτω βοηθούν να εξακριβωθεί κατά πόσον η επιλογή των θέσεων των ανόδων είναι η καλύτερη δυνατή (ομοιόμορφη κατανομή) και να διαπιστωθεί εάν έχουμε προστατέψει επαρκώς. Πιο αναλυτικά, παρουσιάζεται παρακάτω η γραφική παράσταση της κατανομής του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στην εξωτερική επιφάνεια της γάστρας όλης της ημιβυθισμένης κατασκευής σχήμα 6.18 και ξεχωριστά για κάθε κατασκευαστικό στοιχείο (σχήμα 6.19 έως σχήμα 6.20). Γίνεται αντιληπτό ότι η πιθανή κατανομή δυναμικού σε όλη επιφάνεια της γάστρας είναι αρκετά ομοιόμορφη. Στο σχήμα 6.21 απεικονίζεται η πυκνότητα ρεύματος του ηλεκτρολύτη στις θυσιαζόμενες ανόδους.

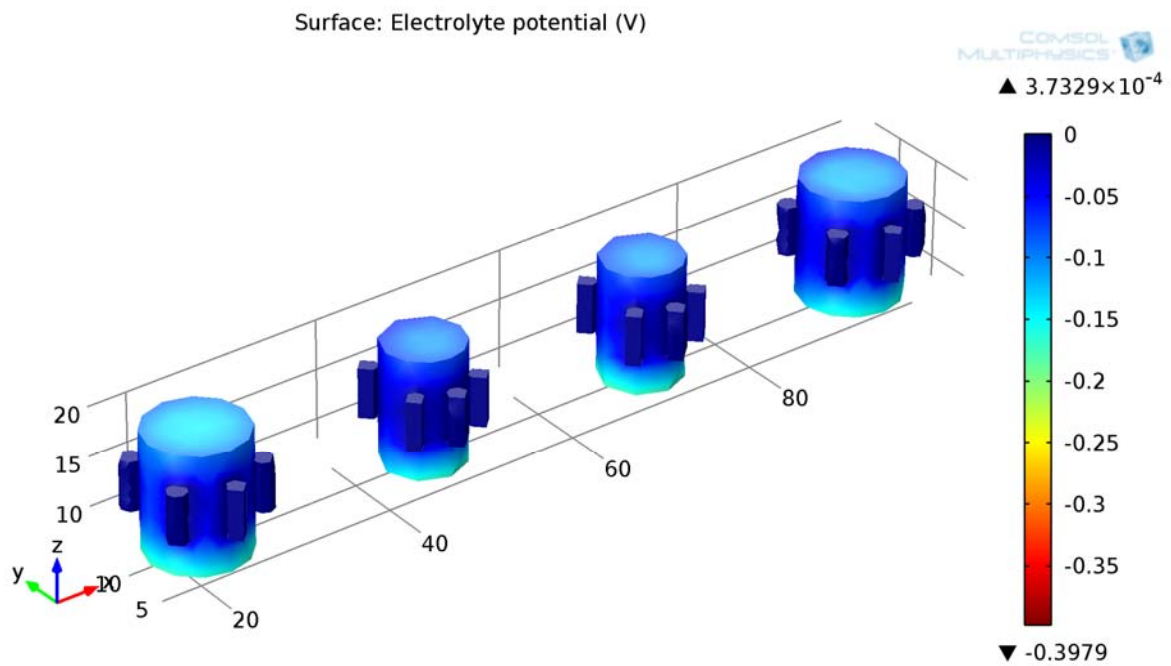
Αρχικά τρέξαμε το μοντέλο μας με τις πραγματικές διαστάσεις θυσιαζόμενων ανόδων που είναι πολύ μικρές συγκριτικά με τις υπόλοιπες διαστάσεις της πλωτής κατασκευής και δημιουργούν κάποιες τεχνικές δυσκολίες στην επίλυση του προβλήματος. Μπορούμε όμως συμβατικά για λόγους διευκόλυνσης της επίλυσης να ορίσουμε πολλές ανόδους μαζί, μεγαλώνοντας το μέγεθος ανόδων ως προς τις διαστάσεις και να επιλύσουμε το πρόβλημα ξανά.



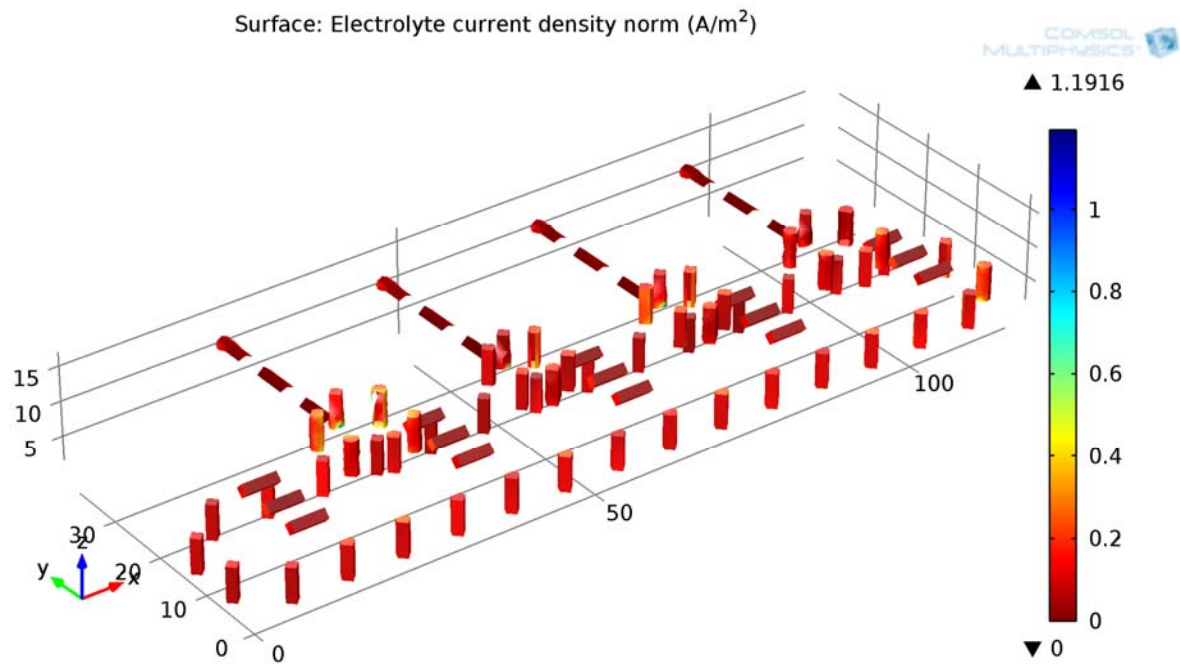
Σχήμα 6.18: Το δυναμικό του ηλεκτρολύτη στις θυσιαζόμενες ανόδους και στην πλωτή κατασκευή



Σχήμα 6.19: Το δυναμικό του ηλεκτρολύτη στο ποντόνι της πλωτής κατασκευής και στις θυσιαζόμενες ανόδους



Σχήμα 6.20: Το δυναμικό του ηλεκτρολύτη στους κυλίνδρους της πλωτής κατασκευής και στις θυσιαζόμενες ανόδους



Σχήμα 6.21: Η πυκνότητα ρεύματος του ηλεκτρολύτη στις θυσιαζόμενες ανόδους

6.5.4 Διαδικασία μοντελοποίησης

Ανοίγουμε το λογισμικό.

Model Wizard

1. Στο παράθυρο του Model Wizard =>
2. Επιλέγουμε 3D στο πεδίο Select Space Dimensions και κατόπιν =>
3. Επιλέγουμε επόμενο =>
4. Στο πεδίο Add physics, επιλέγουμε Electrochemistry (Ηλεκτροχημεία) και =>Primary Current Distribution (siec) κατανομή ρεύματος πρώτης τάξης =>
5. Επιλέγουμε επόμενο =>
6. Στο πεδίο Select Study Type, επιλέγουμε Stationary (στατικώς) =>
7. Επιλέγουμε Finish.

Parameters

1. Στο παράθυρο του Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ στο σημείο Global Definitions και επιλέγουμε Parameters
2. Στο πεδίο Parameters γράφουμε τις παραμέτρους αναλυτικά (βλέπε πίνακα 6.2) ή τις εισάγουμε από αρχείο.

Geometry (Δημιουργία γεωμετρίας μοντέλου)

Η γεωμετρία είναι κοινή και για τις δύο μεθόδους προστασίας (την έχουμε ήδη δώσει αναλυτικά), διαφέρει όμως όσον αφορά τη γεωμετρία του ηλεκτρολύτη. Για να δημιουργήσουμε τη γεωμετρία του ηλεκτρολύτη αρκεί να φτιάξουμε δύο κυλίνδρους και να αφαιρέσουμε τις επιφάνειες που δημιουργούνται.

Cylinder 1

Προσθέτω ένα κύλινδρο (περιβάλλον) γύρω από τη δεδομένη κατασκευή μας.

1. Στο παράθυρο του Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ στο σημείο Geometry 1 και επιλέγουμε την εντολή Cylinder
2. Στο παράθυρο του Cylinder, στο πεδίο Object Type επιλέγουμε από τη λίστα επιλογής, Solid
3. Στο πεδίο Size and Shape, Radius πληκτρολογούμε 50 και Height πληκτρολογούμε 155.
4. Στο πεδίο Axis, Axis type επιλέγουμε από τη λίστα επιλογής, x- Axis.

Cylinder 2

Προσθέτω ένα δεύτερο κύλινδρο με μεγαλύτερη ακτίνα, αυτός ο κύλινδρος θα χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει το άπειρο στοιχείο του χώρου.

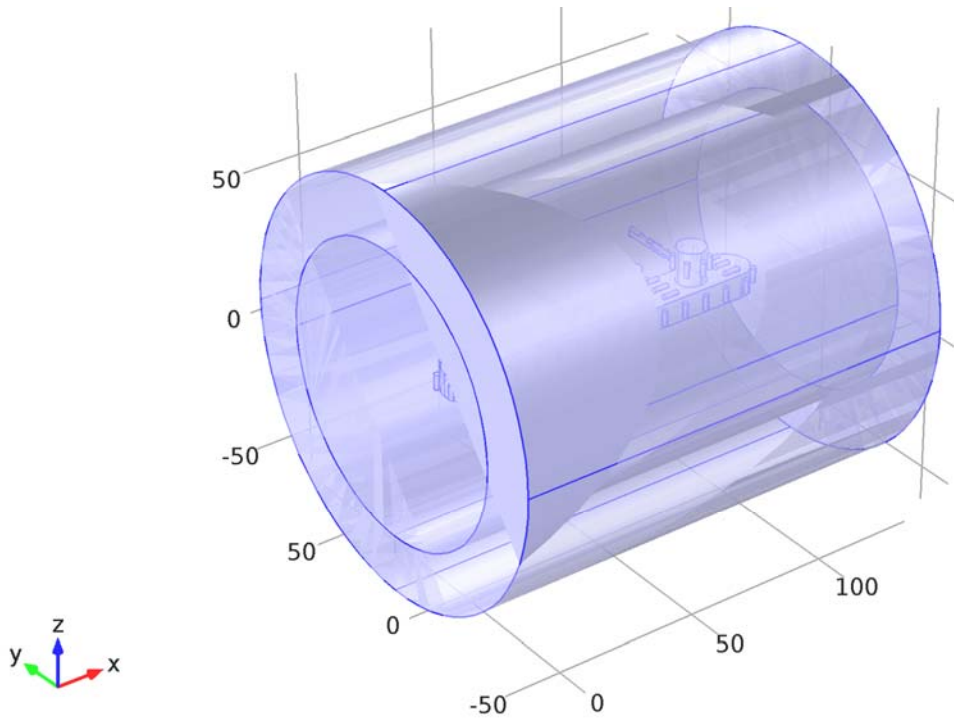
1. Στο παράθυρο του Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ στο σημείο Geometry 1 και επιλέγουμε την εντολή Cylinder
2. Στο παράθυρο του Cylinder, στο πεδίο Object Type επιλέγουμε από τη λίστα επιλογής, Solid
3. Στο πεδίο Size and Shape, Radius πληκτρολογούμε 70 και Height πληκτρολογούμε 155.
4. Στο πεδίο Axis, Axis type επιλέγουμε από τη λίστα επιλογής, x- Axis.

