



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΘΟΔΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΠΛΩΤΗΣ
ΥΠΕΡΑΚΤΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΧΡΗΣΕΩΝ»**

Ιωάννης Γιαννίκιος

Τριμελής Επιτροπή :

Δημήτριος Ι. Παντελής, Καθηγητής

Σπυρίδων Α. Μαυράκος, Καθηγητής

Νικόλαος Γ. Τσούβαλης, Καθηγητής

Αθήνα , Οκτώβριος 2018

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα Εικόνων.....	4
Περιεχόμενα Πινάκων.....	5
Ευχαριστίες.....	8
Εισαγωγή.....	11
Περίληψη Διπλωματικής Εργασίας.....	13
Thesis Abstract	16
Μέρος 1 ^ο : Καθοδική Προστασία (1) (2).....	18
1.1 Βασικές Αρχές Καθοδικής Προστασίας (3).....	19
1.2 Διάκριση Δυναμικών στην Καθοδική Προστασία (3).....	21
1.3 Μέθοδος Θυσιαζόμενων Ανόδων (5) (3) (6) (7).....	23
1.4 Εφαρμογές Θυσιαζόμενων Ανόδων (3) (6)	24
1.5 Μέθοδος Επιβαλλόμενου Ρεύματος (ICCP) (2) (5) (7)	26
1.6 Εφαρμογές μεθόδου ICCP (2) (6)	28
1.7 Σύγκριση των δύο μεθόδων (2) (6)	29
Μέρος 2 ^ο : Μελέτη Προστασίας Υπεράκτιων Ανεμογεννητριών.....	32
2.1 Σημασία της Προστασίας της Κατασκευής (10) (11) (12)	32
2.2 Ζώνες Διάβρωσης (12) (11)	33
2.3 Σημασία Μελέτης Πλωτών Ανεμογεννητριών (13) (14)	35
Μέρος 3 ^ο : Πλωτή Κατασκευή Πολλαπλών Χρήσεων (15).....	36
3.1 Γενικά Στοιχεία Πλωτής Κατασκευής (15).....	36
3.2 Ανάλυση γεωμετρικών χαρακτηριστικών πλωτής κατασκευής (15)	37
Μέρος 4 ^ο : Μελέτη Καθοδικής Προστασίας πλωτής κατασκευής πολλαπλών χρήσεων (16) (12) (15)	40
4.1 Επιλογή Ανόδων για την προστασία της μεταλλικής κατασκευής	41
4.2 Επιλογή Αριθμού ανόδων βάσει της προδιαγραφής του DNV-GL	43
Μέρος 5 ^ο : Προσομοίωση Στατικού Φαινομένου Καθοδικής Προστασίας (18) (19) (20)	48
5.1 Comsol Multiphysics 5.3.....	48
5.2 Ηλεκτροχημική Θεωρία Προσομοίωσης.....	49
5.3 Διαδικασία Προσομοίωσης.....	50
5.4 Δημιουργία Γεωμετρίας (OWC).....	51
5.5 Σχεδίαση και τοποθέτηση Ανόδων	52
5.6 Φυσική του συστήματος (19) (21) (22)	54

5.7 Διακριτοποίηση Προβλήματος (Meshing)	56
5.8 Εκτέλεση Προγράμματος και Εμφάνιση Αποτελεσμάτων	58
Μέρος 6 ^ο : Προσομοίωση Δυναμικού Φαινομένου Καθοδικής Προστασίας (23)	62
6.1 Διαδικασία Προσομοίωσης.....	62
6.2 Γεωμετρία Κατασκευής (OWC)	62
6.3 Φυσική του Συστήματος (21) (24) (23) (20)	64
6.4 Διακριτοποίηση Προβλήματος (Meshing)	68
6.5 Επίλυση του προβλήματος.....	71
Μέρος 7 ^ο : Περιγραφή & Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων (12) (16) (6).....	80
7.1 Αξιολόγηση Στατικού Φαινομένου	80
7.2 Αξιολόγηση Χρονικά Μεταβαλλόμενου Φαινομένου	81
7.3 Αξιολόγηση Χρονικά Μεταβαλλόμενου Φαινομένου με Επικάλυψη	84
7.4 Πρόσθετο Βάρος & Υπολογισμός Έρματος	90
7.5 Εκτίμηση Κόστους Καθοδικής Προστασίας.....	91
Μέρος 8 ^ο : Συμπεράσματα & Μελλοντική Έρευνα	92
8.1 Συμπεράσματα	92
8.2 Μελλοντική Έρευνα & Πιθανές Προεκτάσεις	94
Παράρτημα Ι : Διαδικασία Μοντελοποίησης.....	96
Primary Current Distribution – Stationary Study	96
Secondary Current Distribution – Time Dependent.....	99
Βιβλιογραφία	104

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1.1: Αλλαγή του δυναμικού (E) από το δυναμικό διάβρωσης (E _{cor}) σε ένα χαμηλότερο δυναμικό (E _c) μέσω της επιβολής ενός εξωτερικού ρεύματος I _e	19
Εικόνα 1.2: Καθοδική Προστασία μέσω α) Θυσιαζόμενων Ανόδων β) Επιβαλλόμενου Ρεύματος	20
Εικόνα 1.3: Σχηματική απεικόνιση δυναμικού-απόστασης για την χρήση καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενους ανόδους	21
Εικόνα 1.4: Σχηματική απεικόνιση δυναμικού-απόστασης για την χρήση καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενο ρεύμα	20
Εικόνα 1.5: Εξέδρα Εξόρυξης Πετρέλαιου με προστασία ΘΑ	22
Εικόνα 1.6: Τοποθέτηση Θυσιαζόμενων Ανόδων στην γάστρα πλοίων	23
Εικόνα 1.7: Θυσιαζόμενοι Άνοδοι Αλουμινίου σε δεξαμενές Πλοίου	24
Εικόνα 1.8 : Σχηματική Απεικόνιση ICCP μεθόδου	25
Εικόνα 1.9: Απεικόνιση της μεθόδου ICCP σε υπεράκτια πλατφόρμα με τοποθέτηση ανόδων πάνω στην μεταλλική κατασκευή	26
Εικόνα 1.10: Απεικόνιση της μεθόδου ICCP σε πλοίο crude oil supertanker	27
Εικόνα 2.1 : Ζώνες Περιβάλλοντος (Environmental Zones) μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας (8)	31
Εικόνα 2.2: Αιολικό Πάρκο Hywind Scotland	33
Εικόνα 3.1: Πλωτή κατασκευή πολλαπλών χρήσεων όπως αυτή μελετήθηκε από το εργαστήριο πλωτών κατασκευών της σχολής NMM	36
Εικόνα 3.2: Τρισδιάστατη άποψη της βάσης της ανεμογεννήτριας καθώς και κάτοψη και πλάγια όψη	38
Εικόνα 3.3: Τρισδιάστατη αναπαράσταση της πλωτής ημιβυθισμένης κατασκευής πολλαπλού σκοπού	39
Εικόνα 4.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ανόδου με συγκολλητά άκρα	40
Εικόνα 4.2: Κλιματικές Ζώνες του Κόσμου , όπως διακρίνεται το Αιγαίο πέλαγος βρίσκεται στην υποτροπική ζώνη (subtropical)	46
Εικόνα 5.1: Γεωμετρία πλατφόρμας στο γραφικό περιβάλλον του COMSOL Multiphysics	51
Εικόνα 5.2: Γεωμετρία της υπό προστασίας επιφάνειας στο γραφικό περιβάλλον COMSOL Multiphysics	50
Εικόνα 5.3: Διάταξη θυσιαζόμενων ανόδων στην προστατευόμενη επιφάνεια	50
Εικόνα 5.4: Λεπτομέρεια της διάταξη θυσιαζόμενων ανόδων στην προστατευόμενη επιφάνεια	51
Εικόνα 5.5: ο όγκος του κυλίνδρου που εμπεριέχεται το θαλασσινό νερό (ηλεκτρολύτης)	51
Εικόνα 5.6: Διάγραμμα πόλωσης των θυσιαζόμενων ανόδων (μπλε καμπύλη) και της αναγωγής του οξυγόνου που συμβαίνει στην επιφάνεια του χάλυβα (κόκκινη καμπύλη) . Στο αριστερό διάγραμμα παρουσιάζεται η τιμή του ρεύματος της ανόδου και της καθόδου συναρτήσει του ηλεκτρικού δυναμικού. Ενώ στα δεξιά παρουσιάζεται το ηλεκτρικό δυναμικό ως συνάρτηση του λογαρίθμου της απόλυτης τιμής του ρεύματος.	52
Εικόνα 5.7: Συνολικά οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν όπως φαίνονται στο γραφικό περιβάλλον του COMSOL Multiphysics	54
Εικόνα 5.8: Απεικόνιση Πλέγματος στον όγκο ελέγχου του φαινομένου της διάβρωσης	55
Εικόνα 5.9: Κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στην τομή του επιπέδου xy	56
Εικόνα 5.10: Κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στην τομή του επιπέδου zx	56
Εικόνα 5.11: Κατανομή δυναμικού πάνω στην μεταλλική κατασκευή της πλατφόρμας	57
Εικόνα 5.12: Κατανομή δυναμικού πάνω σε λεπτομέρεια της μεταλλικής κατασκευής της πλατφόρμας	58
Εικόνα 6.1: Απλοποιημένη γεωμετρία υπεράκτιας ανεμογεννήτριας πολλαπλών χρήσεων	61
Εικόνα 6.2: Δημιουργία του κυλίνδρου του ηλεκτρολύτη που περιβάλλει την κατασκευή	61
Εικόνα 6.3: Σχηματική απεικόνιση συνοριακών συνθηκών Προβλήματος	64

Εικόνα 6.4: Διάγραμμα Δυναμικού - Δεκαδικού λογάριθμου πυκνότητας ρεύματος[3]	64
Εικόνα 6.5: Μέση τιμή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στην περιοχή της ανόδου συναρτήσει του πλέγματος	67
Εικόνα 6.6: Γραφική αναπαράσταση στο περιβάλλον του Comsol της ανόδου στην οποία αναφέρεται το διάγραμμα της εικόνας 6.5	67
Εικόνα 6.7: Εκλεπτυσμένο Πλεγμα (Fine Mesh)	68
Εικόνα 6.8: Ετήσια μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού της μεταλλικής κατασκευής (Μέρος 1 ^ο)	69
Εικόνα 6.9: Ετήσια μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού της μεταλλικής κατασκευής (Μέρος 2ο)	70
Εικόνα 6.10: Ετήσια μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού της μεταλλικής κατασκευής (Μέρος 3ο)	71
Εικόνα 6.11: Ετήσια μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού της μεταλλικής κατασκευής (Μέρος 4ο)	72
Εικόνα 6.12: Ετήσια μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού του ηλεκτρολύτη (Μέρος 1ο)	73
Εικόνα 6.13: Ετήσια μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού του ηλεκτρολύτη (Μέρος 2ο)	74
Εικόνα 6.14: Ετήσια μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού του ηλεκτρολύτη (Μέρος 3ο)	75
Εικόνα 6.15: Ετήσια μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού του ηλεκτρολύτη (Μέρος 4ο)	76
Εικόνα 6.16 : Μεταβολή του δυναμικού κατά μήκος του διαγώνιου μπρακέτου στήριξης . Όπως φαίνεται η αύξηση του δυναμικού ξεκινάει από τον ανωστικό κύλινδρο και χρονικά προχωράει προς τον πυλώνα στήριξης . Οι κοιλάδες που εμφανίζονται είναι λόγω της ύπαρξης των ανόδων στα συγκεκριμένα σημεία.	77
Εικόνα 6.17: Σχηματική απεικόνιση του αναφερόμενου μήκους στο διάγραμμα της εικόνας 6.13	77
Εικόνα 7.1: Περιοχή που έχει υποστεί διάβρωση τον 20ο χρόνο της ζωής της πλωτής κατασκευής	81
Εικόνα 7.2 : Η επιφάνεια του ανωστικού κυλίνδρου που θα έχει επικάλυψη όπως φαίνεται στο γραφικό περιβάλλον του Comsol Multiphysics 5.3	83
Εικόνα 7.3:Μεταβολή του δυναμικού πάνω στην επιφάνεια της μεταλλικής κατασκευής με χρήση επικαλύψεων τον 1 ^ο , 10 ^ο , 20 ^ο , 22 ^ο , 23 ^ο και 24 ^ο χρόνο ζωής της εγκατάστασης	84
Εικόνα 7.4: Κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού στην μεταλλική κατασκευή τον 25 ^ο χρόνο λειτουργίας της	85
Εικόνα 7.5: Χρονική μεταβολή μέγιστων και ελάχιστων τιμών του δυναμικού στην επιφάνεια της μεταλλικής κατασκευής με ή χωρίς εφαρμογή επικάλυψης στον εσωτερικό ανωστικό κύλινδρο	86
Εικόνα 7.6: Συνολική απώλεια πάχους της κατασκευής στον 25ο χρόνο , δεξιά έχει γίνει χρήση επικάλυψης ενώ αριστερά όχι	87

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1.1: Τυπικά Κράματα θυσιαζόμενων ανόδων και παράμετροι λειτουργίας	22
Πίνακας 1.2 :Σύγκριση των δύο μεθόδων καθοδικής προστασίας	30
Πίνακας 2.1: Ρυθμός Διάβρωσης του χάλυβα σε υπεράκτιες κατασκευές	32
Πίνακας 3.1: Γεωμετρία της πλωτής κατασκευής πολλαπλών χρήσεων	37
Πίνακας 4.1: Πλεονεκτήματα Θυσιαζόμενων Ανόδων Αλουμινίων έναντι Ψευδαργύρου	41
Πίνακας 4.2: Διαστάσεις Ανόδου A533.0S1	40
Πίνακας 4.3: Στοιχεία κράματος Deep 10 (Aluminum - Shallow Water)	40
Πίνακας 4.4 :Στοιχεία Απόδοσης Ανόδου σε θαλασσινό νερό (Anode Performance Data)	41
Πίνακας 4.5: Υπολογισμός εμβαδού επιφάνειας μεταλλικής κατασκευής	41
Πίνακας 4.6: Προτεινόμενες τιμές των συντελεστών a και b	43
Πίνακας 4.7: Κατηγορίες επικαλύψεων	43
Πίνακας 4.8: Προτεινόμενες τιμές συντελεστή κατανάλωσης (ϵ) για τον σχεδιασμό της καθοδικής προστασίας	47
Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά Πλέγματος	55
Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά Πλέγματος	67
Πίνακας 7.1: Μέγιστη , Ελάχιστη και Μέση τιμή δυναμικού της υπο προστασίας επιφάνειας	78

Πίνακας 7.2 : Προτεινόμενα δυναμικά προστασίας για διάφορα μέταλλα σε 30 Ω-cm θαλασσινό νερό και αλατότητα 3.2-3.8% (5)	79
Πίνακας 7.3: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές του ηλεκτρικού δυναμικού πάνω στην επιφάνεια της κατασκευής	80
Πίνακας 7.4: Υπολογισμός Αριθμού ανόδων	82
Πίνακας 7.5: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές του ηλεκτρικού δυναμικού πάνω στην επιφάνεια της κατασκευής μετά τη χρήση επικάλυψης	85
Πίνακας 7.6: Πρόσθετο βάρος Ανόδων ανά κατασκευαστικό στοιχείο	88
Πίνακας 7.7: Εκτίμηση Κόστους Καθοδικής Προστασίας	89

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Καθηγητή Δ. Παντελή που μου ανέθεσε το συγκεκριμένο θέμα που αποτελεί ιδιαίτερα καινοτόμα επιστημονική περιοχή δεδομένου ότι συνδιάζει θέματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και διάβρωσης των υλικών που χρησιμοποιούνται σε αυτές, επίσης η προσομοίωση του φαινομένου με την χρήση του λογισμικού Comsol μου έδωσε την δυνατότητα να εξοικιωθώ με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και να κατανοήσω σε βάθος το φαινόμενο της διάβρωσης αξιοποιώντας τις γνώσεις που απέκτησα κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Σ. Μαυράκο που μου έδωσε τα σχέδια της Πλωτής Υπεράκτιας Ανεμογεννήτριας Πολλαπλών Χρήσεων και τον συνεργάτη του Δρ. Δ. Κονισπολιάτη.

Θα ήθελα να εκφράσω επίσης τις θερμότερες ευχαριστίες μου στην Θ. Τσιούρβα για την καθοδήγηση της καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας .

Τέλος , ευχαριστώ την οικογένεια και τους φίλους μου που με στήριξαν όλους αυτούς τους μήνες.

Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μια μεγάλη στροφή της διεθνούς παραγωγής ενέργειας στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο στόχος της Ευρωπαϊκής Ένωσης για αύξηση του ποσοστού των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο 20% της συνολικής παραγωγής ενέργειας μέχρι το 2020. Έχοντας αυτόν τον προσανατολισμό το Εργαστήριο Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ διεξήγαγε την προκαταρκτική μελέτη μιας υπεράκτιας πλωτής κατασκευής, η οποία θα είναι σε θέση να εκμεταλλευτεί τόσο την αιολική ενέργεια από τους απερχόμενους ανέμους, όσο και το κυματικό δυναμικό της συγκεκριμένης περιοχής. Βάσει της προμελέτης, η διάρκεια ζωής της χαλύβδινης κατασκευής θα είναι ίση με 20 χρόνια, στα οποία θα πρέπει να είναι σε θέση να αντέξει τα δυναμικά κρουστικά φορτία τόσο από τον άνεμο, όσο και από το θαλάσσιο περιβάλλον. Κατασταλτικός παράγοντας στην αντοχή της μεταλλικής κατασκευής αποτελεί το επίπεδο διάβρωσής της.

Από περιβαλλοντική άποψη, η χημική διεργασία της διάβρωσης είναι ένα φυσικό φαινόμενο, που είναι απαραίτητο για τη διατήρηση της φυσικής ισορροπίας. Η διάβρωση αποτελεί έναν ρυθμιστή των κατεργασμένων μετάλλων με την έννοια ότι προσπαθεί να επαναφέρει το μέταλλο στην πιο σταθερή χημική μορφή του. Ωστόσο, από την πλευρά του μηχανικού, η διάβρωση μπορεί να θεωρηθεί ως μια καταστροφική επίθεση της φύσης στο μέταλλο. Αυτή η καταστροφή προκαλεί σημαντική απώλεια υλικού, που οδηγεί σε οικονομικές επιπτώσεις όσον αφορά την παραγωγικότητα, το κόστος συντήρησης, επισκευής και αποκατάστασης. Στις συνέπειες οφείλουμε να συμπεριλάβουμε και περιστασιακούς τραυματισμούς ή απώλειες ζωής, που συνδέονται με αστοχίες αποτέλεσμα της διάβρωσης. Από τα παραπάνω προκύπτει η επιτακτική ανάγκη από την μεριά του μηχανικού να προστατεύσει τις μεταλλικές κατασκευές από την διάβρωση.

Η καθοδική προστασία αποτελεί τον πλέον διαδεδομένο τρόπο προστασίας των μεταλλικών κατασκευών, αφού είναι σε θέση να προστατεύσει οποιοδήποτε κράμα μετάλλου σε υψηλά διαβρωτικά περιβάλλοντα. Ο βασικός σκοπός της καθοδικής προστασίας μιας χαλύβδινης κατασκευής είναι να επιβάλλει ηλεκτρική πόλωση στην μεταλλική επιφάνεια με δυναμικό από -800 mV μέχρι -1100 mV όπως υπολογίστηκε αναφορικά με το ηλεκτρόδιο αργύρου / χλωριούχου αργύρου (Ag/AgCl). Στο συγκεκριμένο εύρος δυναμικού επιτυγχάνεται η προστασία του χάλυβα από την διάβρωση. Η μέθοδος καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενες ανόδους χρησιμοποιείται ευρέως για την προστασία των υπεράκτιων πλωτών κατασκευών, όπως είναι η υπό μελέτη ανεμογεννήτρια.

Οι άνοδοι είναι κατασκευασμένες από κράματα μετάλλων που είναι λιγότερα ηλεκτροχημικά ευγενή σε σχέση με το υλικό της κατασκευής που προορίζεται για προστασία από τη διάβρωση. Η άνοδος αντιδρά με το περιβάλλον και ως αποτέλεσμα διαλύεται κατά τη διάρκεια ζωής της κατασκευής γι'αυτόν το λόγο ονομάζεται θυσιαζόμενη.

Περίληψη Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό την μελέτη και προσομοίωση του συστήματος καθοδικής προστασίας μίας υπεράκτιας πλωτής κατασκευής πολλαπλών χρήσεων που σχεδιάστηκε από το Εργαστήριο Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Αυτό επιτυγχάνεται μέσα από τρία στάδια: εμβάθυνση στις αρχές των μεθόδων καθοδικής προστασίας, ανάλυση και κατανόηση του φαινομένου της διάβρωσης και της προστασίας της, μελέτη της υπό προστασία κατασκευής και τέλος, προσομοίωση του φαινομένου της καθοδικής προστασίας στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics 5.3.

Σε πρώτο στάδιο γίνεται αναφορά στη σημασία της καθοδικής προστασίας (ΚΠ) και στις βασικές ηλεκτροχημικές αρχές που την διέπουν. Η ΚΠ αποτελεί την κυρίαρχη μέθοδο προστασίας για τις πλωτές κατασκευές, όπως οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες ή οι πλατφόρμες εξόρυξης υδρογονανθράκων, συνήθως είναι και η μόνη για τα μέρη της κατασκευής που είναι εκτεθειμένα μονίμως στο θαλασσινό νερό. Οι δύο βασικοί μέθοδοι καθοδικής προστασίας είναι η τοποθέτηση θυσιαζόμενων ανόδων (GACP) και η εφαρμογή επιβαλλόμενου ρεύματος (ICCP). Και οι δύο μέθοδοι έχουν εφαρμογή στις υπεράκτιες κατασκευές, με την πρώτη όμως να θεωρείται καταλληλότερη για πλωτές κατασκευές που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από την ακτή.

Η πλωτή κατασκευή πολλαπλών χρήσεων που μελετήθηκε έχει την ιδιαιτερότητα ότι αποτελείται από μία ανεμογεννήτρια και τρεις συσκευές ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης (Oscillating Water Column – OWC). Με αυτή την καινοτομία επιτυγχάνεται η εκμετάλλευση τόσο της αιολικής, όσο και της κυματικής ενέργειας που υπάρχει άφθονη στην περιοχή της εγκατάστασης. Η ανεμογεννήτρια στηρίζεται σε μία πλωτή τριγωνική πλατφόρμα όπου στις γωνίες αυτής υπάρχουν τρεις συσκευές OWC. Σκοπός της μελέτης είναι η βέλτιστη προστασία της κατασκευής από την διάβρωση του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Η επιφάνεια που βρίσκεται μονίμως μέσα στο νερό καθώς και αυτή που ανήκει στην ζώνη ψεκασμού (splash zone) από τα απερχόμενα κύματα είναι οι περιοχές με το μεγαλύτερο ρυθμό διάβρωσης.

Η μέθοδος ΚΠ που θα εφαρμοστεί για την προστασία της κατασκευής είναι η εφαρμογή θυσιαζόμενων ανόδων. Ο καθορισμός του αριθμού και του τύπου των ανόδων έγινε βάσει των προδιαγραφών που ορίζει ο DNV-GL για την προστασία από την διάβρωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Η βέλτιστη θέση των ανόδων στην κατασκευή βρέθηκε με την προσομοίωση του προβλήματος στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics 5.3, που βασίζεται στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Μέσω του προγράμματος αυτού, έγινε μια στατική αλλά και χρονική μελέτη της κατανομής του δυναμικού πάνω στην επιφάνεια της κατασκευής και των ανόδων. Γνωρίζοντας το ηλεκτρικό δυναμικό είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε ποια σημεία είναι πιο επιρρεπή στην διάβρωση μέσα στα χρόνια και χρήζουν προσοχής.

Thesis Abstract

This thesis investigates the cathodic corrosion protection system of a multipurpose floating structure by developing a model (FEM – in Comsol Multiphysics) and applying simulations on the designed floating structure. A Corrosion model for GACP (Galvanic Anode Cathodic Protection) systems is developed which considers seawater conductivity, anodes capacity, environmental conditions and predicts the steel's potential and current flow. Kinetic expressions, as simulation input, are iteratively fitted to measured potentials until the simulation outcomes match desired potential and current values. The calculated average and maximum protection potential at the structure's surface is calculated and compared to the requirements that classification society dictates, namely DNV-GL.

Salt water and humidity increase corrosion rate on intermittently or completely submerged parts of the structure. But high levels of corrosion decrease the bearable loads by reducing the components' dimensions and therefore increasing the resolved stress and strain. Hence, it is obligatory to evaluate the corrosion rate and evolution during the structure's service life and if it is effectively protected against corrosion. To prevent thickness reduction beyond the allowed margins on the structural components, certain regulations instructed from DNV have to be met regarding the potential distribution and the dissolution (thus current) of the structure and the protection system. However, the corrosion rates will vary within the different components of the marine structure, depending on their position relative to the protection means, but also to the state of the protection system (e.g. the current provided in a certain component will be less if the same source sends current to another one). It is therefore necessary to apply calculations on each floating structure before the anodes are installed (especially when new design is made). The examined structure is a result of the thorough research conducted by the Laboratory for Floating Structures and Mooring Systems of National Technical University of Athens. Moreover, it is a multi-purpose floating structure suitable for offshore wind and wave energy sources exploitation. This structure has not been installed yet and the study of the cathodic protection system is vital since its design is groundbreaking and one of the kind.

This study showed that the solely use of a GACP system is insufficient to meet the DNV-GL standards and a combination of anti-corrosive methods is needed. In detail, because of the complexity of the platform's geometry the anodes were incapable to keep the potential below -0.9 Volts (as the classification society dictates) on the surface of the steel structure. As a result the steel's degradation would initiate at 17 years while at -0.8Volt and will result a loss of 0.4 mm in thickness for some parts of the platform by the end of the design life. Consequently, an alternative of applying cathodic protection by means of GACP combined with the use of coatings on the endangered surfaces has been introduced. In this case the DNV-GL standards were successfully met and the service life of the structure was eventually prolonged to 25 years.

Μέρος 1^ο : Καθοδική Προστασία (1)_(2)

Ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους πρόληψης της διάβρωσης είναι η μέθοδος καθοδικής προστασίας, η οποία είναι ικανή να χρησιμοποιηθεί για όλους τους τύπους διάβρωσης και μπορεί, σε ορισμένες περιπτώσεις, ακόμα και να αποτρέψει εντελώς τη διάβρωση. Οι τεχνικές καθοδικής προστασίας εφαρμόζονται ευρέως στη βιομηχανία σε μεταλλικές κατασκευές που περικλείονται από ηλεκτρολύτες όπως το νερό, έδαφος, σκυρόδεμα και άλλα. Τέτοιες κατασκευές είναι υπόγειοι αγωγοί, λιμάνια, προβλήτες, πλοία, δεξαμενές αποθήκευσης πετρελαίου, δεξαμενές αποθήκευσης νερού και άλλα.

Η καθοδική προστασία (ΚΠ) είναι γνωστή εδώ και περίπου 180 χρόνια. Εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στο βρετανικό πολεμικό ναυτικό στο πλοίο 'Samarang' από τον Sir Humphry Davy το 1824. Η γάστρα του 'Samarang' ήταν κατασκευασμένη από χαλκό και προστατευόταν με την χρήση θυσιαζόμενων ανόδων ψευδαργύρου. Ωστόσο, η εξέλιξη της διάβρωσης είχε ως αποτέλεσμα ζωντανοί οργανισμοί, όπως βρύα να καλύψουν το σώμα του πλοίου, γεγονός που με τη σειρά του έδωσε την εντύπωση ότι η απόπειρα καθοδικής προστασίας ήταν ανεπιτυχής. Η καθοδική προστασία χρησιμοποιήθηκε επίσης το 1836, με εμφάνιση των φύλλων σιδήρου σε τηγμένο ψευδάργυρο με σκοπό την προστασία των πολεμικών πλοίων από τη διάβρωση. Μετά από περίπου έναν αιώνα, χρησιμοποιήθηκε και πάλι, αυτή τη φορά για την προστασία των υπόγειων αγωγών, και στην δεκαετία του 1950 άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως σε δεξαμενές αποθήκευσης νερού, λαδιού, φράγματα, βάσεις, σιδερένιες ράβδους κ.λπ.

Κατά κύριο λόγο η ΚΠ χρησιμοποιήθηκε για την προστασία του συνήθους δομικού χάλυβα (structural steel) στο έδαφος και το θαλασσινό νερό, πιο σπάνια (και υπό ειδικές συνθήκες) για χάλυβα που εκτίθεται σε γλυκό νερό. Άλλα υλικά που θα μπορούσαν να προστατευθούν από τη ΚΠ είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας και το αλουμίνιο, που είναι ιδιαίτερα επιρρεπή στην εντοπισμένη διάβρωση (localized Corrosion). Η καθοδική προστασία εφαρμόζεται στις περισσότερες περιπτώσεις σε συνδυασμό με επίστρωση (coating), με σκοπό την προστασία του χάλυβα στις "διακοπές(holidays)"¹ και τις κατεστραμμένες περιοχές της επίστρωσης. Τις τελευταίες δεκαετίες, η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας έχει αυξηθεί σημαντικά με την επέκταση της εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου. Είναι η κυρίαρχη μέθοδος προστασίας για τα μεγάλα βυθισμένα μέρη σταθερών εγκαταστάσεων εξόρυξης πετρελαίου, και συνήθως η μόνη για τα μέρη που εκτίθενται ελεύθερα στο θαλασσινό νερό.