Difference 1

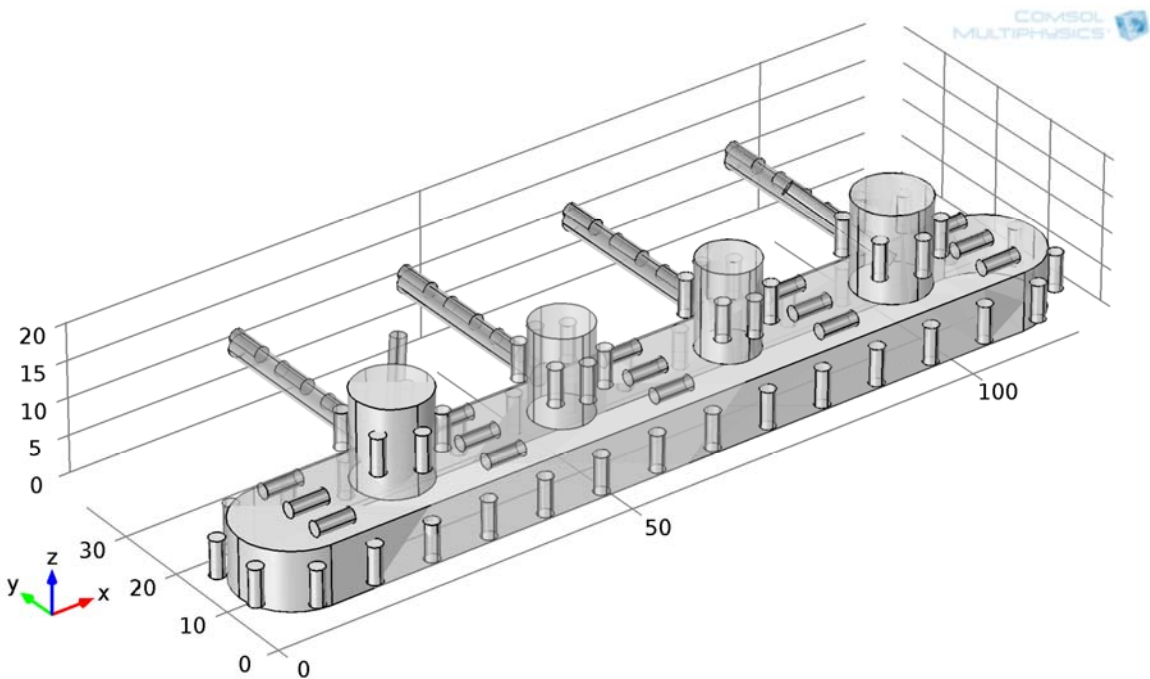
Δημιουργούμε την τελική γεωμετρία ως τη διαφορά μεταξύ των κυλίνδρων και της δεδομένης κατασκευής.

1. Στο παράθυρο του Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ στο Geometry 1 και επιλέγουμε την εντολή Boolean Operations=>Difference
2. Στο παράθυρο Difference, στο σημείο Objects to add =>Manual και πατάμε το κουμπί Activate Selection και επιλέγουμε cyl1 και cyl2
3. Στο σημείο Objects to subtract =>Manual και πατάμε το κουμπί Activate Selection και επιλέγουμε τη γεωμετρία της κατασκευής
4. Πατάμε το κουμπί Build Selected

Η τελική γεωμετρία αναπαρίσταται στα επόμενα σχήματα (βλέπε σχήμα 6.22 και σχήμα 6.23).



Σχήμα 6.22: Απεικόνιση της μισής γεωμετρίας για τη δεδομένη πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή μαζί με τον ηλεκτρολύτη (transparency)



Σχήμα 6.23: Απεικόνιση της μισής γεωμετρίας για τη δεδομένη πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή (transparency)

Definitions

Στο παράθυρο του Model Builder, ξεδιπλώνοντας το Model 1=>Definitions node.

Infinite Element Domain 1

Θα θέσουμε στον εξωτερικό κύλινδρο συνοριακές συνθήκες (άπειρο).

1. Κάνουμε δεξί κλικ στο Definitions και επιλέγουμε την εντολή Infinite Element Domain.
2. Στο παράθυρο Infinite Element Domain, στο πεδίο Domain selection επιλέγουμε Manual και επιλέγουμε 1.
3. Στο παράθυρο Infinite Element Domain, στο πεδίο Geometry, στο σημείο Type, επιλέγουμε Cylindrical.

Difference 1

Δημιουργούμε επιλογή για τις ανόδους χρησιμοποιώντας την αφαίρεση μεταξύ των επιλογών που δημιουργήθηκαν.

1. Στο παράθυρο του Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ στο Definitions και επιλέγουμε την εντολή Selections=>Difference.
2. Στο παράθυρο του Difference, στο πεδίο Geometric Entity Level από τη λίστα επιλέγουμε Boundary.
3. Στο πεδίο Input Entities κάτω από το Selections to add, πατάμε το κουμπί Add
4. Στο παράθυρο Add, από τη λίστα επιλογής, επιλέγουμε Import 1 (κατασκευή + άνοδοι). Πατάμε το κουμπί OK
5. Στο πεδίο Input Entities κάτω από το Selections to add, κάτω από Selections to subtract, πατάμε το κουμπί Add
6. Στο παράθυρο Add, από τη λίστα επιλογής στο Selections to subtract list, επιλέγουμε Import 2 (μόνο η κατασκευή)
7. Πατάμε το κουμπί OK.

Primary Current Distribution

Ξεκινάμε να θέτουμε το πρόβλημα. Θέτουμε συνοριακές συνθήκες για τις ανόδους και για την κάθοδο.

Electrolyte Current Density 1

1. Στο παράθυρο του Model Builder, κάτω από το Model 1, δεξί κλικ στο Primary Current Distribution και επιλέγουμε Electrolyte=>Electrolyte Current Density
2. Στο παράθυρο Electrolyte Current Density, στο πεδίο Boundary Selection από τη λίστα επιλογής, επιλέγουμε Manual => τις εξωτερικές επιφάνειες
3. Στο πεδίο Electrolyte Current Density στο $i_{n,1}$ πληκτρολογούμε i_{oxygen}

Electrolyte Potential 1

1. Στο παράθυρο του Model Builder, δεξί κλικ στο Primary Current Distribution και επιλέγουμε Electrolyte=>Electrolyte Potential
2. Στο παράθυρο Electrolyte Potential, στο πεδίο Boundary Selection από τη λίστα επιλογής, επιλέγουμε, Anodes.

Mesh 1

Το πρόβλημα έχει τεθεί πλήρως. Θα προσθέσουμε πλέγμα (mesh), ώστε να επιλύσουμε το μοντέλο. Δημιουργούμε πλέγμα με υψηλότερη ανάλυση στην κατασκευή και στις ανόδους και χαμηλότερη στον ηλεκτρολύτη. Στο γενικό size του πλέγματος είναι προεπιλεγμένο το normal.

1. Στο παράθυρο του Model Builder, κάτω από το Model 1 επιλέγουμε Mesh 1
2. Στο παράθυρο του Mesh, Mesh Settings, στο σημείο Sequence type από τη λίστα, επιλέγουμε User-controlled mesh.

Size

1. Στο παράθυρο του Model Builder, κάτω από το Model 1=> Mesh 1 και επιλέγουμε Size.
2. Στο παράθυρο Size, στο σημείο Element Size επιλέγουμε Coarser
3. Πατάμε το κουμπί Build All.

Επίσης,

1. Στο παράθυρο του Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ στο σημείο Mesh 1 και επιλέγουμε Free Tetrahedral.
2. Πηγαίνουμε στο παράθυρο Free Tetrahedral settings, στο πεδίο Domain Selection, στο σημείο Geometric entity level list, επιλέγουμε Domain.

3. Στο σημείο Select επιλέγουμε Manual και επιλέγουμε τον ηλεκτρολύτη.

Ξαναδημιουργούμε Free Tetrahedral

1. Στο παράθυρο του Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ στο σημείο Mesh 1 και επιλέγουμε Free Tetrahedral.
2. Πηγαίνουμε στο παράθυρο Free Tetrahedral settings, στο πεδίο Domain Selection, στο σημείο Geometric entity level list, επιλέγουμε Domain.
3. Στο σημείο Select επιλέγουμε Manual και επιλέγουμε την κατασκευή και τις ανόδους.

Καθορίζουμε μέγεθος.

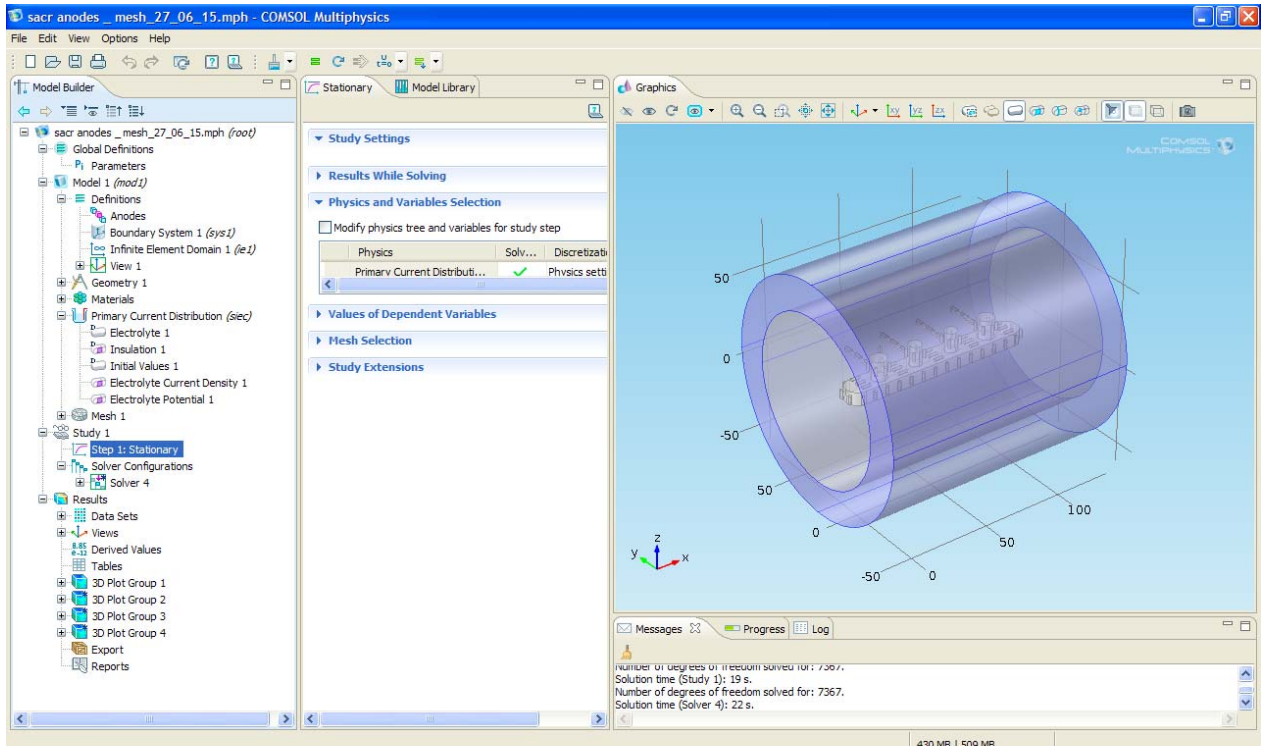
Size 1

1. Κάνουμε δεξί κλικ στο Free Tetrahedral 1 και επιλέγουμε Size
2. Πηγαίνουμε στο παράθυρο του Size, Geometric Entity Selection, στο πεδίο Geometric Entity level από την προκαθορισμένη λίστα, επιλέγουμε Domain και επιλέγουμε στο πεδίο Selections Manual.
3. Στο παράθυρο του Geometric Entity Selection, στο πεδίο Element Size => Από την προκαθορισμένη λίστα, επιλέγουμε fine.