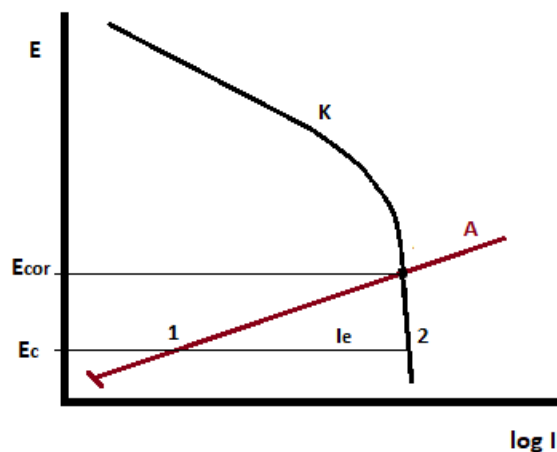
¹Οι διακοπές(holidays) ορίζονται ως: ασυνέχειες στην επικάλυψη ή η περίπτωση που ένα μέρος της επιφάνειας παραμένει μη επικαλυμμένο ή όταν υπάρχει κάποιο ελάττωμα όπως: Μια οπή στην επικάλυψη, μια ρωγμή μέσα στην επικάλυψη ή ελαττωματική συγκόλληση της επίστρωσης. Είναι σημαντικό να ανιχνεύονται και να μελετώνται οι διακοπές στην προστατευτική επικάλυψη και να λαμβάνονται επείγοντως διορθωτικά μέτρα. Διαφορετικά, η διαδικασία διάβρωσης μπορεί να ξεκινήσει από τις μη ανιχνευμένες διακοπές και μπορεί να προκύψει μη αναστρέψιμη ζημιά στο υλικό

Η καθοδική προστασία συνίσταται στην εφαρμογή ηλεκτρονίων στο υπό προστασία μέταλλο, μετατρέποντάς το έτσι σε κάθοδο. Κανονικά, τα ηλεκτρόνια παράγονται στην άνοδο και ρέουν στην κάθοδο, όπου χρησιμοποιούνται στην καθοδική αντίδραση. Εάν αυτά τα ηλεκτρόνια παρέχονται εξωτερικά, τότε η ανοδική αντίδραση δεν μπορεί να παράγει πια ηλεκτρόνια, ενώ ο ρυθμός της καθοδικής αντίδρασης αυξάνεται και οι ανοδικές αντιδράσεις δεν λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια του προς προστασία μετάλλου, αλλά στην επιφάνεια της ανόδου του συστήματος καθοδικής προστασίας.

Υπάρχουν δύο κύριες μέθοδοι εφαρμογής της καθοδικής προστασίας, η τεχνική επιβαλλόμενου ρεύματος (impressed current technique) και η χρήση θυσιαζόμενων ανόδων (sacrificial anodes). Στη πρώτη μέθοδο παρέχεται, στο προς προστασία μέταλλο, ρεύμα (μέσω μιας εξωτερικής πηγής) με ρυθμούς μεγαλύτερους ή ίσους από αυτούς που το ρεύμα εξέρχεται κατά τη διάβρωση του μετάλλου. Αντίθετα στην δεύτερη μέθοδο, πάνω στην προστατευόμενη επιφάνεια του μετάλλου συνδέεται ένα μέταλλο ανοδικότερο από αυτό, με αποτέλεσμα την δημιουργία γαλβανικού στοιχείου (galvanic cell).

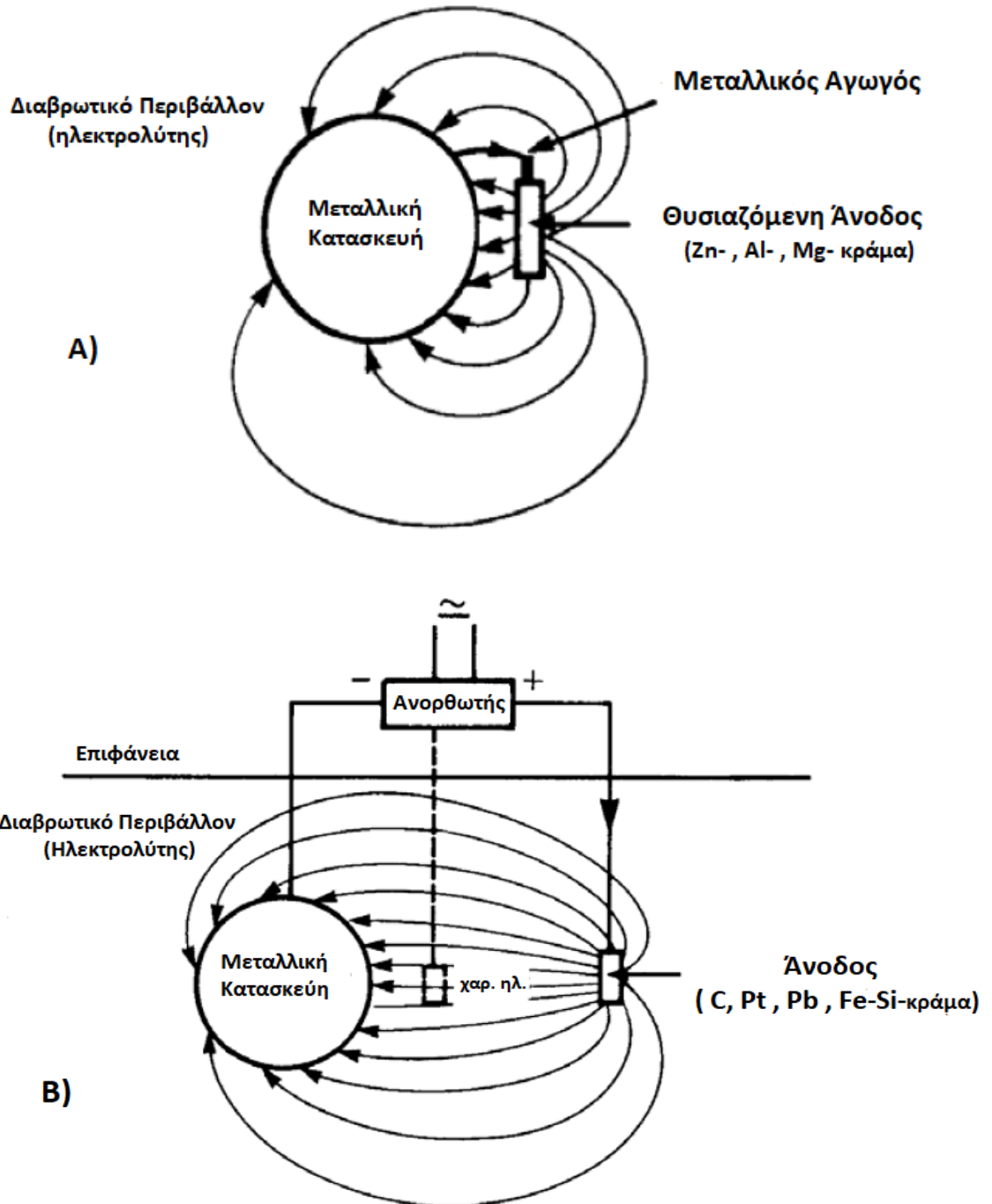
1.1 Βασικές Αρχές Καθοδικής Προστασίας (3)

Η βασική αρχή της Καθοδικής Προστασίας είναι η επιβολή ενός εξωτερικού ρεύματος στο υλικό, το οποίο ωθεί το δυναμικό του ηλεκτροδίου προς την περιοχή 'μη προσβολής' (immunity area) ή στην περίπτωση της προστασίας από εντοπισμένη διάβρωση (localized corrosion), κάτω από το δυναμικό προστασίας (protection potential). Με άλλα λόγια, το υλικό γίνεται η κάθοδος σε ένα ηλεκτροχημικό κελί (electrochemical cell).



Εικόνα 1.1: Αλλαγή του δυναμικού (E) από το δυναμικό διάβρωσης (E_{cor}) σε ένα χαμηλότερο δυναμικό (E_c) μέσω της επιβολής ενός εξωτερικού ρεύματος I_e (3) (4)

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα (Εικόνα 1.1), των καμπύλων δυναμικού $- \log(\text{ρεύματος})$, το εξωτερικά επιβαλλόμενο ρεύμα I_e είναι η διαφορά μεταξύ του καθοδικού (Σημείο 2) και του ανοδικού (Σημείο 1) ρεύματος στη περιοχή του δυναμικού E_c . Στο συγκεκριμένο δυναμικό, το ανοδικό ρεύμα στο προστατευμένο υλικό είναι πολύ χαμηλό, δηλαδή το εξωτερικό ρεύμα είναι σχεδόν ίσο με το καθοδικό ρεύμα, με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η προστασία του μετάλλου. Το εξωτερικό ρεύμα μπορεί να παραχθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους (Σχήμα 2α-2β):

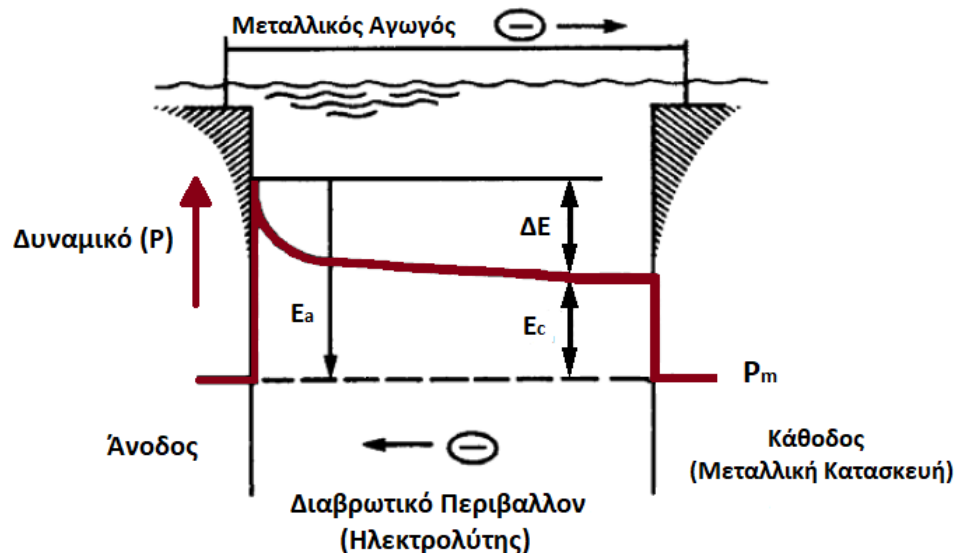


Εικόνα 1.2: Καθοδική Προστασία μέσω α) Θυσιαζόμενων Ανόδων β) Επιβαλλόμενου Ρεύματος (3)

- A. Με την χρήση ενός λιγότερα ευγενούς υλικού με τη μορφή θυσιαζόμενων ανόδων, το οποίο συνδέονται με μεταλλικούς αγωγούς στη δομή της μεταλλικής κατασκευής που πρόκειται να προστατευθεί.
- B. Μέσω μιας εξωτερικής πηγής ρεύματος, συνήθως ενός ανορθωτή. Με την βοήθεια ενός ηλεκτροδίου αναφοράς έχουμε δυναμικό έλεγχο της τάσης που εφαρμόζει ο ανορθωτής .

1.2 Διάκριση Δυναμικών στην Καθοδική Προστασία (3)

Στην μελέτη της καθοδικής προστασίας έχουμε το δυναμικό των ηλεκτροδίων της μεταλλικής κατασκευής, της θυσιαζόμενου ανόδου (δηλ. το δυναμικό καθόδου και δυναμικό ανόδου) και έχουμε, επίσης ένα μεταβαλλόμενο δυναμικό στο σύστημα. Για ένα σύστημα ΚΠ με θυσιαζόμενους ανόδους, ένα τέτοιο διάγραμμα φαίνεται στην Εικόνα 1.3.



Εικόνα 1.3: Σχηματική απεικόνιση δυναμικού-απόστασης για την χρήση καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενους ανόδους (3)

P_m =Δυναμικό των μεταλλικών στοιχείων (κατασκευή, άνοδος και συνδέσεις)

E_a = Δυναμικό ηλεκτροδίου στην άνοδο

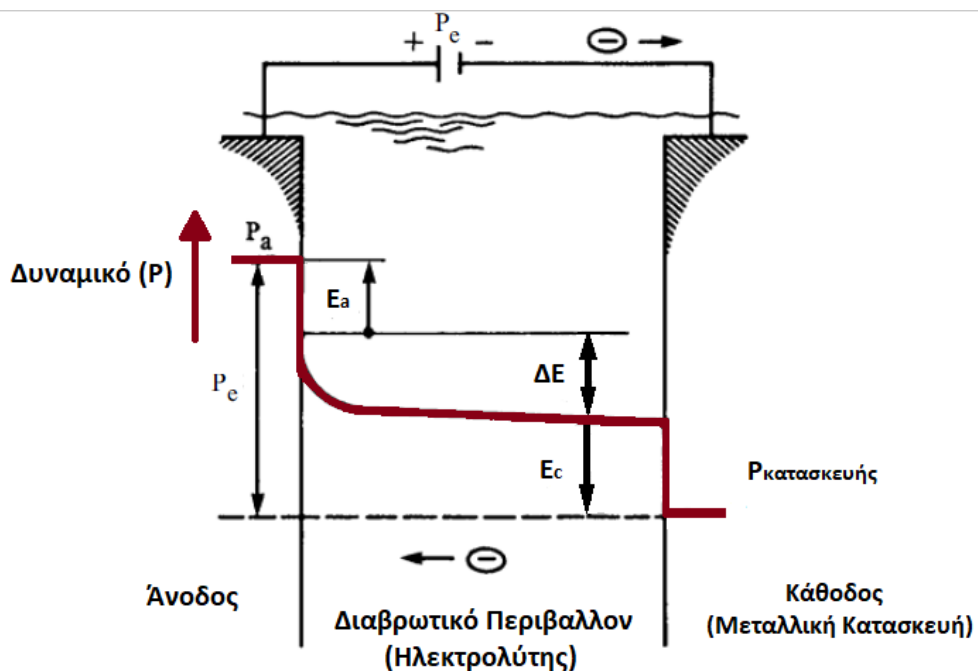
E_c = Δυναμικό ηλεκτροδίου στην μεταλλική κατασκευή (κάθοδος)

$\Delta E = E_c - E_a$ = Πτώση του Δυναμικού μέσα στον ηλεκτρολύτη από την επιφάνεια της ανόδου στην επιφάνεια της καθόδου

Στο σύστημα που παρουσιάζεται, σχηματίζεται ένα γαλβανικό στοιχείο (galvanic element), κάθε πτώση του δυναμικού των μεταλλικών υλικών (στη κατασκευή και τους αγωγούς σύνδεσης) δεν λαμβάνεται υπόψη, αφού είναι συνήθως ασήμαντη σε σύγκριση

με τις άλλες πιθανές διαφορές. Συνεπώς, η παρουσίαση περιλαμβάνει ένα κοινό ηλεκτρικό δυναμικό P_m στην άνοδο και στο υλικό κατασκευής. Το δυναμικό ηλεκτροδίου είναι η διαφορά μεταξύ του ηλεκτρικού δυναμικού του μετάλλου και του γειτονικού ηλεκτρολύτη. Σε σύγκριση με τα κοινά ηλεκτρόδια αναφοράς, όπως το πρότυπο ηλεκτρόδιο υδρογόνου, το κορεσμένο ηλεκτρόδιο καλομέλανα και το ηλεκτρόδιο αργύρου-χλωριούχου αργύρου, τα δυναμικά ηλεκτροδίων στη δομή του χάλυβα και των θυσιαζόμενων ανόδων (E_c και E_a) είναι αρνητικά. Το δυναμικό ανόδου E_a είναι πιο αρνητικό από το δυναμικό ηλεκτροδίου της κατασκευής E_c , λόγω μιας ενδεχόμενης πτώσης ΔE στο νερό. Θα πρέπει επίσης να τονιστεί ότι το ηλεκτρικό δυναμικό στο νερό μειώνεται με κατεύθυνση από την άνοδο προς τη κατασκευή δηλαδή, θετικά ιόντα κινούνται προς τη κατασκευή και αρνητικά ιόντα προς την άνοδο. Το μεγαλύτερο μέρος της πιθανής πτώσης δυναμικού μέσα στο νερό εντοπίζεται κοντά στην άνοδο επειδή η επιφάνεια της ανόδου στην πραγματικότητα είναι πολύ μικρότερη από αυτή της κατασκευής, δηλαδή η πυκνότητα του ηλεκτρολυτικού ρεύματος είναι πολύ υψηλότερη κοντά στην άνοδο από οπουδήποτε αλλού στο σύστημα .

Στην περίπτωση που μια εξωτερική πηγή ρεύματος είναι συνδεδεμένη με τον αρνητικό ακροδέκτη της στη μεταλλική κατασκευή και τον θετικό ακροδέκτη της στην άνοδο, αποκτάμε ένα σύστημα προστασίας επιβαλλομένου ρεύματος. Το διάγραμμα δυναμικού-απόστασης για αυτήν την περίπτωση παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.4.



Εικόνα 1.4: Σχηματική απεικόνιση δυναμικού-απόστασης για την χρήση καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενο ρεύμα (3)

E_a = Δυναμικό ηλεκτροδίου στην άνοδο

E_c = Δυναμικό ηλεκτροδίου στην μεταλλική κατασκευή (κάθοδος)

$\Delta E = E_c - E_a$ = Πτώση του Δυναμικού μέσα στον ηλεκτρολύτη από την επιφάνεια της ανόδου στην επιφάνεια της καθόδου

P_a = Δυναμικό στο υλικό της ανόδου

$P_{κατασκευής}$ =Δυναμικό στην μεταλλική κατασκευή

P_e = Η τάση της εξωτερικής πηγής

1.3 Μέθοδος Θυσιαζόμενων Ανόδων (5) (3) (6) (7)

Η τεχνική θυσιαζόμενων ανόδων χρησιμοποιεί τη διαφορά δυναμικού που υπάρχει μεταξύ της μεταλλικής κατασκευής και ενός δεύτερου δραστικότερου μετάλλου (άνοδος) στο ίδιο περιβάλλον για την δημιουργία γαλβανικού στοιχείου (galvanic element). Δεν χρησιμοποιείται δηλαδή εξωτερική πηγή ενέργειας για την προστασία του μετάλλου. Η διάλυση του δεύτερου ανοδικότερου μετάλλου παρέχει την πηγή των ηλεκτρονίων για την καθοδική πόλωση της κατασκευής. Έτσι, ενώ η άνοδος στη μέθοδο του επιβαλλομένου ρεύματος μπορεί να είναι πιο ευγενής από την προστατευόμενη κατασκευή, επειδή η πηγή ισχύος την αναγκάζει να ενεργεί ως μία άνοδος, η θυσιαζόμενη άνοδος πρέπει να είναι αυθόρμητα ανοδική σε σχέση με το υλικό της κατασκευής. Δηλαδή, πρέπει να είναι λιγότερο ευγενής στη γαλβανική σειρά για το δεδομένο περιβάλλον. Έτσι, ο ψευδάργυρος Zn, το αλουμίνιο Al, ή το μαγνήσιο Mg μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προστασία του χάλυβα και αντίστοιχα ο σίδηρος για την προστασία του χαλκού.

Στην πράξη, καθαρά μέταλλα δεν χρησιμοποιούνται ποτέ ως θυσιαζόμενες άνοδοι. Οι βασικοί λόγοι για αυτό είναι η ανάγκη για:

1. Μια αρκετά μεγάλη και αρνητική τιμή δυναμικού για την άνοδο έτσι ώστε να παρέχεται η απαιτούμενη προστασία.
2. Υψηλή ηλεκτροχημική χωρητικότητα (Ah / kg) για την άνοδο.
3. Ομοιόμορφη διάλυση της ανόδου ώστε όλο το μέταλλο να καταναλώνεται με τον ίδιο ρυθμό και να υπάρχει παροχή καθοδικής προστασίας σε όλη την επιφάνεια της κατασκευής
4. Να μην υπάρχει κίνδυνος παθητικοποίησης της επιφάνειας της ανόδου.

Για τους λόγους αυτούς, η χρήση κραμάτων εμφανίζεται σε όλες τις εμπορικές εφαρμογές με θυσιαζόμενες ανόδους και απαιτείται πολύ προσεκτικός ποιοτικός έλεγχος για τον περιορισμό των στοιχείων που επιδρούν αρνητικά στις ιδιότητες του κράματος και υπάρχουν σε μικρή περιεκτικότητα (κυρίως σίδηρο και χαλκό) κάτω από συγκεκριμένα επίπεδα. Πολλές αποτυχίες εφαρμογής της μεθόδου θυσιαζόμενων ανόδων μπορούν να αποδοθούν στον κακό έλεγχο ποιότητας της παραγωγής. Γι' αυτόν το λόγο, έχει εκπονηθεί οδηγός με τα ελάχιστα πρότυπα ποιότητας.

Ο Πίνακας 1.1 δίνει τις ηλεκτροχημικές ιδιότητες για διάφορους τύπους ανόδων. Είναι προφανές ότι οι επιβαλλόμενες τάσεις (driving voltages), από θυσιαζόμενες ανόδους είναι σημαντικά μικρότερες σε σχέση με τις πηγές ενέργειας. Στην καλύτερη περίπτωση, η θυσιαζόμενη άνοδος θα παράγει 1V σε χάλυβα, ενώ μια επιβαλλόμενη πηγή ρεύματος μπορεί να παράγει μέχρι και 100 V.

Πίνακας 1.1: Τυπικά Κράματα θυσιαζόμενων ανόδων και παράμετροι λειτουργίας²

ΚΡΑΜΑ	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	ΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ VS. AG/AGCL/ΘΑΛ. ΝΕΡΟ (OPERATING VOLTAGE-V)	ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ (DRIVING VOLTAGE-V)	ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ (ΑΗ/ΚΓ)
AL-ZN-HG	Θαλ. νερό	-1.0 έως -1.05	0.20 έως 0.25	2600-2850
AL-ZN-IN	Θαλ. νερό	-1.0 έως -1.10	0.20 έως 0.30	2300-2650
AL-ZN-IN	Θαλ. ιζήματα	-0.95 έως -1.05	0.15 έως 0.25	1300-2300
AL-ZN-SN	Θαλ. νερό	-1.0 έως -1.05	0.20 έως 0.25	925-2600
ZN	Θαλ. νερό	-0.95 έως -1.03	0.15 έως 0.25	760-780
ZN	Θαλ. ιζήματα	-0.95 έως -1.03	0.15 έως 0.23	750-780
MG-AL-ZN	Θαλ. νερό	-1.5	0.7	1230
MG-MN	Θαλ. νερό	-1.7	0.9	1230

1.4 Εφαρμογές Θυσιαζόμενων Ανόδων (3) (6)

Η πλειοψηφία των υπεράκτιων εγκαταστάσεων, και ιδιαίτερα αυτών που βρίσκονται σε έντονα διαβρωτικά περιβάλλοντα όπως η Βόρεια Θάλασσα, προστατεύεται με θυσιαζόμενες ανόδους σε συνδυασμό με ένα υψηλής ποιότητας σύστημα βαφής (εικόνα 1.5). Για τους χάλυβες χωρίς επικάλυψη στο θαλασσινό νερό, οι θυσιαζόμενες άνοδοι είναι κατασκευασμένες από ειδικά κράματα αλουμινίου, λόγω της ικανότητας τους να δίνουν την υψηλότερη παραγωγή ρεύματος για ένα ορισμένο βάρος ανόδου, καθώς και το χαμηλότερο κόστος. Οι άνοδοι Zn συνήθως εφαρμόζονται σε επικαλυμμένους και θαμμένους αγωγούς ανοικτής θάλασσας, όπου ο κίνδυνος παθητικοποίησης του Al είναι υψηλότερος.



Εικόνα 1.5: Εξέδρα Εξόρυξης Πετρελαίου με προστασία από θυσιαζόμενες ανόδους. (8)

² Corrosion Volume 2: Corrosion Control Third Edition; L.L. Sheir, R. A. Jarman; Butterworth Heinemann; Boston; 1994

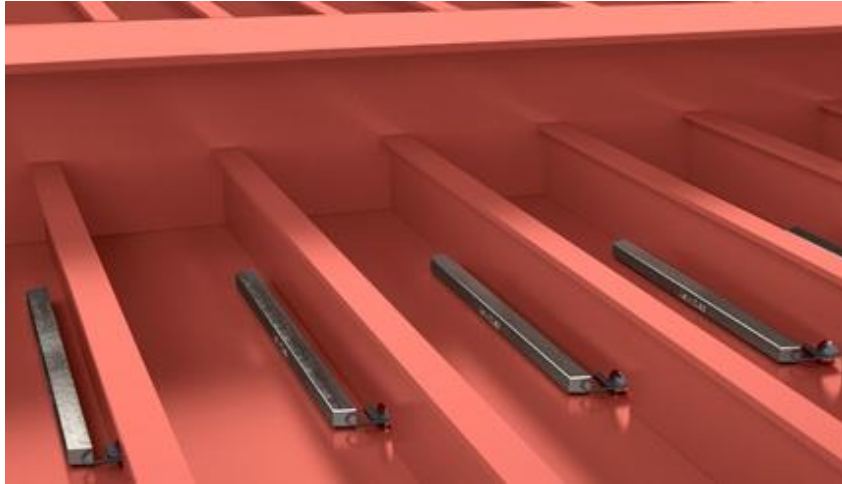
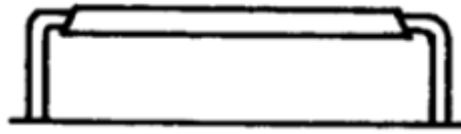
Όταν χρησιμοποιούνται θυσιαζόμενοι άνοδοι (συνήθως Zn ή Al) στην γάστρα πλοίων (εικόνα 1.6), συνδυάζονται με ένα σύστημα βαφής. Οι άνοδοι τοποθετούνται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους και ιδιαίτερα στην περιοχή γύρω από την έλικα. Αυτό συμβαίνει εν μέρει, επειδή η μεταλλική κατασκευή της έλικας "κλέβει" μέρος του ρεύματος προστασίας και εν μέρει λόγω του στροβιλισμού, που οδηγεί σε υψηλότερη απαίτηση πυκνότητας καθοδικού ρεύματος. Οι άνοδοι Zn και Al χρησιμοποιούνται, επίσης σε δεξαμενές έρματος σε πετρελαιοφόρα και φορτηγά πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου (Εικόνα 1.7).



Εικόνα 1.6: Τοποθέτηση Θυσιαζόμενων Ανόδων στην γάστρα πλοίων (4)

Αντίθετα, σε εφαρμογές, όπως χαλύβδινες κατασκευές στο έδαφος και σε δεξαμενές ζεστού γλυκού νερού, οι άνοδοι μαγνησίου χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερο βαθμό. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι άνοδοι Mg έχουν ως πλεονέκτημα την παροχή υψηλότερης επιβαλλόμενης τάσης σε σχέση με αυτήν που παράγεται από τις ανόδους Al και Zn. Σε περιβάλλοντα που έχουν απαίτηση υψηλής αντοχής σε διάβρωση, ο συνδυασμός ΚΠ και επίστρωσης είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός στην μείωση του συνολικού ρεύματος και συνεπώς την πιθανή πτώση κοντά στις ανόδους. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται καλύτερη κατανομή του ρεύματος στα σημεία όπου χρειάζεται.

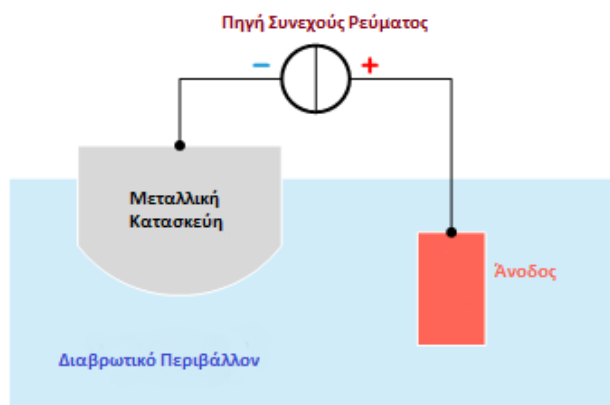
Για συστήματα σωληνώσεων από ανοξείδωτο χάλυβα που μεταφέρουν θαλασσινό νερό, η εσωτερική εντοπισμένη διάβρωση (localized corrosion) μπορεί να αποτραπεί αποτελεσματικά με την εφαρμογή της μεθόδου ελεγχόμενης αντίστασης καθοδικής προστασίας (Resistance Controlled Cathodic Protection -RCP). Στη συγκεκριμένη μέθοδο, εισάγεται μια αντίσταση μεταξύ της θυσιαζόμενης ανόδου και του αγωγού. Χαρακτηριστικό της είναι, ότι το ρεύμα που παρέχεται από την άνοδο και οι πτώσεις τάσης διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα με αποτέλεσμα το προστατευμένο μήκος σωλήνα από κάθε άνοδο να είναι αρκετά μεγάλο.