Study 1 (βλέπε σχήμα 6.24)

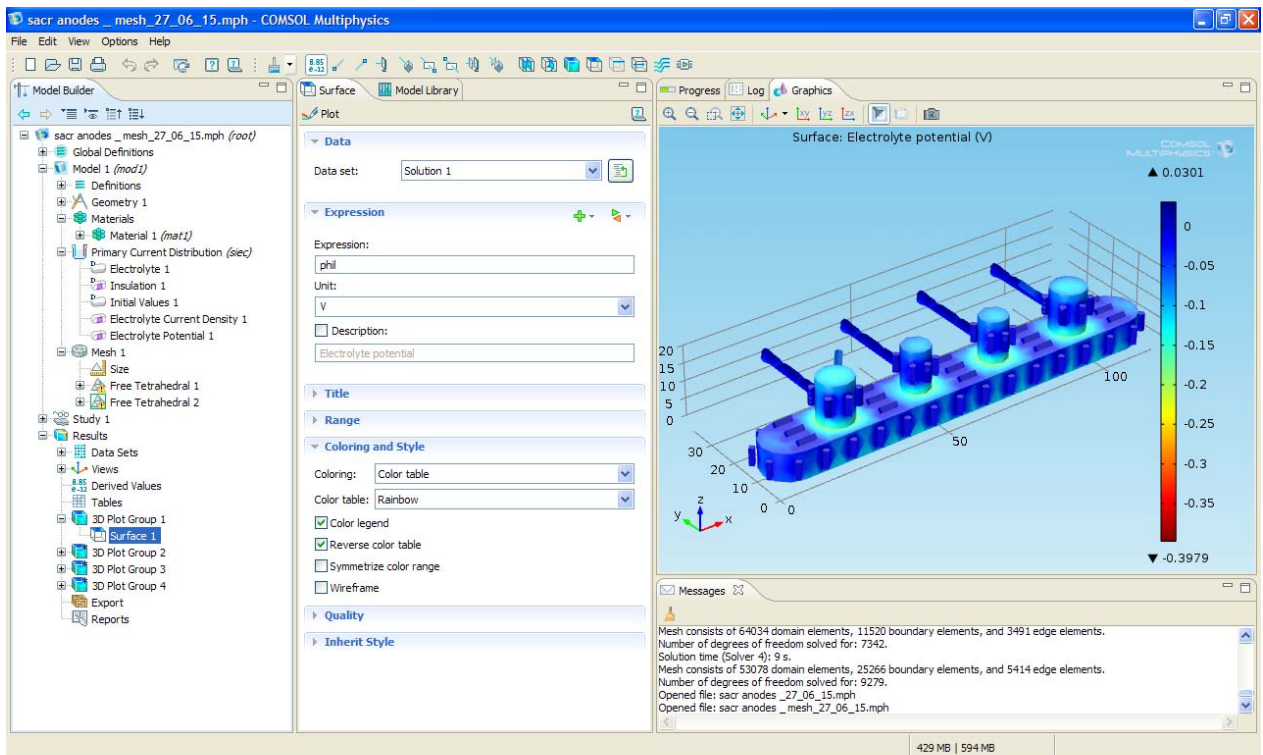
Επιλύουμε το πρόβλημα

1. Στο παράθυρο Model Builder, επιλέγουμε Study 1
2. Στο πεδίο Study settings από-επιλέγουμε την επιλογή Generate default plots
3. Πατάμε το κουμπί Compute



Σχήμα 6.24: Απεικόνιση της επίλυσης από το λογισμικό (μνήμη RAM ηλεκτρονικού υπολογιστή 2GB)

Results (βλέπε σχήμα 6.25)



Σχήμα 6.25: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων της κατανομής δυναμικού του ηλεκτρολύτη από το λογισμικό

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο

ΓΕΝΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΛΥΣΗΣ

7.1 Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων

Στο προηγούμενο κεφάλαιο ακολουθήθηκε η διαδικασία αυτή για να εξακριβωθεί κατά κύριο λόγο, αν η επιλογή των θέσεων των ανόδων είναι σωστή ως προς την καλύτερη δυνατή κατανομή δυναμικού προστασίας και κατά δεύτερον, εάν έχουμε προστατέψει επαρκώς. Όμως δεν αρκεί μόνο αυτό για να ελεγχθεί κατά πόσο τα αποτελέσματα είναι ορθά σε ένα λογισμικό προσεγγιστικών λύσεων πρέπει με κάποιο τρόπο να προσδιοριστεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Η επίλυση του προβλήματος μέσω του λογισμικού με πεπερασμένα στοιχεία COMSOL Multiphysics® 4.3b περιλάμβανε τα εξής στάδια:

1. *Προεπεξεργασία (Preprocessing)*
2. *Επίλυση (Solution)*
3. *Μετεπεξεργασία (Postprocessing)*

Στο στάδιο της προεπεξεργασίας γίνεται ο σχεδιασμός του μοντέλου, η επιλογή του κατάλληλου τύπου στοιχείων, η εισαγωγή παραμέτρων και συνοριακών συνθηκών του μοντέλου, η διακριτοποίηση της κατασκευής και η δημιουργία τελικού πλέγματος. Κατά την επίλυση γίνεται επιλογή του τύπου της ανάλυσης βάση του οποίου γίνεται η επίλυση του προβλήματος και κατά τη μετεπεξεργασία γίνεται αξιολόγηση και ανάλυση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων από την επίλυση. Ένας σημαντικός παράγοντας που επεμβαίνει στην διασφάλιση της ακρίβειας λύσης είναι η κατάλληλη ανάλυση πλέγματος (έλεγχος σύγκλισης).

7.2 Διερεύνηση σύγκλισης (Convergence Analysis)

Για να προσδιοριστεί η ακρίβεια του υπολογιζόμενου δυναμικού ηλεκτρολύτη στην κατασκευή και στις ανόδους, μπορούμε να προχωρήσουμε σε έλεγχο σύγκλισης με τη χρήση όλων των διαθέσιμων μεγεθών ανάλυσης πλέγματος και ως εκ τούτου διαφορετικού αριθμού βαθμών ελευθερίας (DOFs) και να ελέγξουμε τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Πιο αναλυτικά ξεκινώντας από την πυκνότερη ανάλυση πλέγματος και καταλήγοντας στην αραιότερη και ως εκ τούτου μικρότερο αριθμό βαθμών ελευθερίας (DOFs) και θα μελετήσουμε τα εξαγόμενα αποτελέσματα, κάνοντας παραμετρική ανάλυση, ώστε να διαπιστωθεί σε ποια συγκεκριμένη ανάλυση συγκλίνει.

[1] Ανάλυση πλέγματος *Extremely Fine*

Σύμφωνα με το λογισμικό με αυτή την ανάλυση προκύπτουν τα παρακάτω στοιχεία:

Max Electrolyte Potential: out of memory in mesh process.

Min Electrolyte Potential: out of memory in mesh process.

Degrees of freedom solved for: out of memory in mesh process.

Number of domain elements (Tetrahedral): out of memory in mesh process.

Δεν επιλύθηκε στη δεδομένη ανάλυση, διότι δεν επαρκούσε η μνήμη του υπολογιστή μας κατά τη διεργασία δημιουργίας πλέγματος.

[2] Ανάλυση πλέγματος *Extra Fine*

Σύμφωνα με το λογισμικό με αυτή την ανάλυση προκύπτουν τα παρακάτω στοιχεία:

Max Electrolyte Potential: out of memory during assembly

Min Electrolyte Potential: out of memory during assembly

Degrees of freedom solved for: 74671

Number of domain elements (Tetrahedral): 607041

Δημιουργήθηκε πλέγμα (για αυτό υπάρχουν οι βαθμοί ελευθερίας και σύνολο των στοιχείων), αλλά δεν επιλύθηκε στη δεδομένη ανάλυση, διότι δεν επαρκούσε η μνήμη του υπολογιστή μας κατά τη διεργασία επίλυσης.

[3] Ανάλυση πλέγματος *Finer*

Σύμφωνα με το λογισμικό με αυτή την ανάλυση προκύπτουν τα παρακάτω στοιχεία:

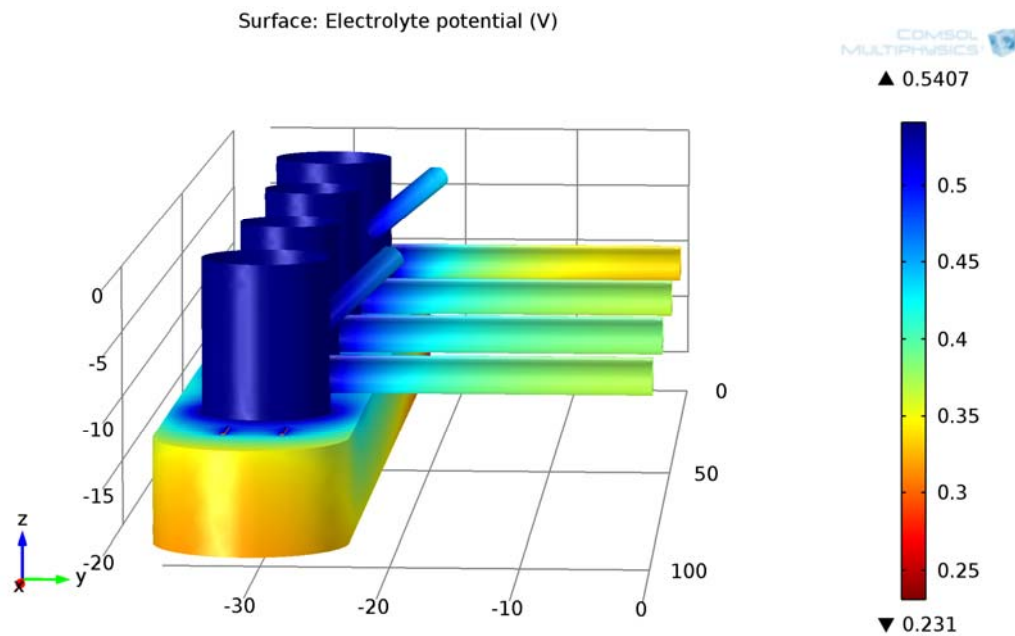
Max Electrolyte Potential: 0,54073 V

Min Electrolyte Potential: 0,23099 V

Degrees of freedom solved for: 60692

Number of domain elements (Tetrahedral): 530925

Και το διαγραμματικό αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 7.1 που ακολουθεί.