Εικόνα 1.7: Θυσιαζόμενοι Άνοδοι Αλουμινίου σε δεξαμενές Πλοίου (8)

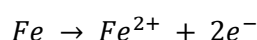
1.5 Μέθοδος Επιβαλλόμενου Ρεύματος (ICCP) (2) (5) (7)

Η εικόνα 1.8 απεικονίζει τη χρήση μιας εξωτερικής πηγής ισχύος για την παροχή της καθοδικής πόλωσης της μεταλλικής κατασκευής. Το κύκλωμα περιλαμβάνει την πηγή ισχύος, ένα βοηθητικό ηλεκτρόδιο που αποτελεί την άνοδο, το διαβρωτικό διάλυμα και τη κατασκευή που πρόκειται να προστατευθεί. Η διαφορά δυναμικού που προκαλείται από την πηγή, ωθεί την μεταφορά θετικού ρεύματος από την άνοδο μέσω διαβρωτικού διαλύματος και πάνω στη μεταλλική κατασκευή. Επομένως, η κατασκευή είναι καθοδικά πολωμένη (το δυναμικό της μειώνεται) και το θετικό ρεύμα επιστρέφει μέσω του κυκλώματος στην τροφοδοσία ρεύματος. Έτσι, για να επιτευχθεί καθοδική προστασία, το ηλεκτρόδιο και το δομικό στοιχείο πρέπει να είναι σε ηλεκτρολυτική και ηλεκτρονική επαφή.



Εικόνα 1.8 : Σχηματική Απεικόνιση ICCP μεθόδου (4)

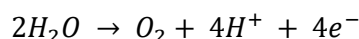
Η πηγή είναι συνήθως ένας μετασχηματιστής / ανορθωτής που μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα (A.C.) σε συνεχές ρεύμα (D.C.). Οι συνήθεις τιμές είναι στην περιοχή των 15-100V και 5-100A. Υπάρχουν τρεις γενικοί τύποι ανόδου που χρησιμοποιούνται στην καθοδική προστασία, αναλώσιμες, μη αναλώσιμες και ημι-αναλώσιμες. Τα αναλώσιμα ηλεκτρόδια υφίστανται ανοδική αντίδραση που οδηγεί στην κατανάλωση του υλικού τους. Έτσι, μια άνοδος που παράγεται από ανακυκλωμένο σίδηρο (scrap) παράγει θετικό ρεύμα από την αντίδραση :



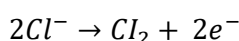
Δεδομένου ότι η άνοδος πρέπει να υπακούει στον νόμο του Faraday , προκύπτει ότι η διάλυση της ανόδου θα είναι ανάλογη προς το συνολικό ρεύμα που δημιουργείται.

Για παράδειγμα, ο ρυθμός κατανάλωσης για μια άνοδο από σίδηρο είναι περίπου ίση με 9 kg/Ay. (5) Έτσι, οι αναλώσιμες άνοδοι πρέπει να αντικαθίστανται ανά διαστήματα ή να έχουν επαρκές μέγεθος, ώστε να παραμείνουν ως πηγή ρεύματος για ολόκληρη τη διάρκεια ζωής της προστατευόμενης κατασκευής. Αυτό δημιουργεί ορισμένα προβλήματα στο σχεδιασμό, καθώς η άνοδος διαλύεται, η αντίσταση που παρουσιάζει το κύκλωμα αυξάνεται. Αλλά το κύριο μειονέκτημα οφείλεται στο ότι είναι δύσκολο να εξασφαλιστεί η συνεχής ηλεκτρική σύνδεση της υπό διάλυσης ανόδου με το υπόλοιπο κύκλωμα .

Οι μη αναλώσιμες άνοδοι , δηλαδή από τιτάνιο ή νιόβιο με επικάλυψη πλατίνας, διατηρούν μια ανοδική αντίδραση που αποσυνθέτει τα στοιχεία του υδατικού περιβάλλοντος αντί να διαλύει το ίδιο το μέταλλο της ανόδου. Σε υδατικά διαλύματα η αντίδραση μπορεί να είναι:



Ή με την παρουσία ιόντων χλωρίου:



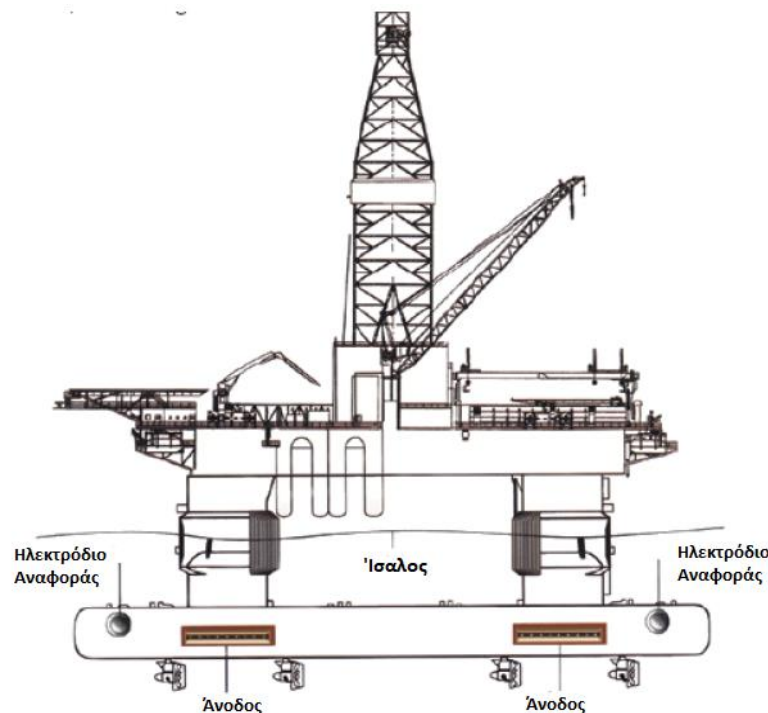
Ωστόσο, για να παραμείνουν άθικτες, πρέπει να είναι χημικά ανθεκτικές στα ανοδικά τους προϊόντα (οξύ και χλώριο) και, όταν τα προϊόντα είναι αέρια, πρέπει να παράγονται

συνθήκες που επιτρέπουν στο αέριο να διαφύγει και να μην παρεμβαίνει στην λειτουργία της ανόδου. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα ηλεκτρόδια με επικάλυψη πλατίνας επειδή μπορούν να λειτουργούν σε υψηλή πυκνότητα ρεύματος ($> 100 \text{ A / m}^2$) χωρίς βλάβη, αλλά στη συνέχεια θα παράγουν υψηλά επίπεδα οξύτητας ($\text{pH} < 2$) και μεγάλο όγκο αερίου. Ο σχεδιασμός της ανόδου και ο τρόπος εγκατάστασής της είναι, επομένως, κρίσιμος.

Τα ημι-αναλώσιμα ηλεκτρόδια υφίστανται μικρότερη τη διάλυση από τις αναλώσιμες ανόδους. Αυτό συμβαίνει επειδή η ανοδική αντίδραση μοιράζεται μεταξύ της οξειδωσης του υλικού της ανόδου και της οξειδωσης των στοιχείων του περιβάλλοντος (χωρίς συνακόλουθη απώλεια μετάλλου). Τα ηλεκτρόδια αυτά κατασκευάζονται από κράματα πυριτίου-σίδηρου, χρωμίου – πυριτίου-σίδηρου και γραφίτη.

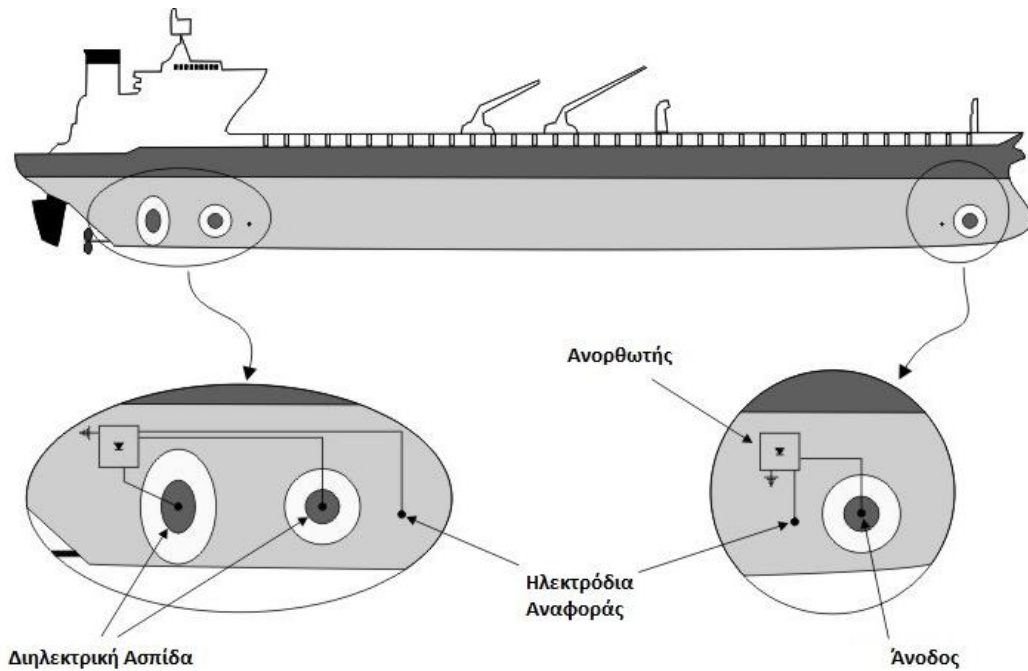
1.6 Εφαρμογές μεθόδου ICCP (2) (6)

Για την χρήση της καθοδικής προστασίας με την βοήθεια επιβαλλόμενου ρεύματος ICCP, οι άνοδοι μπορούν να διευθετηθούν με διαφορετικούς τρόπους. Στις σταθερές υπεράκτιες κατασκευές, οι άνοδοι μπορούν να τοποθετηθούν στην ίδια την κατασκευή (αλλά φυσικά και απομονωμένες από αυτήν), μπορούν να υποστηριχθούν από ειδικούς αγωγούς λιγότερο ή περισσότερο απομακρυσμένους από την κατασκευή ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν απομακρυσμένες άνοδοι που βρίσκονται στο βυθό της θάλασσας.



Εικόνα 1.9: Απεικόνιση της μεθόδου ICCP σε υπεράκτια πλατφόρμα με τοποθέτηση ανόδων πάνω στην μεταλλική κατασκευή (9)

Στις γάστρες πλοίων που προστατεύονται από επιβαλλόμενο ρεύμα, χρησιμοποιούνται άνοδοι σε συγκεκριμένες θέσεις, έτσι ώστε να αποφεύγεται η πρόσθετη υδροδυναμική αντίσταση. Γύρω από την άνοδο, η πλησιέστερη επιφάνεια χάλυβα καλύπτεται με διηλεκτρική ασπίδα ή επίστρωση με σκοπό την επίτευξη καλύτερης κατανομής ρεύματος.



Εικόνα 1.10: Απεικόνιση της μεθόδου ICCP σε πλοίο crude oil supertanker

1.7 Σύγκριση των δύο μεθόδων (2) (6)

Οι δυο μέθοδοι καθοδικής προστασίας που αναλυθήκαν παραπάνω χρησιμοποιούνται εξίσου σε εφαρμογές σε υπεράκτιες εξέδρες εξόρυξης φυσικών πόρων, σε γάστρες και δεξαμενές πλοίων, καθώς και σε οποιαδήποτε μεταλλική κατασκευή στη ξηρά (π.χ. σωληνώσεις) που χρήζει προστασίας από την διάβρωση.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου επιβαλλομένου ρεύματος (ICCP) είναι το υψηλό ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο παρέχεται από την εγκατάσταση του ανορθωτή και το χαμηλό κόστος εγκατάστασης (σε σύγκριση με τις θυσιαζόμενες ανόδους, οι οποίες απαιτούν την τοποθέτηση πολυάριθμων ανόδων). Επιπλέον με την προϋπόθεση ότι η μέθοδος ICCP έχει εγκατασταθεί σωστά και έχει λειτουργήσει με τη κατάλληλη πυκνότητα ρεύματος, η διάρκεια ζωής των ανόδων ICCP είναι αρκετά μεγαλύτερη. Είναι σύνηθες φαινόμενο να έχουμε ανορθωτές και συναφή εξοπλισμό σε συνεχή λειτουργία για αρκετές δεκαετίες και να χρειάζεται μόνο περιστασιακή συντήρηση για την αντικατάσταση των ανόδων.

Οι κύριοι περιορισμοί των συστημάτων ICCP περιλαμβάνουν την αυξημένη πιθανότητα ψαθυροποίησης του μετάλλου, λόγω της διάλυσης του υδρογόνου σε χάλυβες υψηλής αντοχής. Αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται σε αρθρώσεις που δεν έχουν συγκολληθεί σωστά. Επίσης, υπάρχει αυξημένη πιθανότητα καταστροφής των επικαλύψεων ή παράπλευρης διάβρωσης σε κοντινές κατασκευές. Απαιτείται ακόμα υψηλά εκπαιδευμένο προσωπικό συντήρησης και επιθεώρησης λόγω των κινδύνων που σχετίζονται με τη συντήρηση των ανορθωτών και την αποφυγή των συνδέσεων αντίστροφης πολικότητας στους ανορθωτές. Οι σχετικά υψηλές απαιτήσεις συντήρησης και κατάρτισης προσωπικού των συστημάτων ICCP είναι οι λόγοι για τους οποίους τα περισσότερα συστήματα καθοδικής προστασίας στην ξηρά χρησιμοποιούν την μέθοδο των θυσιαζόμενων ανόδων.

Στον παρακάτω πίνακα γίνεται σύγκριση των θυσιαζόμενων ανόδων και της ICCP. Αξίζει να αναφερθεί ότι η εγκατάσταση μιας θυσιαζόμενης ανόδου είναι αρκετά φθηνή και είναι δυνατή η τοποθέτηση ανόδων με κόστος χαμηλότερο από \$100 ανά άνοδο ακόμα και αν η μεταλλική κατασκευή είναι ήδη εκτεθειμένη. Συνεπώς, το χαμηλό αρχικό κόστος σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος συντήρησης / επιθεώρησης καθιστά την καθοδική προστασία με θυσιαζόμενες ανόδους την κύρια επιλογή για πολλές υπεράκτιες εφαρμογές.

Πίνακας 1.2 :Σύγκριση των δύο μεθόδων καθοδικής προστασίας³

Μέθοδος Καθοδικής Προστασίας	
Θυσιαζόμενες Άοδοι	Επιβαλλόμενο Ρεύμα
Χαμηλό αρχικό κεφάλαιο επένδυσης	Μικρότερο ολικό κόστος για μεγάλες μεταλλικές κατασκευές
Καθορισμένη τιμή της προσφερόμενης τάσης (V) και του προσφερόμενου ρεύματος (I)	Η τιμή της επιβαλλόμενης τάσης και του ρεύματος μπορούν να μεταβληθούν βάσει των αναγκών του συστήματος
Χαμηλή τιμή της τάσης (V)	Χαμηλές αλλά και υψηλές τιμές των τάσεων (V)
Χαμηλό κόστος συντήρησης	Υψηλό κόστος συντήρησης
Δεν υπάρχει πιθανότητα αντιστροφής του δυναμικού	Υπάρχει η πιθανότητα αντιστροφής του δυναμικού
Δεν υπάρχει ανάγκη εξωτερικής πηγής	Είναι αναγκαία η ύπαρξη εξωτερικής πηγής
Δεν υπάρχει η πιθανότητα υπερβολικής τιμής ρεύματος	Υπάρχει η πιθανότητα υπερβολικής τιμής ρεύματος που έχει ως αποτέλεσμα την διάλυση των επιστρώσεων

³ Metallurgy and Corrosion Control in Oil and Gas Production ; Robert Heidersbach ; John Wiley & Sons, Inc. Publication ; Singapore ; 2011

Μέρος 2^ο : Μελέτη Προστασίας Υπεράκτιων Ανεμογεννητριών

2.1 Σημασία της Προστασίας της Κατασκευής (10) (11) (12)

Οι υπεράκτιες κατασκευές εντοπίζονται κυρίως σε περιοχές με έντονα διαβρωτικό περιβάλλον και με ακραία καιρικά φαινόμενα. Έτσι καθ' όλη την διάρκεια ζωής τους δέχονται μεγάλα κρουστικά φορτία λόγω του αέρα και των κυμάτων. Τα θεμέλια των κατασκευών αυτών, κατασκευασμένα από χάλυβα, είναι συχνά ή μονίμως, εκτεθειμένα στο αλμυρό νερό της θάλασσας και ως εκ τούτου υποβάλλονται σε διαβρωτικές και βιολογικές καταπονήσεις. Περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η υγρασία, η περιοδικά διαβρεχόμενη επιφάνεια, οι ενώσεις χλωρίου, η θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία επιδρούν αρνητικά στην αντοχή της κατασκευής στον χρόνο.

Για τα τμήματα της κατασκευής που είναι μόνιμα μέσα στο νερό, παράγοντες όπως η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού, η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου, η ένταση του θαλάσσιου ρεύματος, η ανάπτυξη θαλάσσιων οργανισμών αλλά και τα ασβεστολιθικά στρώματα απόθεσης (calcareous deposit⁴) σε συνδυασμό με την υψηλή αλατότητα του νερού παίζουν καθοριστικό ρολό στην επιτάχυνση της διάβρωσης.

Σε αντίθεση με τις θαλάσσιες εξέδρες εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου, οι οποίες βρίσκονται επίσης σε υπεράκτιες συνθήκες, μια ανεμογεννήτρια εκτίθεται σε υψηλά δυναμικά φορτία που έχουν ως αποτέλεσμα η κατασκευή να υπόκειται σε κόπωση. Τα φορτία διάβρωσης και κόπωσης αποτελούν κρίσιμα προβλήματα που απειλούν τη δομική αντοχή των υπεράκτιων ανεμογεννητριών και είναι υπεύθυνα για την αστοχία της κατασκευής.

Η διάβρωση μειώνει την ικανότητα του υλικού να αντισταθεί στην κόπωση. Για μια δεδομένη διάταξη που υπόκειται σε υψηλά φορτία κόπωσης ο αριθμός κύκλων φορτίου μέχρι την αστοχία είναι συνήθως 3 έως 5 φορές υψηλότερη για μια κατασκευή που είναι προστατευμένη από την διάβρωση σε σύγκριση με μια που δεν έχει ληφθεί κάποιο μέτρο προστασίας⁵. Επομένως, τα συστήματα ελέγχου της διάβρωσης είναι απαραίτητα για την πρόβλεψη και πρόληψη των αστοχιών σε πρώιμο στάδιο.

Τα συστήματα προστασίας από τη διάβρωση αποτελούν σημαντική παράμετρο για την ποσοτική εκτίμηση της διάρκειας ζωής μιας κατασκευής, όπως είναι οι ανεμογεννήτριες.

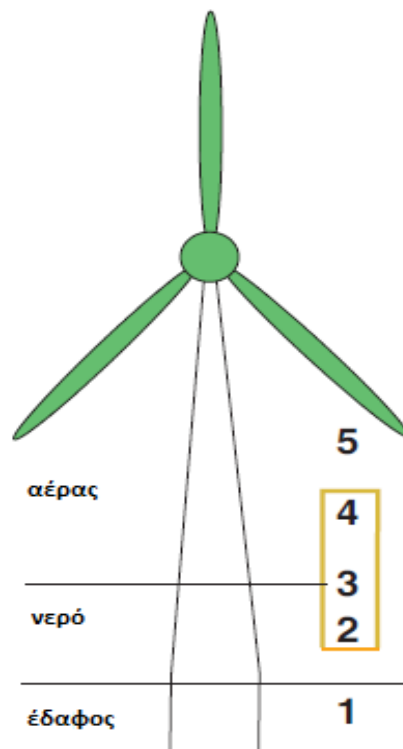
⁴ Ο όρος ασβεστολιθική απόθεση (calcareous deposit) αναφέρεται σε μια στοιβάδα αποτελούμενη από μίγμα ανθρακικού ασβεστίου και υδροξειδίου του μαγνησίου που αποτίθεται σε επιφάνειες καθοδικά προστατευμένες (εξαιτίας της αύξησης του pH πλησίον των επιφανειών)

⁵ DNV-RP-C203 Fatigue Design of Offshore Steel Structures (April 2010)

2.2 Ζώνες Διάβρωσης (12) (11)

Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζονται οι διάφορες περιοχές που χωρίζεται το σώμα μια ανεμογεννήτριας και όπου μελετάται ξεχωριστά η διάβρωση. Πιο αναλυτικά υπάρχουν:

- Ζώνη 1 (buried zone) : η περιοχή όπου ο πυλώνας της γεννήτριας είναι θαμμένος μέσα στο έδαφος
- Ζώνη 2 (underwater zone) η επιφάνεια της γεννήτριας που είναι μόνιμα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας
- Ζώνη 3 (intermediate zone) : η περιοχή όπου η στάθμη του νερού μεταβάλλεται διαρκώς λόγω φυσικών ή τεχνητών επιδράσεων και η συνδυασμένη επίδραση του νερού και της ατμόσφαιρας αυξάνει τα επίπεδα της διάβρωσης.
- Ζώνη 4 (splash zone) : η περιοχή όπου είναι βρεγμένη λόγω του ψεκασμού που προκαλείται από τα κύματα. Η συγκεκριμένη ζώνη είναι αρκετά επιρρεπής σε υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης, ειδικά αν η ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε θαλασσινό νερό.
- Ζώνη 5 (atmospheric zone) : η επιφάνεια της ανεμογεννήτριας που είναι στον αέρα



Εικόνα 11 : Ζώνες Περιβάλλοντος (Environmental Zones) μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας (11)

Ο ρυθμός διάβρωσης του χάλυβα στις ζώνες 2,3 και 4 μπορεί να είναι σε ορισμένες περιπτώσεις μεγαλύτερος από 2,5 mm ανά έτος⁶. Είναι γνωστό, επίσης, ότι τα υψηλότερα ποσοστά διάβρωσης του χάλυβα τα συναντάμε στην ζώνη ψεκασμού (splash zone). Σύμφωνα με τον Πίνακα 2.1, η ζώνη 4, η οποία χαρακτηρίζει την περιοχή της σύνδεσης μεταξύ των θεμελίων της ανεμογεννήτριας και του πυλώνα, φαίνεται να απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή λόγω των υψηλών ρυθμών διάβρωσης. Ωστόσο είναι αναγκαίο να επισημανθεί ότι οι τιμές του Πίνακα 2.1 βασίζονται στη διάβρωση μη προστατευμένου χάλυβα όπου δεν έχει εφαρμοστεί κανένα μετρό καθοδικής προστασίας ή επικάλυψης.

Πίνακας 2.1: Ρυθμός Διάβρωσης του χάλυβα σε υπεράκτιες κατασκευές⁷

Ζώνη Περιβάλλοντος	Ρυθμός Διάβρωσης (mm/χρόνο)
Θαμμένη στο έδαφος (1)	0.1
Υποθαλάσσια (2)	0.2
Μεσαία Ζώνη (3)	0.25
Ζώνη Ψεκασμού (4)	0.4

⁶ P. Ault, The use of coatings for corrosion control on offshore oil structures (2006); Protect. Coatings Europe, Vol. 11, No. 4, pp. 42-46 (2006)

2.3 Σημασία Μελέτης Πλωτών Ανεμογεννητριών (13) (14)

Ο στόχος της Ευρωπαϊκής Ένωσης για αύξηση του ποσοστού των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο 20% της συνολικής παραγωγής ενέργειας μέχρι το 2020 έχει ωθήσει στην μελέτη και εφαρμογή εναλλακτικών μεθόδων αξιοποίησης των πράσινων τεχνολογιών. Όσον αφορά στην αιολική ενέργεια, ενώ τα χερσαία αιολικά πάρκα έχουν κάνει μεγάλη πρόοδο τις τελευταίες δεκαετίες, η διαθεσιμότητα των περιοχών έχει μειωθεί αισθητά. Ως εκ τούτου, η υπεράκτια αιολική ενέργεια μπορεί να θεωρηθεί ως σημαντική εναλλακτική επιλογή για την παραγωγή καθαρής ενέργειας στην Ευρώπη.

Η κατασκευή πλωτών ανεμογεννητριών σε υπεράκτια αιολικά πάρκα θεωρείται το πρώτο βήμα στην εκμετάλλευση της ενέργειας που προσφέρει η θάλασσα. Αυτό προκύπτει από την παρατήρηση ότι η υπεράκτια αιολική ενέργεια είναι πιο εύκολα εκμεταλλεύσιμη σε σχέση με τα κύματα και τα υποθαλάσσια ρεύματα.

Οι δύο βασικές μορφές υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι οι σταθερές (fixed) και οι πλωτές (floating) κατασκευές. Οι πρώτες τοποθετούνται σε ρηχά νερά ενώ οι δεύτερες σε θαλάσσιες περιοχές με βάθος μεγαλύτερο των 60 μέτρων. Σχεδόν όλα τα υπεράκτια αιολικά πάρκα αποτελούνται από σταθερές (fixed) ανεμογεννήτριες. Εξάιρεση αποτελεί το πρώτο και μοναδικό αιολικό πάρκο με πέντε πλωτές ανεμογεννήτριες που βρίσκεται 25 χιλιόμετρα από τις ακτές του Peterhead στην Σκωτία [14].

Παρόλα αυτά, το 70% του θαλάσσιου κόσμου αποτελείται από βαθιά ύδατα, γεγονός που καθιστά την μελλοντική μελέτη αποκλειστικά προσανατολισμένη στην παραγωγή ενέργειας από πλωτές κατασκευές.



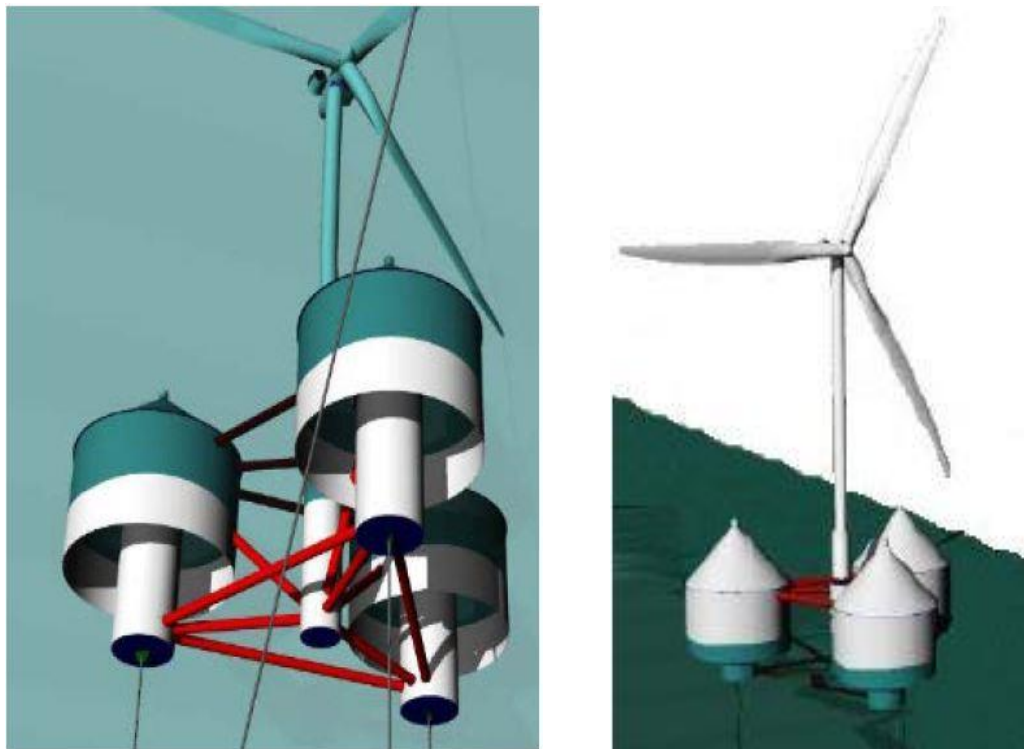
Εικόνα 12: Αιολικό Πάρκο Hywind Scotland (13)

Μέρος 3^ο : Πλωτή Κατασκευή Πολλαπλών Χρήσεων (15)

Με γνώμονα την στροφή της διεθνούς οικονομίας στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και με στόχο την δημιουργία μίας κατασκευής που θα εκμεταλλεύεται στο μέγιστο την θέση της , το Εργαστήριο Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης σε συνεργασία με το Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, μελέτησε και ανέπτυξε μια πλωτή αγκυρωμένη κατασκευή πολλαπλής χρήσης, κατάλληλη για την εκμετάλλευση του υπεράκτιου αιολικού και κυματικού δυναμικού στην περιοχή του Αιγαίου.

3.1 Γενικά Στοιχεία Πλωτής Κατασκευής (15)

Η πλωτή κατασκευή που σχεδιάστηκε αποτελεί ένα είδος υπεράκτιας ανεμογεννήτριας με την ιδιαιτερότητα ότι πέρα από την αιολική ενέργεια εκμεταλλεύεται και το κυματικό δυναμικό της περιοχής . Αυτό επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση τριών συσκευών ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης (Oscillating Water Column – OWC). Το βάθος του νερού εγκατάστασης είναι τις τάξης των 120-200 μέτρων και η αγκύρωση της πλατφόρμας πραγματοποιείται με κατακόρυφους κλάδους αγκύρωσης υπό προένταση.