Σχήμα 7.1: Η κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στις ανόδους και στην πλωτή κατασκευή (Mesh: *Finer*)

[4] Ανάλυση πλέγματος Fine

Σύμφωνα με το λογισμικό με αυτή την ανάλυση έχουμε τα εξής στοιχεία:

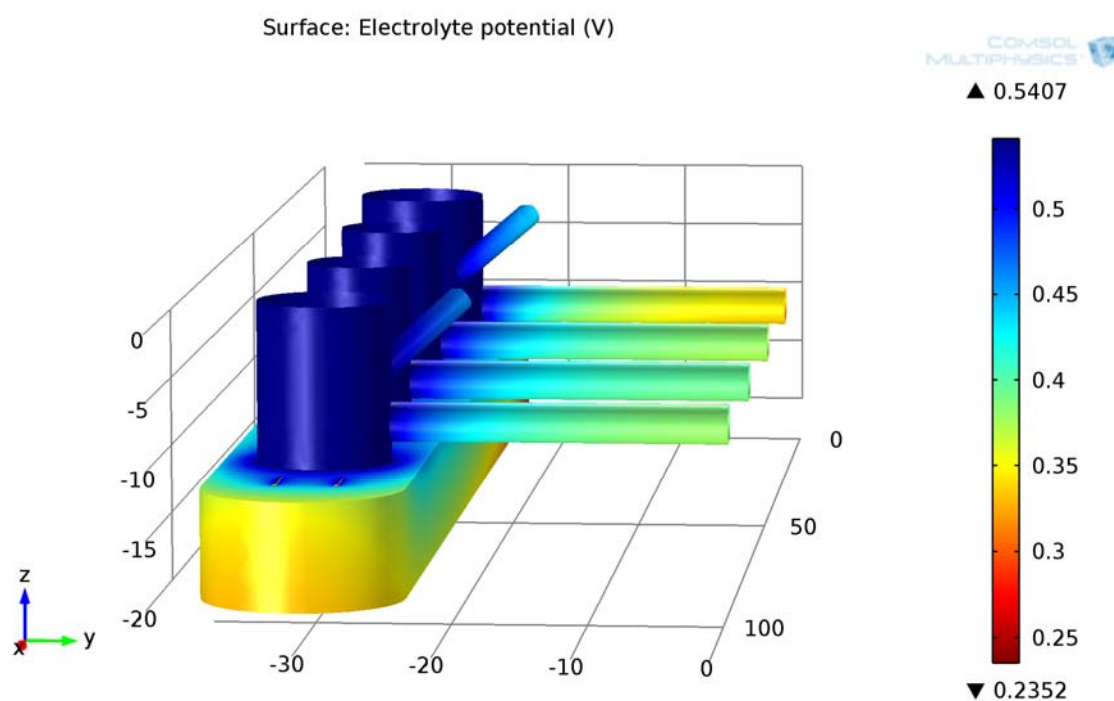
Max Electrolyte Potential: 0,54071 V

Min Electrolyte Potential: 0,23524 V

Degrees of freedom solved for: 53078

Number of domain elements (Tetrahedral): 488273

Και το διαγραμματικό αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 7.2 που ακολουθεί.



Σχήμα 7.2: Η κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στις ανόδους και στην πλωτή κατασκευή (Mesh: Fine)

[5] Ανάλυση πλέγματος Normal

Σύμφωνα με το λογισμικό με αυτή την ανάλυση προκύπτουν τα παρακάτω στοιχεία:

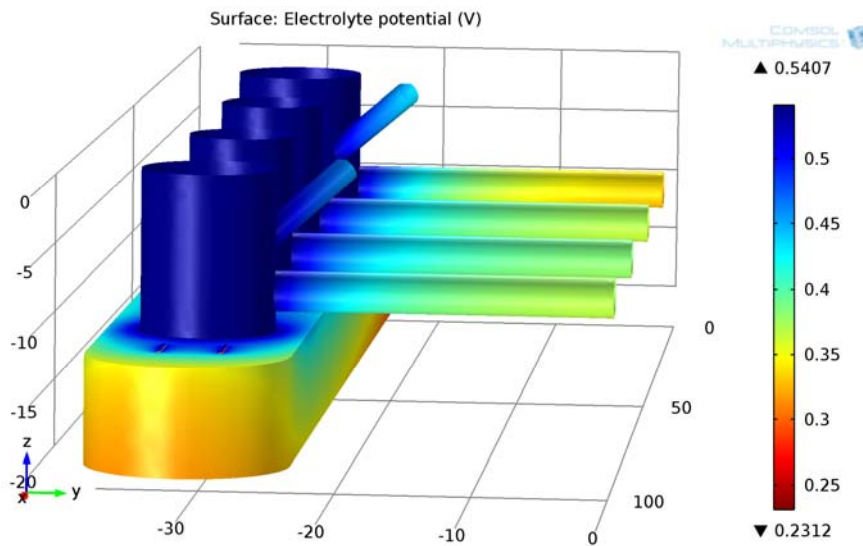
Max Electrolyte Potential: 0,54074 V

Min Electrolyte Potential: 0,2312 V

Degrees of freedom solved for: 47808

Number of domain elements (Tetrahedral): 457645

Και το διαγραμματικό αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 7.3 που ακολουθεί.



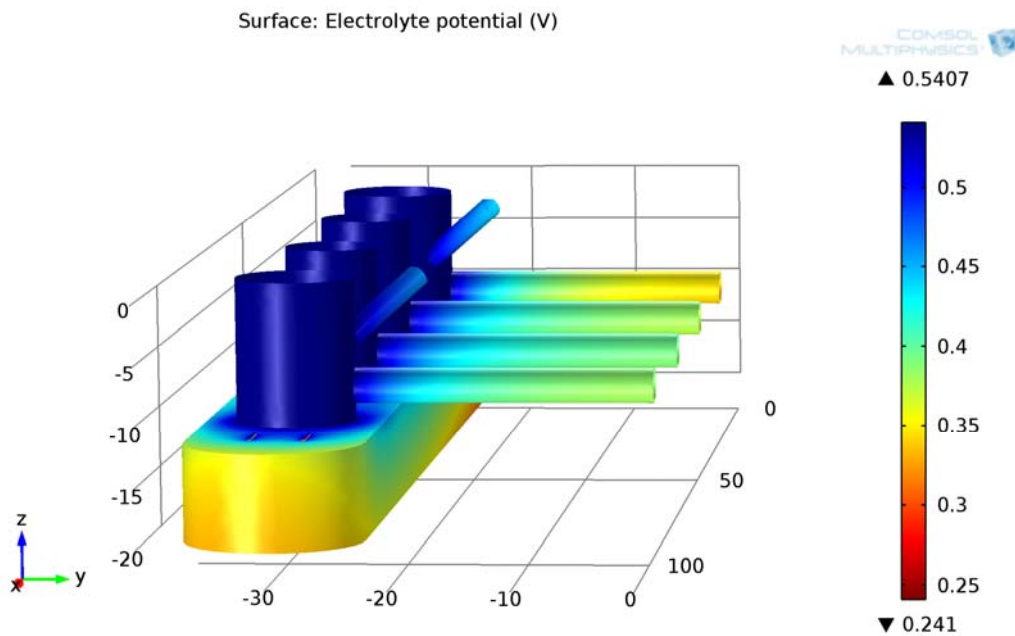
Σχήμα 7.3: Η κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στις ανόδους και στην πλωτή κατασκευή (Mesh: Normal)

[6] Ανάλυση πλέγματος *Coarse*

Σύμφωνα με το λογισμικό με αυτή την ανάλυση προκύπτουν τα παρακάτω στοιχεία:

Max Electrolyte Potential: 0,5407 V
Min Electrolyte Potential: 0,24101V
Degrees of freedom solved for: 40153
Number of domain elements (Tetrahedral): 412987

Και το διαγραμματικό αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 7.4 που ακολουθεί.



Σχήμα 7.4: Η κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στις ανόδους και στην πλωτή κατασκευή (Mesh: Coarse)

[7] Ανάλυση πλέγματος Coarser

Σύμφωνα με το λογισμικό με αυτή την ανάλυση προκύπτουν τα παρακάτω στοιχεία:

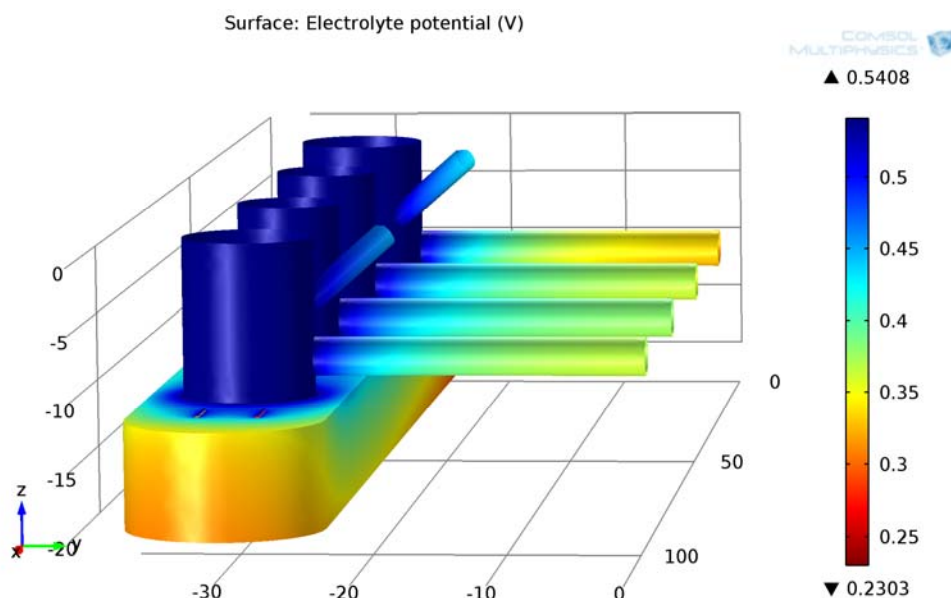
Max Electrolyte Potential: 0,54076 V

Min Electrolyte Potential: 0,2303 V

Degrees of freedom solved for: 34949

Number of domain elements (Tetrahedral): 382719

Και το διαγραμματικό αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 7.5 που ακολουθεί.