Εικόνα 3.1 Πλωτή κατασκευή πολλαπλών χρήσεων όπως αυτή μελετήθηκε από το εργαστήριο πλωτών κατασκευών της σχολής ΝΜΜ (15)

Η συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης (OWC) αποτελεί μια κοίλη ημιβυθιζόμενη κατασκευή που έχει ως σκοπό την εκμετάλλευση της περιοδικής αλλαγής του ύψους της επιφάνειας από τους επερχόμενους κυματισμούς για την παραγωγή

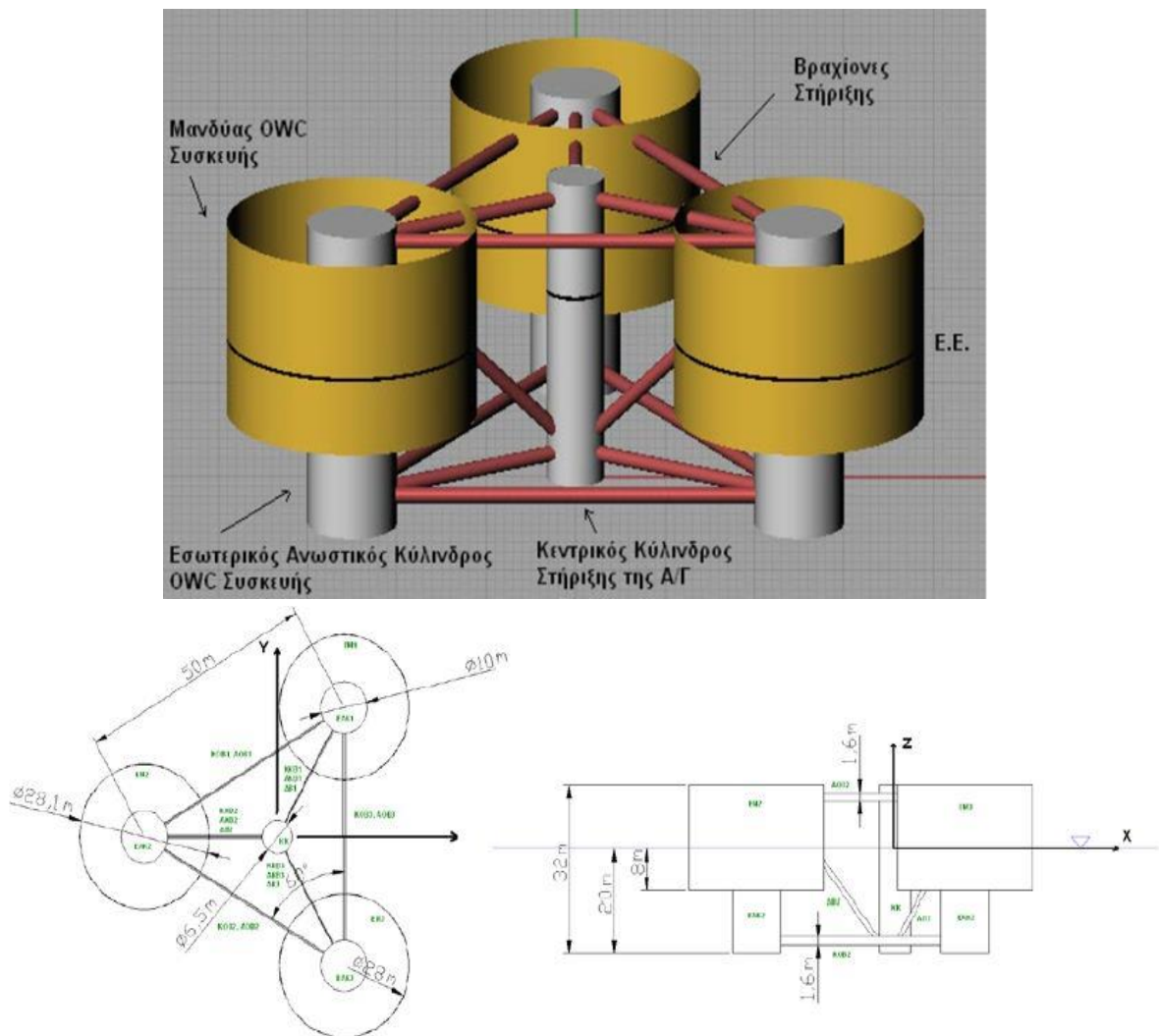
ενέργειας . Η συσκευή έχει ένα άνοιγμα στη θάλασσα κάτω από την επιφάνεια των υδάτων που επιτρέπει την εισαγωγή και την εξαγωγή του νερού. Αυτή η περιοδική κίνηση προκαλεί τον εγκλωβισμό του αέρα στο πάνω μέρος της υδάτινης στήλης και τον εξαναγκάζει να συμπιέζεται και να αποσυμπιέζεται ανάλογα με την κίνηση των κυματισμών . Ο αέρας διέρχεται μέσα από έναν αεροστρόβιλο με αποτέλεσμα να έχουμε παραγωγή ενέργειας. Στην πλωτή κατασκευή πολλαπλών χρήσεων έχει γίνει μελέτη για εγκατάσταση τριών OWC's στα άκρα της τριγωνικής πλατφόρμας που στηρίζεται η ανεμογεννήτρια ισχύος 10 MW .

3.2 Ανάλυση γεωμετρικών χαρακτηριστικών πλωτής κατασκευής (15)

Προκειμένου να επιτευχθεί η προκαταρκτική σχεδίαση της καθοδικής προστασίας της κατασκευής από την διάβρωση είναι αναγκαίο να γίνει ανάλυση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της. Γνωρίζοντας την γεωμετρία της κατασκευής και βάσει των προδιαγραφών του νορβηγικού νηογνώμονα (DNV-GI) καθορίζεται το είδος και ο απαιτούμενος αριθμός των θυσιαζόμενων ανόδων. Όπως φαίνεται από τον πίνακα 3.1 οι συσκευές OWC αποτελούνται από τα παρακάτω στοιχεία :

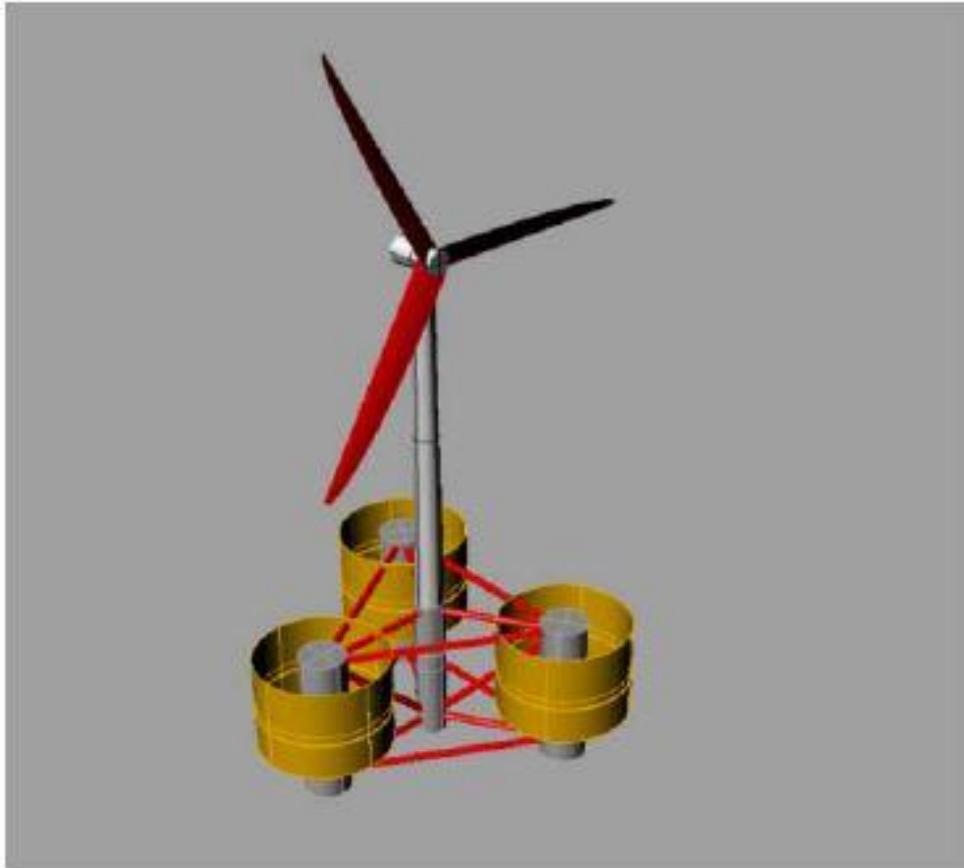
Πίνακας 3.1: Γεωμετρία της πλωτής κατασκευής πολλαπλών χρήσεων (15)

OWC συσκευές	
Ακτίνα εσωτερικού Ανωστικού Κυλίνδρου	5 m
Βύθισμα εσωτερικού Ανωστικού Κυλίνδρου	20 m
Συνολικό ύψος εσωτερικού Ανωστικού Κυλ.	32 m
Εσωτ./Εξωτ. Ακτίνα Εξωτ. Μανδύα	14m /14.05m
Βύθισμα Εξωτ. Μανδύα	8 m
Διάκεντρος εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων	50 m
Κεντρικός Κύλινδρος στήριξης Ανεμογεννήτριας	
Ακτίνα κεντρικού κυλίνδρου στήριξης	3.25 m
Βύθισμά Κεντρικού Κυλίνδρου	20m
Διάμετρος Κυλινδρικών στοιχείων δικτύωματος	1.6m



Εικόνα 3.2: Τρισδιάστατη άποψη της βάσης της ανεμογεννήτριας καθώς και κάτοψη και πλάγια όψη (15)

Αναλυτικότερα, η κατασκευή αποτελείται από τρεις συσκευές ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης (OWC), σύνθετης γεωμετρίας, που αποτελούνται από έναν εσωτερικό ανωστικό κύλινδρο και έναν εξωτερικό μανδύα, οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι στις κορυφές ισοπλεύρου τριγώνου, στο γεωμετρικό κέντρο του οποίου βρίσκεται ο κατακόρυφος κεντρικός κύλινδρος, στον οποίο εδράζεται η ανεμογεννήτρια. Οι εσωτερικοί ανωστικοί κύλινδροι των συσκευών ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης συνδέονται με τον κεντρικό κύλινδρο μέσω μικρότερων κυλινδρικών βραχιόνων, αλλά και μέσω εγκαρσίων μελών. Ο κάθε εσωτερικός ανωστικός κύλινδρος (ΕΑΚ) ξεκινά πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια και συνεχίζει προς τον πυθμένα της κατασκευής, μέσα στο νερό. Καθένας από τους κύλινδρους αυτούς περιβάλλεται από εξωτερικό μανδύα για την δημιουργία εσωτερικής υδάτινης επιφάνειας του θαλάμου της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης.



Εικόνα 13: Τρισδιάστατη αναπαράσταση της πλωτής ημιβυθισμένης κατασκευής πολλαπλού σκοπού (15)

Η ανάλυση και η πλήρη κατανόηση της γεωμετρίας της κατασκευής αποτελεί βασική προϋπόθεση για τον υπολογισμό της επιφάνειας της κατασκευής στην συνέχεια. Η επιφάνεια της πλωτής εξέδρας που είναι επιρρεπής στην διάβρωση από την θάλασσα είναι ο πρωταρχικός παράγοντας για την εύρεση του αριθμού και μεγέθους των θυσιαζόμενων ανόδων που θα τοποθετηθούν έτσι ώστε να έχουμε την ζητούμενη καθοδική προστασία της κατασκευής.

Μέρος 4^ο : Μελέτη Καθοδικής Προστασίας πλωτής κατασκευής πολλαπλών χρήσεων (16) (12) (15)

Σύμφωνα με τον οδηγό «DNV-OS-J101: Design of Offshore Wind Turbine Structures» που εκδίδεται από τον νορβηγικό νηογνώμονα για την ασφαλή κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, ισχύουν τα παρακάτω.

Η καθοδική προστασία των υπεράκτιων κατασκευών με χρήση θυσιαζόμενων ανόδων (GACP) έχει καθιερωθεί και γενικά προτιμάται για τις συγκεκριμένες μεταλλικές κατασκευές. Η χρήση της μεθόδου επιβαλλόμενου ρεύματος (ICCP) μπορεί να προσφέρει ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι της προηγούμενης μεθόδου, αλλά έχει αποδειχθεί ότι δεν ενδείκνυται για την προστασία υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Για αυτόν τον λόγο, δεν υπάρχει κάποιο πρότυπο σχεδιασμού που δίνει λεπτομερείς απαιτήσεις και συμβουλές όπως υπάρχει για τα συστήματα θυσιαζόμενων ανόδων. Ακόμη και με επαρκή σχεδιασμό, τα συστήματα ICCP είναι πιο ευάλωτα σε περιβαλλοντικές ζημιές σε σχέση με τα συστήματα GACP. Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες μπορούν να εγκατασταθούν σε απόσταση ακόμα και 25 χιλιομέτρων μακριά από την ακτή σε σημεία που είναι εντόνως επιρρεπή σε εξωτερικές δυναμικές φορτίσεις, όπως ανέμους και κυματισμούς .

Για την επιλογή του είδους και αριθμού των θυσιαζόμενων ανόδων, ο οδηγός του DNV παραπέμπει στην χρήση των προτεινόμενων διαδικασιών «DNVGL-RP-B401: Recommended Practice – Cathodic Protection Design». Οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τον σχεδιασμό της καθοδικής προστασίας είναι :

- Η περιεκτικότητα του διαλυόμενου οξυγόνου στο νερό
- Τα θαλάσσια ρεύματα
- Η θερμοκρασία
- Η υποθαλάσσια ανάπτυξη οργανισμών
- Η αλατότητα του νερού

Οι παραπάνω παράμετροι είναι αλληλένδετες και ποικίλλουν ανάλογα με τη γεωγραφική θέση, το βάθος και την εποχή. Για αυτόν το λόγο, δεν είναι εφικτό να δοθεί ακριβής σχέση μεταξύ των περιβαλλοντικών παραμέτρων του θαλασσινού νερού που αναφέρονται παραπάνω με το απαιτούμενο καθοδικό ρεύμα, ώστε να επιτευχθεί και να διατηρηθεί η καθοδική προστασία της κατασκευής. Για τον εξορθολογισμό του σχεδιασμού της ΚΠ για θαλάσσιες εφαρμογές , οι προεπιλεγμένες πυκνότητες ρεύματος σχεδιασμού, i_c (A / m²), ορίζονται από το DNVGL-RP-B401 βάσει:

- 1) Των κλιματικών περιοχών (με βάση την σχετική και μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας)
- 2) Του βάθους εγκατάστασης της υπεράκτιας κατασκευής

Η θερμοκρασία και η αλατότητα του θαλασσινού νερού προσδιορίζουν την ειδική αντίσταση θαλασσινού νερού, ρ (ohm·m), η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αντίστασης ανόδου, R_a (ohm). Η αντίσταση ανόδου αποτελεί βασικό παράγοντα για τον υπολογισμό του παρεχόμενου ρεύματος από τις ανόδους.