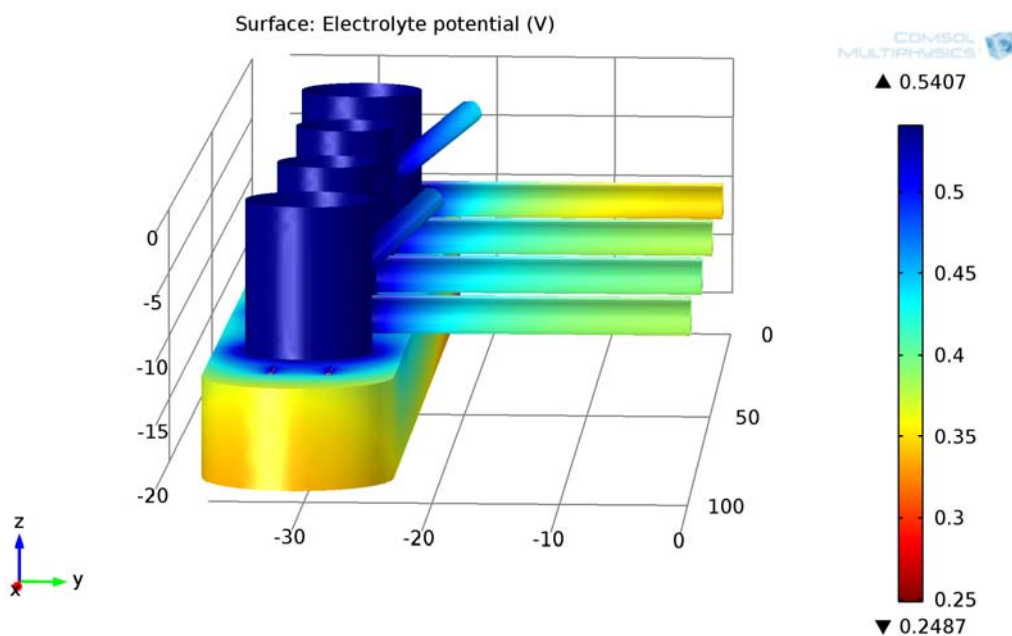
Σχήμα 7.5: Η κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στις ανόδους και στην πλωτή κατασκευή (Mesh: Coarser)

[8] Ανάλυση πλέγματος Extra Coarse

Σύμφωνα με το λογισμικό με αυτή την ανάλυση προκύπτουν τα παρακάτω στοιχεία:

Max Electrolyte Potential: 0,5407 V
 Min Electrolyte Potential: 0,24874 V
 Degrees of freedom solved for: 29615
 Number of domain elements (Tetrahedral): 350876

Και το διαγραμματικό αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 7.6 που ακολουθεί.



Σχήμα 7.6: Η κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στις ανόδους και στην πλωτή κατασκευή (Mesh: Extra Coarse)

[9] Ανάλυση πλέγματος *Extremely Coarse*

Σύμφωνα με το λογισμικό με αυτή την ανάλυση προκύπτουν τα παρακάτω στοιχεία:

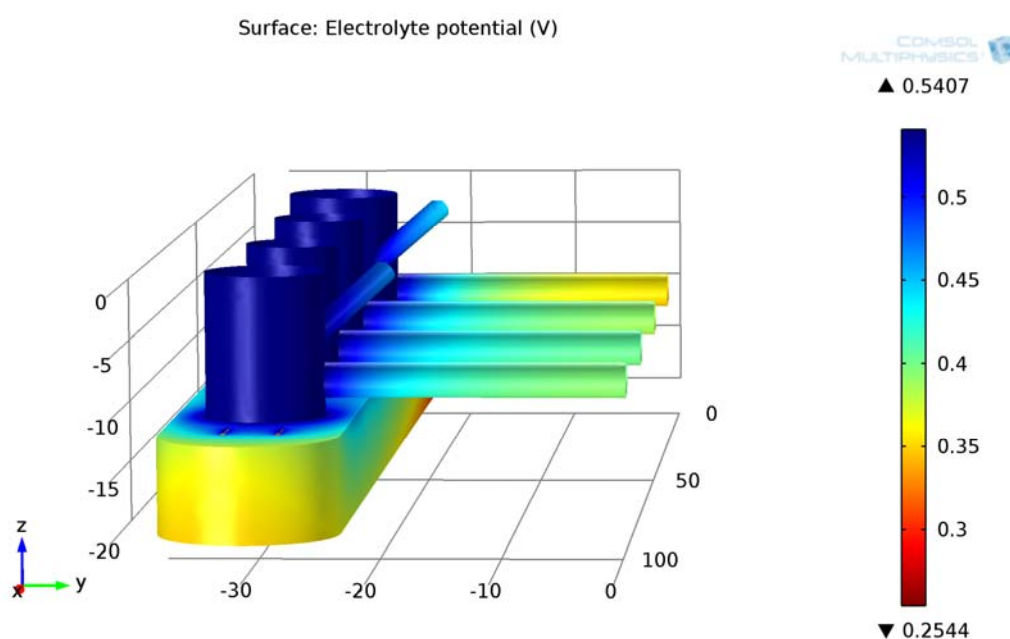
Max Electrolyte Potential: 0,54066 V

Min Electrolyte Potential: 0,25435 V

Degrees of freedom solved for: 26306

Number of domain elements (Tetrahedral): 330488

Και το διαγραμματικό αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 7.7 που ακολουθεί.



Σχήμα 7.7: Η κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στις ανόδους και στην πλωτή κατασκευή (Mesh: *Extremely Coarse*)

Με την προηγούμενη επαναληπτική διαδικασία, ουσιαστικά πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση, ώστε να διαπιστωθεί για ποια συγκεκριμένη ανάλυση πλέγματος γίνεται σύγκλιση τιμών (όσον αφορά τη μέγιστη τιμή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη). Για τον έλεγχο αυτό παρατίθεται ο πίνακας 7.1 των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 7.1: Η παραμετρική ανάλυση των αποτελεσμάτων σε όλες τις δυνατές αναλύσεις πλέγματος

a/a	Element size	Number of domain elements (Tetrahedral)	Degrees of freedom solved for:	Max Electrolyte Potential (V)	Min Electrolyte Potential (V)
1	Extremely Fine	out of memory in mesh process.	out of memory in mesh process.	out of memory in mesh process.	out of memory in mesh process.
2	Extra Fine	607041	74671	out of memory during assembly	out of memory during assembly
3	Finer	530925	60692	0,54073	0,23099
4	Fine	488273	53078	0,54071	0,23524
5	Normal	457645	47808	0,54074	0,2312
6	Coarse	412987	40153	0,5407	0,24101
7	Coarser	382719	34949	0,54076	0,2303
8	Extra Coarse	350876	29615	0,5407	0,24874
9	Extremely Coarse	330488	26306	0,54066	0,25435

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις διάφορες αναλύσεις πλέγματος (Extremely Fine, Extra Fine, Finer, Fine, Normal, Coarse, Coarser, Extra Coarse, Extremely Coarse), παρατηρείται ότι σύγκλιση επιτυγχάνεται και στην ανάλυση πλέγματος Fine και στην ανάλυση πλέγματος Coarse. Και στις δύο αυτές αναλύσεις πλέγματος θεωρήθηκε ότι η λύση είναι ακριβής, οπότε αποδεχόμαστε ως πιο ακριβή λύση την τιμή 0,54071 (τη μεγαλύτερη ανάλυση από τις δύο). Ο έλεγχος σύγκλισης έγινε ως προς την τιμή Max Electrolyte Potential. Οπότε αποδεκτή τιμή θεωρήθηκε η τιμή 0,54071V της ανάλυσης πλέγματος Fine.

Διευκρίνιση: Επειδή η ανάλυση πλέγματος της πλωτής κατασκευής πραγματοποιήθηκε στο μέγιστο δυνατό επίπεδο (Extremely fine), για τις δοκιμές σύγκλισης επιλέξαμε να διαφοροποιήσουμε την ανάλυση πλέγματος του ηλεκτρολύτη.

Παραμετροποίηση του πλέγματος (parameterizing the mesh)

Έγινε προσπάθεια να οριστεί μια παραμετρική σάρωση του πλέγματος, ώστε να ελέγξουμε την καταλληλότητα του μεγέθους του πλέγματος (refining the mesh size). Ας προσδιορίσουμε τις παραμέτρους που μας είναι απαραίτητες για να ελέγξουμε την πυκνότητα του πλέγματος.

Element size divider => 1

Starting element size => 0.01

Επίσης πρέπει να ορίσουμε την παραμετρική σάρωση του πλέγματος και στο πεδίο solver με εύρος τιμών range (1,1,6). Δυστυχώς δεν μπορούμε να προχωρήσουμε σε παραμετρική ανάλυση του πλέγματος, απευθείας από το λογισμικό αν και αναμενόμενο διότι απαιτεί υψηλή μνήμη. Το λογισμικό βγάζει το εξής μήνυμα:

```
Error in multiphysics compilation. Problem setting up multigrid.
Failed to build feature 'Free Tetrahedral 1' in sequence 'Mesh 1'.
Out of memory in mesh processing.
```

7.3 Γενικά αποτελέσματα^[11]

Στην παράγραφο αυτή θα αναλυθούν τα εξαγόμενα αποτελέσματα από το λογισμικό για την αποδεκτή ανάλυση πλέγματος που εξευρέθηκε στην προηγούμενη παράγραφο μετά από επαναληπτική διαδικασία όλων των δυνατών αναλύσεων πλέγματος.

Δημιουργία πλέγματος στοιχείων:

Το πλέγμα στοιχείων που δημιουργούμε σε ένα μοντέλο είναι πολύ σημαντικό, καθώς από αυτό επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό η ποιότητα των αποτελεσμάτων, ο χρόνος επίλυσης και η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται. Οι παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη δημιουργία πλέγματος είναι:

1. **Ο αριθμός των στοιχείων και κατά συνέπεια το μέγεθος των στοιχείων αυτών**
2. **Το είδος πλέγματος συγκροτημένο ή ελεύθερο (structure or free mesh)**
3. **Ο τύπος στοιχείων**

Εφαρμόστηκε ένα μέγεθος στοιχείων (Element Size):

- **Λεπτό (Fine)** για τον ηλεκτρολύτη με minimum element size: 2,15 m και maximum element size: 17,2 m.
- **Εξαιρετικά λεπτό (Extremely fine)** για την πλωτή κατασκευή με minimum element size: 0,043 m και maximum element size: 4,3 m.

Τα μεγέθη αυτά (element size) τα δημιουργεί το λογισμικό, ανάλογα με το μέγεθος της κατασκευής προς μελέτη. Η μεγάλη διαφορά των minimum element size και maximum element οφείλεται στην υπερβολικά μικρή διάσταση των ανόδων και των ηλεκτροδίων αναφοράς του συστήματος ICCP, συγκριτικά με το μεγάλο μέγεθος της κατασκευής.

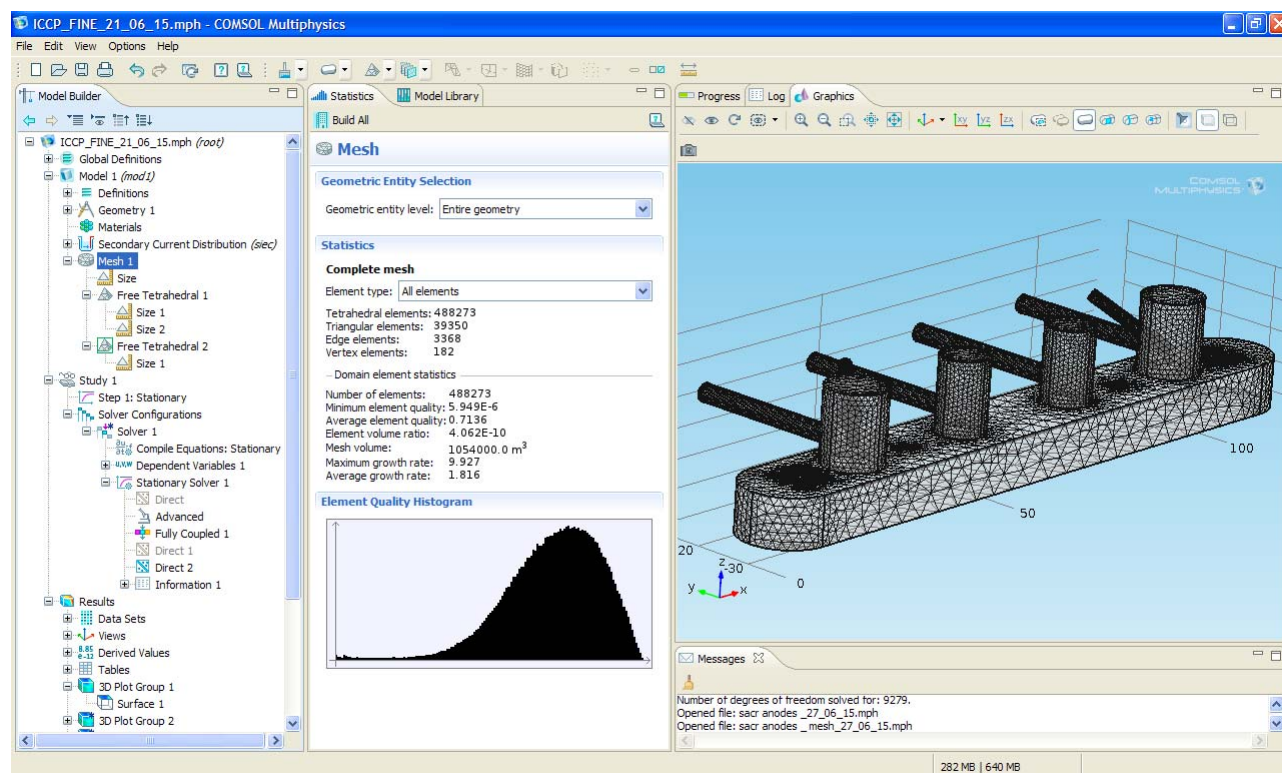
Είδος πλέγματος:

Ελεύθερο τετραεδρικό (Free Tetrahedral)

Ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του πλέγματος (όλης της γεωμετρίας) ήταν:

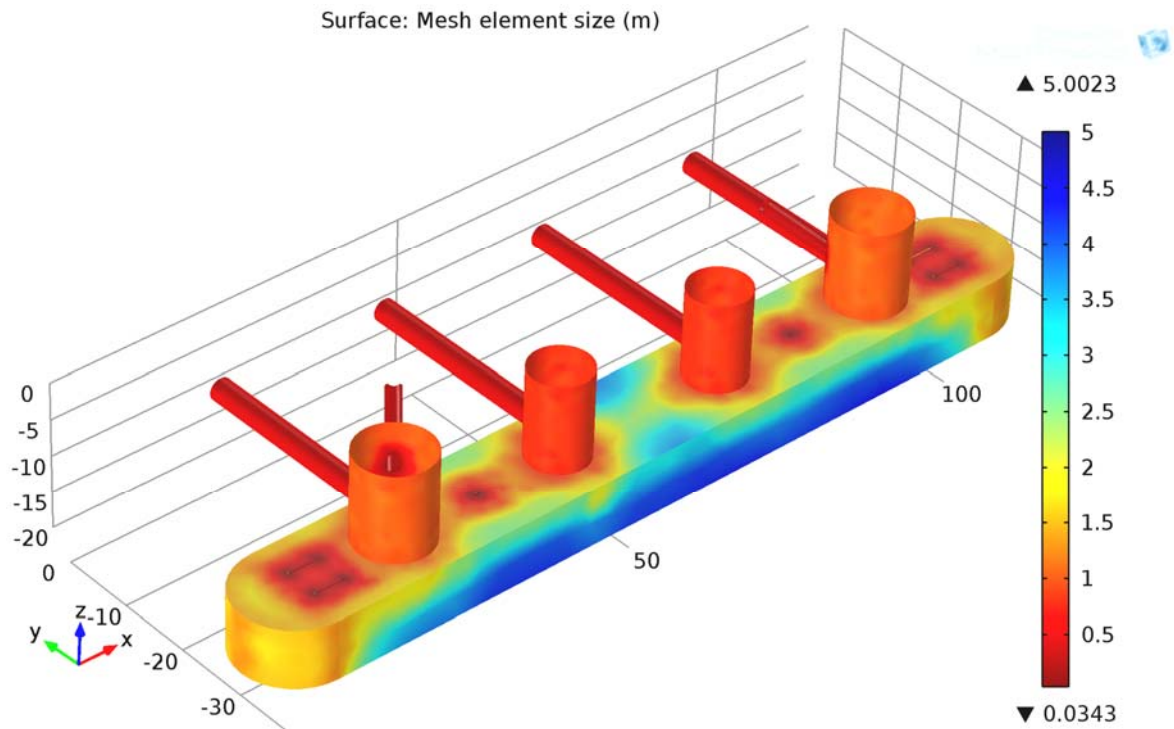
Tetrahedral elements: 488273
 Triangular elements: 39350
 Edge elements: 3368
 Vertex elements: 182

Πιο αναλυτικά παρακάτω δίνεται ένα στιγμιότυπο από το λογισμικό κατά την ολοκλήρωση της εντολής στατιστικά στοιχεία πλέγματος με όλα τα προηγούμενα στοιχεία (βλέπε σχήμα 7.8). Στο μεσαίο τμήμα του σχήματος, διαφαίνεται ένα γράφημα (καμπύλη) που περιγράφει (χρονικά) την ποιότητα πλέγματος κατά το διάστημα δημιουργίας του. Όταν υπάρχουν προβλήματα (errors) ή τεχνικές δυσκολίες κατά τη δημιουργία πλέγματος η καμπύλη δεν παρουσιάζει ομαλότητα. Είναι μια πληροφορία του λογισμικού που διευκολύνει το χρήστη για την άμεση εξακρίβωση κατά πόσον το δημιουργηθέν πλέγμα μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητικό.

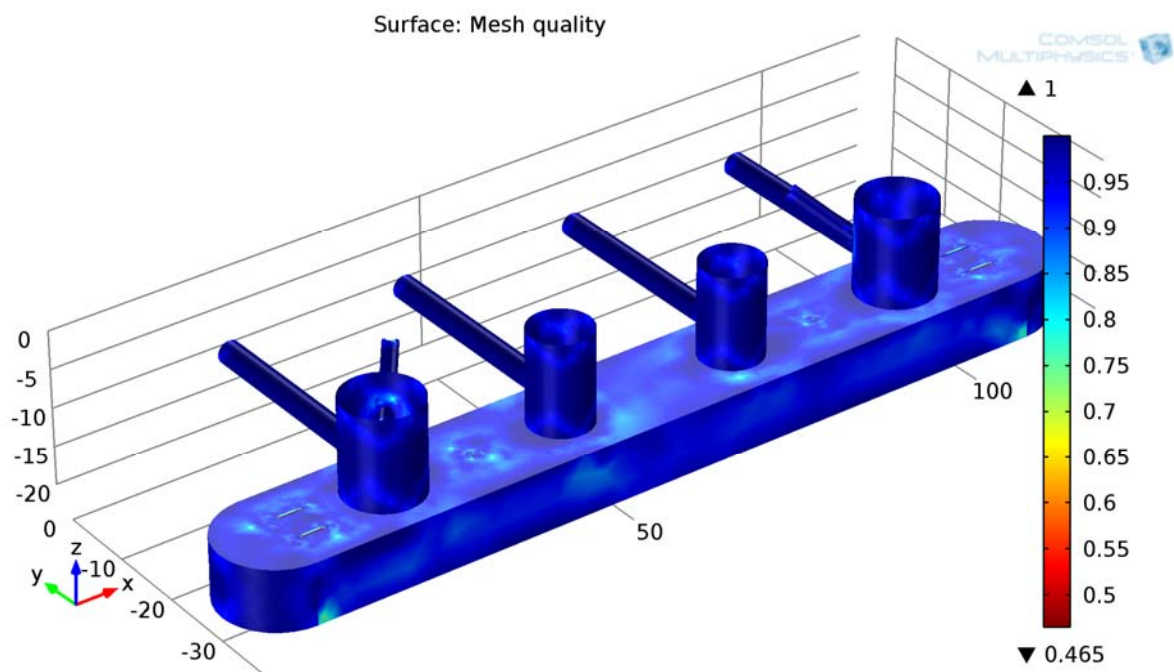


Σχήμα 7.8: Στατιστικά στοιχεία της ανάλυσης πλέγματος από το λογισμικό

Κατά την επίλυση, προέκυψαν κάποια συμπεράσματα σχετικά με την ποιότητα και το μέγεθος του πλέγματος που εμφανίζονται στα εξαγόμενα αποτελέσματα (βλέπε σχήμα 7.9 και 7.10).



Σχήμα 7.9: Το μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος που εφαρμόστηκε



Σχήμα 7.10: Η ποιότητα των στοιχείων του πλέγματος που εφαρμόστηκε

7.3.1 Επίλυση (Solution)

Στο στάδιο αυτό ουσιαστικά γίνεται επιλογή του τύπου της ανάλυσης βάσει του οποίου θα γίνει η επίλυση του προβλήματος. Η ανάλυση μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική, για το πρόβλημα προς μελέτη επιλέγεται γραμμική. Το λογισμικό κατά την ολοκλήρωση της επίλυσης μας παρέχει κάποιες εσωτερικές πληροφορίες.

Παράρτημα λογισμικού

Complete mesh consists of 488273 domain elements, 39350 boundary elements, and 3368 edge elements. Number of degrees of freedom solved for: 53078. Solution time (Solver 1): 162 s. (2 minutes, 42 seconds)

Stationary Solver 1 in Solver 1 started at 28-Iouy-2015 14:43:56.

Nonlinear solver

Number of degrees of freedom solved for: 53078.

Nonsymmetric matrix found.

Scales for dependent variables:

Electrolyte potential (mod1.phil): 0.074

Auxiliary dependent variable root.mod1.phil_bemflux
(mod1.phil_bemflux): 0.12

Electrolyte potential at infinity

(mod1.root.mod1.siec.philinf_inficel1): 0.5

Iter	ErrEst	Damping	Stepsize	#Res	#Jac	#Sol
1	0.00049	1.0000000	0.7	2	1	2
2	2.6e-005	1.0000000	0.00068	3	2	4

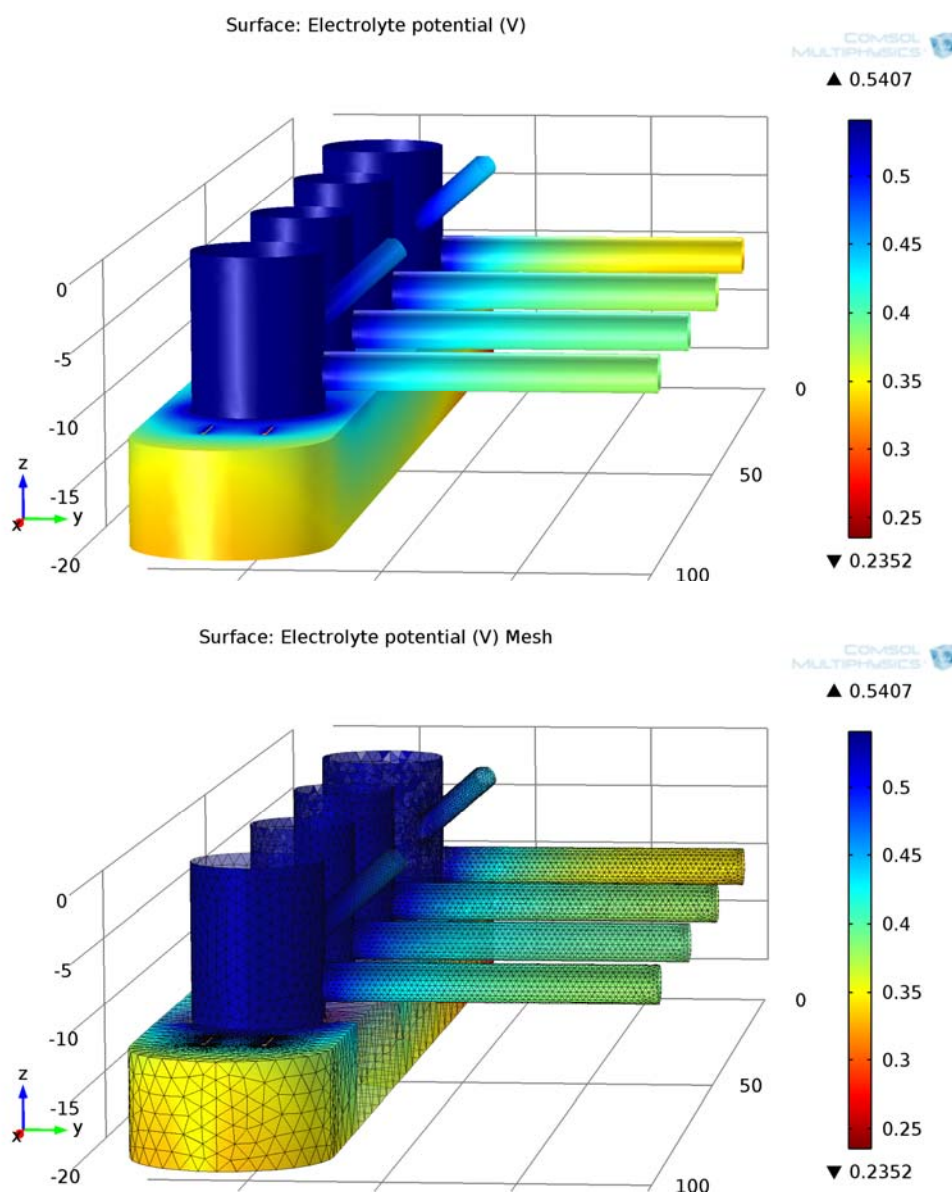
Stationary Solver 1 in Solver 1: Solution time: 148 s (2 minutes, 28 seconds)

Physical memory: 571 MB

Virtual memory: 765 MB

7.3.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Για να εξακριβωθεί κατά πόσον η επιλογή των θέσεων των ανόδων είναι η καλύτερη δυνατή και να διαπιστωθεί εάν η πλωτή υπεράκτια κατασκευή έχει προστατευθεί επαρκώς, αρκεί να μελετηθούν τα αποτελέσματα κατανομής δυναμικού του ηλεκτρολύτη (σχήμα 7.11). Τα υπόλοιπα αποτελέσματα (βλέπε κεφ. 6) βοηθούν να κατανοηθεί καλύτερα το επίπεδο καθοδικής προστασίας που επιβλήθηκε και κατά πόσο η κατανομή είναι ομοιόμορφη ή όχι. Γίνεται ανάλυση της περίπτωσης καθοδικής προστασίας με τη μέθοδο ICCP, που είναι η προτεινόμενη λύση για το μέγεθος της πλωτής κατασκευής που μελετάται.



Σχήμα 7.11: Η κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στις ανόδους και στην πλωτή κατασκευή

Στο προηγούμενο διάγραμμα (σχήμα 7.11) αναπαρίσταται το δυναμικό του ηλεκτρολύτη στη μεταλλική κατασκευή και στις ανόδους. Οι εξαγόμενες τιμές για το δυναμικό αυτό σε όλη τη μεταλλική κατασκευή ποικίλει, αναφορικά με την απόσταση από τις ανόδους. Η επιλογή των θέσεων των ανόδων προκαλεί μια σχετικά ομοιόμορφη κατανομή δυναμικού, αφού η διακύμανση τιμών μέγιστης - ελάχιστης τιμής δεν είναι μεγάλη.

Πώς κρίναμε από το προηγούμενο εξαγόμενο διάγραμμα δυναμικού του ηλεκτρολύτη (σχήμα 7.11) ότι το δυναμικό καθοδικής προστασίας κινείται σε αποδεκτές τιμές;

Μπορούμε να συσχετίσουμε το δυναμικό του ηλεκτρολύτη φ_l με το δυναμικό του ηλεκτροδίου, θεωρώντας ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς τοποθετημένο μέσα στον ηλεκτρολύτη, σε κοντινή απόσταση από την επιφάνεια του χάλυβα. Το ηλεκτρικό δυναμικό του ηλεκτροδίου αναφοράς $\varphi_{s, ref}$ τότε γίνεται:

$$\varphi_{s, ref} = E_{eq, ref} + \varphi_l \quad (1)$$

Χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl.

Το ηλεκτρικό δυναμικό στην επιφάνεια του χάλυβα φ_s , είναι σταθερό, λόγω της υψηλής αγωγιμότητας του μετάλλου και το δυναμικό της επιφάνειας του χάλυβα ως προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς γίνεται:

$$E_{vs, ref} = \varphi_s - \varphi_{s, ref} = \varphi_s - E_{eq, ref} - \varphi_l \quad (2)$$

$\varphi_{s, ref} = E_{eq, ref} +$ (τιμές του διαγράμματος), θα επιλέξουμε ενδεικτικά μια μέση τιμή από το διάγραμμα έστω 0,4 V.

$$\text{Από (1)} \Rightarrow \varphi_{s, ref} = 0,94 \text{ V},$$

οπότε έχουμε προστατεύει επαρκώς γιατί βρισκόμαστε στην περιοχή ιδανικής προστασίας.

Σύμφωνα με το νηογνώμονα για το ηλεκτρόδιο αναφοράς που χρησιμοποιήσαμε (βλέπε πίνακα 7.1):

Πίνακας 7.2 : Όρια δυναμικού (προστασίας) χάλυβα ως προς Ag /AgCl στο θαλασσινό νερό (Steel potential limits versus Ag/AgCl sea water)^[11]

Υλικό (Material)	Ανώτατο όριο (Upper limit) mV	Κατώτατο όριο για χάλυβα χωρίς επικαλύψεις (Lower limit for bare steel) mV
Ανθρακούχος χάλυβας		
• Αεριούχο θαλασσινό νερό	- 800	- 1100
• Μη αεριούχο θαλασσινό νερό	- 900	- 1100
Ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας		
• PREN ≥ 40	- 300 (1)	- 1100
• PREN < 40	- 500 (1)	- 1100
Duplex ανοξείδωτος χάλυβας	- 500 (1)	(2)
Μαρτενσιτικός ανοξείδωτος χάλυβας (13% Cr)	- 500 (1)	(2)

(1) Για ανοξείδωτους χάλυβες, τα ελάχιστα αρνητικά δυναμικά ισχύουν για αερόβιες και αναερόβιες συνθήκες.

(2) Ανάλογα με την αντοχή, την ειδική μεταλλουργική κατάσταση και το επίπεδο τάσεων που ανέκυσαν κατά τη λειτουργία, αυτά τα κράματα μπορεί να είναι επιρρεπή σε ευθραυστότητα λόγω υδρογόνου και σε ρωγμές. Αν υπάρχει κίνδυνος ευθραυστότητας λόγω υδρογόνου, τότε δυναμικά πιο αρνητικά από - 800mV πρέπει να αποφεύγονται.

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή για το ηλεκτρόδιο αναφοράς που χρησιμοποιήσαμε:

<u>Κλίμακα αισθητήρα Ag/AgCl σε millivolts</u>	<u>Κατάσταση</u>
0 - 650	Υπό προστασία (έντονη ηλεκτρολυτική δράση)
650 – 780	Μερική προστασία
780 – 1000	Ιδανική προστασία
1000 – 1500	Υπερπροστασία (κίνδυνος καταστροφής υφαλοχρωμάτων)

Συμπεράσματα

Με την ανάπτυξη της υπεράκτιας τεχνολογίας και επιστήμης, ώθηση δόθηκε επίσης και στο γνωστικό πεδίο της προστασίας από τη διάβρωση αυτών των κατασκευών με ιδιαίτερη έμφαση στην πρόληψη μέσω της καθοδική προστασίας. Με κύριο στόχο την εξασφάλιση ορθής λειτουργίας υφιστάμενων θαλασσίων κατασκευών, απαλλαγμένων από πληθώρα μηχανισμών υποβάθμισης της δομικής ακεραιότητας, απώλειας υλικού, απώλεια συνάφειας και απώλεια μηχανικών ιδιοτήτων. Πιο αναλυτικά, οι θαλάσσιες κατασκευές προστατεύονται από τη διάβρωση με συστήματα καθοδικής προστασίας σε συνδυασμό με παθητικές επιστρώσεις. Αρχικά, η πλειονότητα των κατασκευών είχαν υιοθετήσει τη μέθοδο καθοδικής προστασίας μέσω θυσιαζόμενων ανόδων (SACP). Η μέθοδος αυτή παρουσίαζε κάποιους περιορισμούς, διότι εξασφάλιζε την προστασία μόνο τοπικά γύρω από την άνοδο, χωρίς να μπορεί να προσαρμοστεί στις αλλαγές των περιβαλλοντικών συνθηκών, λόγω του σταθερού ρεύματος εξόδου. Επίσης παρουσίαζε υψηλό κόστος συντήρησης εξαιτίας της ανάγκης αντικατάστασης σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Πολύ γρήγορα όμως για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα προστασίας μεγάλων επιφανειών ή κατασκευών που δεν αναμένεται να δεξαμενίζονται τακτικά (οι οποίες θα απαιτούσαν πολυάριθμα τεμάχια ανόδων), μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση υιοθετήθηκε με το σύστημα καθοδικής προστασίας μέσω επιβαλλόμενου ρεύματος (ICCP). Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, όπως είναι η δυνατότητα ρύθμισης του ρεύματος εξόδου, το χαμηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης για μεγάλες επιφάνειες προστασίας, αφού δεν αντικαθίσταται τακτικά ενώ επιπλέον παρέχεται δυνατότητα διαρκούς παρακολούθησης, έτσι ώστε το επίπεδο προστασίας να διασφαλίζεται ανά πάσα στιγμή. Ωστόσο, τα συστήματα ICCP παρουσιάζουν τον κίνδυνο της υπερπροστασίας της κατασκευής (ιδιαίτερα κοντά στις ανόδους), που μπορεί να οδηγήσει στην υποβάθμιση των επιστρώσεων, σε ψαθυροποίηση από το υδρογόνο κ.α. Η ορθή τοποθέτηση των ανόδων και των ηλεκτροδίων αναφοράς είναι επομένως, ζωτικής σημασίας.

Οι πλωτές υπεράκτιες κατασκευές σε αντίθεση με τα παραδοσιακά εμπορικά πλοία, έχουν ειδικές απαιτήσεις για την προστασία της γάστρας, αφού αυτές δεν αναμένεται να δεξαμενίζονται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Η προστασία των δεξαμενών είναι εξίσου πολύπλοκη όσο και το ίδιο το πρόβλημα της διάβρωσης, που οφείλεται στο ότι σε αυτές επικρατούν πολύ ιδιαίτερες συνθήκες. Η σχεδίαση ενός συστήματος καθοδικής προστασίας και η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής προστασίας δεν είναι απλή υπόθεση αφού πλήθος παραγόντων είναι απαραίτητο να συνυπολογιστούν, όπως είναι η επιφάνεια προστασίας, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και συνθήκες λειτουργίας.

Μια εμπειριστατωμένη λύση καθοδικής προστασίας για μία πλωτή ημιβυθισμένη πλατφόρμα εξόρυξης υδρογονανθράκων επετεύχθη με τη χρήση λογισμικού με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method software), σύμφωνα με το οποίο πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του προβλήματος σε πραγματικές συνθήκες για την

καλύτερη δυνατή προστασία. Η διάβρωση εξαρτάται από ποικίλες παραμέτρους και φυσικές μεταβλητές που επιδρούν στο φαινόμενο. Η αλλαγή των συνθηκών και των θέσεων των ανόδων προστασίας διαφοροποιούσε την εξαγωγή αποτελεσμάτων και μόνο μέσω ενός λογισμικού μέσω της αριθμητικής ανάλυσης για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων με οριακές συνθήκες, θα μπορούσε να επιτεθεί μια ορθή επίλυση του προβλήματος. Διαπιστώθηκε επίσης ότι με τη χρήση των λογισμικών αυτών, εξασφαλίζεται η καλύτερη δυνατή εφαρμογή των προληπτικών μέτρων για την αναστολή της διάβρωσης με σκοπό την προστασία των υπεράκτιων κατασκευών.

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Αν και η τεχνολογική εξέλιξη γύρω από το θέμα της καθοδικής προστασίας είναι θεαματική, κυρίως με την εισαγωγή εξελιγμένων λογισμικών, τα οποία με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων προτυποποιούν το πρόβλημα της διάβρωσης για μια υπαρκτή θαλάσσια κατασκευή, υπάρχουν αρκετά θέματα που θα μπορούσαν να εξελιχθούν ή να μελετηθούν περαιτέρω. Βέβαια αποτελεί μεγάλο επίτευγμα το γεγονός ότι με τη βοήθεια αυτών των λογισμικών οι μηχανικοί και οι επιστήμονες κατόρθωσαν να προσομοιώσουν το πρόβλημα, να ερευνήσουν αυτές τις διαδικασίες, να αποκτήσουν μια κατανόηση του βαθμού στον οποίο θα μπορούσε να συμβεί διάβρωση κατά τη διάρκεια ζωής μιας δεδομένης κατασκευής και να εφαρμόσουν προληπτικά μέτρα για την αναστολή της ηλεκτροχημικής διάβρωσης, με σκοπό την προστασία των κατασκευών τους.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε μας επέτρεψε να καταλήξουμε σε μία σειρά συμπερασμάτων, παράλληλα όμως έφερε στο προσκήνιο και μια σειρά ερωτημάτων που καλούνται να απαντηθούν από μεταγενέστερες έρευνες. Κάποιοι προτεινόμενοι μελλοντικοί στόχοι, ενδεχομένως θα ήταν:

- ❖ Ποσοστιαίες διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα του λογισμικού με τη χρήση άλλης ποιότητας χάλυβα, άλλου σχήματος γάστρας ίδιων επιφανειών, άλλης θερμοκρασίας, αλατότητας, αντίστασης θαλασσιού νερού, διαφορετικές επικαλύψεις. Περαιτέρω μελέτη για προτυποποίηση πραγματικών κατασκευών (δοκιμές επί των περιβαλλοντολογικών συνθηκών, υλικού κατασκευής, κατάλληλων επικαλύψεων, σχήματος γάστρας κ.λ.π).
- ❖ Ο τρόπος προδιαγραφής των βέλτιστων θέσεων των θυσιαζόμενων ανόδων στο λογισμικό κρίνεται αρκετά χρονοβόρος για την εξαγωγή τελικού αποτελέσματος. Να εξευρεθούν λύσεις που θα αποδεσμεύσουν το χρήστη αυτών των λογισμικών από την έκδοση βέλτιστης προτεινόμενης λύσης κατόπιν δοκιμών.
- ❖ Ο υπολογισμός του απαιτούμενου ρεύματος προστασίας από τους διάφορους κανονισμούς νηογνωμόνων που χρησιμοποιήθηκαν, οδήγησε στο συμπέρασμα ότι δεν κινούνται όλοι σε κοινή βάση όσον αφορά τις περιβαλλοντικές συνθήκες (βάθος εγκατάστασης, θερμοκρασία) και το συντελεστή αστοχίας των επικαλύψεων (coating breakdown factor), με τον κανονισμό *DNV-RP-B401* να εμφανίζεται ως ο πιο εμπειριστατωμένος.

Βιβλιογραφία - Αναφορές

- [1] Δ.Ι. Παντελής, & Θ. Τσιούρβα, “Διάβρωση και προστασία ναυπηγικών και μηχανολογικών κατασκευών”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π. 2012
- [2] Σπυρίδων Α. Μαυράκος, “Μελέτη και σχεδίαση πλωτών κατασκευών”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1999
- [3] Θ. Σκουλικίδης - Π. Βασιλείου, “Διάβρωση και προστασία υλικών”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2007
- [4] Δ. Κ. Υφαντής, “Υλικά διάβρωσης και προστασία”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2005
- [5] Ν. Διαμαντής, “Προστασία μεταλλικών κατασκευών με συνδυασμό αντιδιαβρωτικών χρωμάτων και καθοδικής προστασίας”, Διδακτορική διατριβή, 1996
- [6] Σ. Π. Βλάχου, “Προστασία χάλυβα από διάβρωση”, Διδακτορική διατριβή, 1991
- [7] Α. Ιωσηφίδου, “Προστασία χαλύβων σε θαλάσσιο περιβάλλον με αντιδιαβρωτικό επικαλυπτικό που περιέχει πιγμέντο από ανοξείδωτο χάλυβα”, Διπλωματική εργασία, 2009
- [8] Γ. Κοτσινονος, “Συμπεριφορά μετάλλου χάλυβα, με επικάλυψη από οργανικό επικαλυπτικό υδατικού φορέα, φιλικού στο περιβάλλον, σε έκθεση σε επιταχυνόμενη γήρανση σε τεχνητό θαλάσσιο περιβάλλον”, Διπλωματική εργασία, Απρίλιος 2014
- [9] *Rules and Regulations for the Classification of Mobile Offshore Units, Corrosion Control, Lloyd’s Register, June 2013*
- [10] *Rules for Classification and Construction VI Additional Rules and Guidelines, Corrosion Protection, Guidelines for Corrosion Protection and Coating Systems, Germanischer Lloyd AG, Edition 2010*
- [11] *Corrosion Protection of Steel Offshore Units and Installations, Bureau Veritas, May 2006*
- [12] *DNV-RP-B401, Cathodic Protection Design, Det Norske Veritas, April 2011*
- [13] *DNV-RP-B101, Corrosion Protection of Floating Production and Storage Units, Det Norske Veritas, April 2007*
- [14] *DNV-RP-C302, Risk Based Corrosion Management, April 2012*

- [15] P E Francis, “Cathodic Protection In Practise”, National Physical Laboratory (N.P.L.)
- [16] V. Ashworth, “Principles of Cathodic Protection (4.18)”, Revision of the Third Edition article 10. Ivolume 2, 2010 Elsevier B.V.
- [17] Richard Baxter and Jim Britton, “Offshore Cathodic Protection 101”, 2007
- [18] James N. Britton, “Offshore Cathodic Protection System Management: A 21st Century Approach”, 2004
- [19] M.B. Surkein, J.P. La Fontaine, R.E. Tanner, “Corrosion Protection of Deep Water Permanently Moored Floating Production Systems using Cathodic Protection”, Exxon Mobil Development Company, Houston, Texas, USA, Proceedings of the Nineteenth (2009) International Offshore and Polar Engineering Conference Osaka, Japan, June 21-26, 2009
- [20] Prof. Kapt. Kris DE BAERE, “Corrosion In Ballast Tanks On Board Of Merchant Vessels, In situ study of the significant parameters”, Antwerpen, 2011
- [21] C. Baeté, M. Purcar, L. Bortels, B. Van Den Bossche, J-M. Dewilde, “CP System Validation Of Offshore Structures Through Modeling”, Paper 0001657 presented at CORROSION 2012, March 11-15 - Salt Lake City, Utah, USA. NACE International 2012
- [22] Yu Guo, Ankang Hu, Wei Wang, Wei Jiang, “Design and Optimization of ICCP Systems Using Computer Simulation”, International Journal of Advancements in Computing Technology(IJACT) Volume 4, Number20, November 2012
- [23] Robert Akid, “Corrosion of Engineering Materials, Material Research Institute”, Sheffield Hallam University, Sheffield United Kingdom, 2004
- [24] Nestor Perez, “Electrochemistry and Corrosion Science”, Kluwer Academic Publishers, 2004
- [25] Stelios Kyriakides & Edmundo Corona, *Mechanics of Offshore Pipelines, Vol. I Buckling and Collapse*, Elsevier Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK, 2007
- [26] Matao Takagi and Shin-Ichi Arai, Seiji Takezawa, Kunio Tanaka, Naonosuke Takarada, “A Comparison of Methods for Calculating The Motion of a Semi-Submersible”, *Ocean Engng*, Vol. 12, No.1, pp. 45-97, 1985
- [27] David W. Taylor, Young S. Hong, “Motion Analysis of a Semi-Submersible Platform”, Naval Ship Research and Development Center, 1984.

- [28] “*Impressed Current Cathodic Protection of a Ship Hull, Solved with COMSOL Multiphysics 4.3b*”, © COMSOL, 2013.
- [29] “*Corrosion Protection of an Oil Platform Using Sacrificial Anodes, Solved with COMSOL Multiphysics 4.3b*”, © COMSOL, 2013
- [30] <http://www.comsol.com/>, ημερομηνία ανάκτησης: 11/11/2014
- [31] <http://www.wilsonwalton.com/>, ημερομηνία ανάκτησης: 30/12/2014
- [32] <http://www.cathwell.com/products/sacrificial-anodes-2/bracket-welded-anodes/aluminium-anodes-6/>, ημερομηνία ανάκτησης: 07/01/2015
- [33] <http://www.cathwell.com/technical/cathodic-protection/galvanic-series/>, ημερομηνία ανάκτησης: 07/01/2015
- [34] <http://www.skarpenord-corrosion.no/index.php?id=1363&p=1362/>, ημερομηνία ανάκτησης: 15/01/2015
- [35] <http://www.cathwell.com/technical/data-sheets/sacrificial-anodes/magnesium-anode-data-sheet/>, ημερομηνία ανάκτησης: 15/01/2015
- [36] www.cathelco.com, ημερομηνία ανάκτησης: 15/01/2015
- [37] www.cathwell.com, ημερομηνία ανάκτησης: 15/01/2015
- [38] *Deepwater*, <http://stoprust.com> , ημερομηνία ανάκτησης: 30/01/2015
- [39] <http://www.etc-cps.com/> , ημερομηνία ανάκτησης: 05/02/2015
- [40] <https://www.asranet.co.uk/Courses/CorrosionInOffshoreEnvironment>, ημερομηνία ανάκτησης: 05/02/2015
- [41] http://www.shipandoffshore.net/fileadmin/user_upload/pdf/Seiten_ aus _spo213L.pdf, ημερομηνία ανάκτησης: 15/02/2015
- [42] <http://met-engineering.blogspot.gr/2009/>, ημερομηνία ανάκτησης: 15/02/2015
- [43] <https://www.quora.com/How-do-offshore-drilling-platforms-move-from-place-to-place>, ημερομηνία ανάκτησης: 12/10/2015