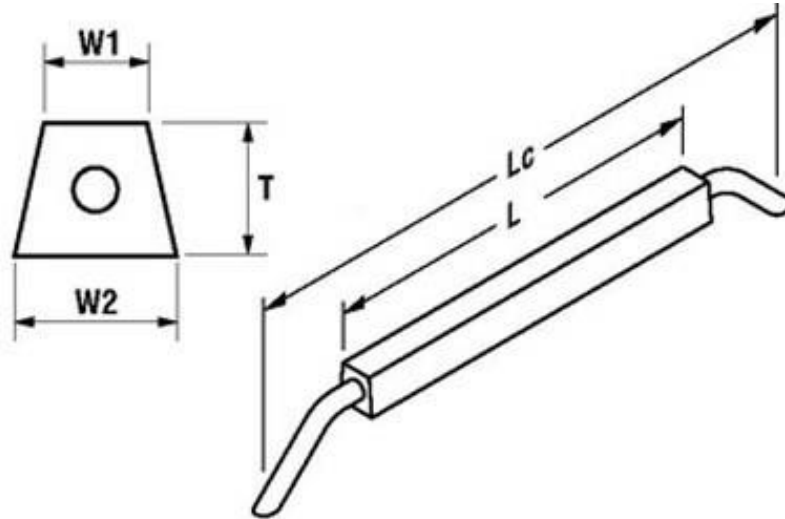
4.1 Επιλογή Ανόδων για την προστασία της μεταλλικής κατασκευής

Το πρώτο βήμα στην μελέτη της καθοδικής προστασίας είναι η επιλογή τυποποιημένων θυσιαζόμενων ανόδων, ικανών να προστατέψουν την κατασκευή σε ικανοποιητικό βαθμό. Μετά από δοκιμή διαφόρων μεγεθών και τύπων ανόδων επιλέχθηκε άνοδος από κράμα αλουμινίου της εταιρείας Deerwater Corrosion Services Inc. . Η υψηλή ηλεκτροχημική χωρητικότητα των ανόδων αλουμινίου οδηγεί σε μικρότερο ρυθμό κατανάλωσης με αποτέλεσμα η συνολική απαίτηση βάρους για την προστασία της κατασκευής να είναι αισθητά μικρότερη . Επιπλέον η διαφορά δυναμικού του κράματος αλουμινίου είναι αρνητικότερη σε αντίθεση με το κράμα ψευδαργύρου. Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται συνολικά οι λόγοι που κάνουν τις ανόδους αλουμινίου καλύτερη επιλογή σε σχέση με τις ανόδους από κράμα ψευδαργύρου.

Πίνακας 4.1: Πλεονεκτήματα Θυσιαζόμενων Ανόδων Αλουμινίων έναντι Ψευδαργύρου (6)

Πλεονεκτήματα Ανόδων Κραμάτων Αλουμινίου	
Λιγότερο Απαιτούμενο Βάρος	Η ηλεκτροχημική χωρητικότητα(Ah/kg) του αλουμινίου είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή του ψευδαργύρου, με αποτέλεσμα το απαιτούμενο βάρος να είναι μικρότερο .
Μικρότερος Αριθμός Ανόδων / Μειωμένο Κόστος	Λόγω της μικρότερης απαίτησης σε βάρος , απαιτούνται λιγότερες άνοδοι και συνεπώς το κόστος είναι αισθητά μικρότερο
Υψηλότερη Παρεχόμενη τάση	Η τάση των ανόδων κραμάτων αλουμινίου (-1.05 V) είναι υψηλότερη σε σχέση με αυτή των ανόδων κραμάτων ψευδαργύρου (-1.03V) . Κατά συνέπεια, θα παρέχεται περισσότερη προστασία

Από τον κατάλογο των τυποποιημένων θυσιαζόμενων ανόδων της αμερικανικής εταιρείας Deerwater Corrosion Services Inc επιλέχθηκε η άνοδος με τις μεγαλύτερες διαστάσεις. Αυτή η επιλογή έγινε λόγω της μεγάλης έκτασης της προστατευόμενης επιφάνειας, άρα και της υψηλότερης απαίτησης σε ρεύμα προστασίας. Παρακάτω εμφανίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανόδου καθώς και οι φυσικές ιδιότητες του κράματος .



Εικόνα 4.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ανόδου με συγκολλητά άκρα

Η τυποποίηση της ανόδου καλείται A533.0S1 και έχει τις παρακάτω διαστάσεις:

Πίνακας 4.2: Διαστάσεις Ανόδου A533.0S1 (17)

Μήκος L(mm)	Μήκος L ₂ (mm)	Ύψος T (mm)	Πλάτος W ₁ (mm)	Πλάτος W ₂ (mm)	Μεικτό Βάρος (Kg)	Καθαρό Βάρος (Kg)
2570	2840	270	310	335	603	533

Το κράμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το **Deep 10 (Aluminum - Shallow Water)**. Το οποίο αποτελεί κράμα αλουμίνιου και είναι πιστοποιημένο από τον DNV για την χρήση του ως υλικό για άνοδο στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Πίνακας 4.3: Στοιχεία κράματος Deep 10 (Aluminum - Shallow Water) και Deep 7 (Aluminum - Deep Water) (17)

	Deep 10 Aluminum	Deep 7 Aluminum
Στοιχείο Κραμάτωσης	Ποσοστό (% επι του βάρους)	
Zn	4.75-5.75	4.75-5.25
In	0.010-0.020	0.015-0.025
Al	Balance	Balance
Si	Max 0.10	Max 0.10
Cu	Max 0.006	Max 0.03
Fe	Max 0.10	Max 0.07
Άλλο	Max 0.02	Max 0.02

Πίνακας 4.4 :Στοιχεία Απόδοσης Ανόδου σε θαλασσινό νερό (Anode Performance Data) (17)

	Deep 10 Aluminum	Deep 7 Aluminum
Ηλεκτροχημική χωρητικότητα (Capacity)	2420 Ah/Kg	2090 Ah/Kg
Ρυθμός Κατανάλωσης (Consumption Rate)	3,62 kg/Ayr	4.19 kg/Ayr
Ηλεκτρικό Δυναμικό σε κλειστό κύκλωμα (Closed Circuit Potential)	-1.05 V (Ag/AgCl)	-1.05 V (Ag/AgCl)
Ειδικό Βάρος (Specific Gravity)	2.71 g/cm ³	2.71 g/cm ³

Μετά τον προσδιορισμό του τύπου ανόδου πρέπει να γίνει ο υπολογισμός του αριθμού των ανόδων με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχεται η απαιτούμενη καθοδική προστασία της υπεράκτιας πλωτής κατασκευής.

4.2 Επιλογή Αριθμού ανόδων βάσει της προδιαγραφής του DNV-GL

Στο ένθετο «DNVGL-RP-B401: Recommended Practice – Cathodic Protection Design» περιγράφεται η διαδικασία που πρέπει να ακολουθήσει ο μελετητής για να υπολογίσει τον σωστό αριθμό των ανόδων.

Υπολογισμός του εμβαδού της OWC

Το πρώτο βήμα είναι ο υπολογισμός του εμβαδού της υπό προστασίας μεταλλικής επιφάνειας. Σύμφωνα με τις προηγούμενες παραγράφους, ως προστατευόμενη επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί το μέρος της κατασκευής που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του νερού, μαζί με την επιφάνεια της κατασκευής που ανήκει στην ζώνη ψεκασμού (splash zone). Η ζώνη ψεκασμού θεωρείται ότι βρίσκεται έως και 5 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Παρακάτω φαίνονται οι υπολογισμοί του εμβαδού της κατασκευής για βύθισμα ίσο με 25 μέτρα.

Πίνακας 4.5: Υπολογισμός εμβαδού επιφάνειας μεταλλικής κατασκευής

Στοιχείο	Αριθμός N	Μήκος L (m)	Ακτίνα R (m)	Εμβαδόν A (m ²)
Κεντρικός Πυλώνας WT	1	25	3.25	576.86
Κεντρικός Πυλώνας OWC	3	13	14.05	3442.77
Καπάκια OWC	3	25	5	2827.35
Μπρακέτα (Εξωτερικά)	3	40	0.8	603.17
Μπρακέτα (Οριζόντια)	3	20.62	0.8	310.93
Μπρακέτα (Πλάγια)	3	27.9	0.8	420.55
ΣΥΝΟΛΟ:				8181.63

Υπολογισμός τιμής ρεύματος ανόδου I_{tot}

Βάσει των οδηγιών του DNV-GL για τον υπολογισμό του αριθμού των ανόδων χρειάζεται πρώτα να υπολογιστεί το ρεύμα που θα εξέρχεται από την κάθε άνοδο βάσει του Νόμου του Ohm και έχοντας κάνει τις παρακάτω παραδοχές :

- 1) Το δυναμικό της ανόδου βασίζεται στον πίνακα δυναμικού κλειστού κυκλώματος που δίνει ο νηογνώμονας για θερμοκρασίες περιβάλλοντος θαλασσινού νερού .
- 2) Στην περίπτωση που η υπό προστασία κατασκευή είναι από χάλυβα το δυναμικό θα πρέπει να θεωρείται ίσο με -0.80 Volt.

Σύμφωνα με τον νόμο του Ohm το συνολικό ρεύμα που παρέχει μια άνοδος είναι ίσο με :

$$I_{tot} = \frac{(E_C - E_A)}{R_{Atot}} (Amperes)$$

Όπου,

I_{tot} : Το εξαγόμενο ρεύμα ανόδου (Ampere)

$E_C - E_A$: Η διαφορά δυναμικού μεταξύ της ανόδου και της καθόδου (Volts)

R_{Atot} : Αντίσταση της ανόδου στον ηλεκτρολύτη (Ohms)

Η διαφορά δυναμικού όπως προκύπτει από τα παραπάνω είναι ίση με :

$$\Delta E = E_C - E_A = -0.8 - (-1.05) = 0.25V .$$

Για τον υπολογισμό της αντίστασης θα γίνει χρήση των προτεινόμενων τύπων που υπάρχουν στον οδηγό DNVGL-RP-B401 , όπου για ανόδους με μικρή διατομή σε σχέση μήκος και τοποθετημένες με εφαρμοστό τρόπο (flush mounted) πάνω στην κατασκευή ισχύει ότι :

$$R_a = \frac{\rho}{2S} (Ohms)$$

Όπου,

ρ : Ειδική αντίσταση του θαλασσινού νερού ίση με 0.2 Ohm.m

S : Ο μέσος όρος του μήκους και του πλάτους ανόδου ίσος με 1.39 m

L : Μήκος ανόδου ίσο με 2.63 m

Από τα παραπάνω η αντίσταση προκύπτει ίση με **$R_a = 0.070 \text{ Ohms}$** . Έτσι βάσει του νομού του Ohm έχουμε ότι :

$$I_{tot} = 3.55 A$$

Υπολογισμός τιμής ρεύματος προστασίας I_C

Στην συνέχεια πρέπει να υπολογίσουμε το απαιτούμενο ρεύμα προστασίας της μεταλλικής κατασκευής, ώστε διατηρηθεί η καθοδική προστασία καθ' όλη την διάρκεια της ζωής της πλωτής ανεμογεννήτριας. Σύμφωνα με τις οδηγίες του DNV-GL το απαιτούμενο ρεύμα είναι ίσο με το εμβαδόν της προστατευόμενης επιφάνειας (A_C) επί την τιμή της πυκνότητας ρεύματος σχεδίασης (i_c - design current density) επί τον συντελεστή διάσπασης της επικάλυψης (f_c - coating breakdown factor). Δηλαδή :

$$I_C = A_C \cdot i_c \cdot f_c$$

Ο συντελεστής διάσπασης της επικάλυψης είναι συνάρτηση των ιδιοτήτων της επικάλυψης που έχει χρησιμοποιηθεί, των παραμέτρων λειτουργίας και του χρόνου. Ο f_c μπορεί να εκφραστεί ως:

$$f_c = a + b \cdot t$$

Οπού το t μετριέται σε χρόνια και οι συντελεστές a και b εξαρτώνται από το περιβάλλον και τις ιδιότητες της επικάλυψης.

Πίνακας 4.6: Προτεινόμενες τιμές των συντελεστών a και b (16)

Βύθισμα (m)	Κατηγορία Επικάλυψης		
	I	II	III
	a=0.10	a=0.05	a=0.02
0-30	b=0.10	b=0.025	b=0.012
>30	b=0.05	b=0.015	b=0.008

Οι κατηγορίες επικάλυψης αναλύονται στον παρακάτω πίνακα :

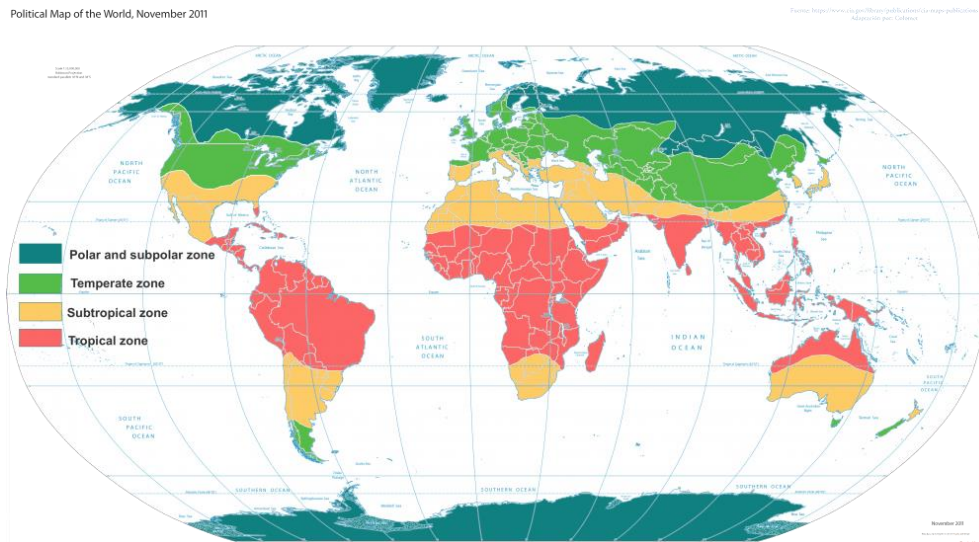
Πίνακας 4.7: Κατηγορίες επικαλύψεων (16)

Κατηγορία I	Μια στρώση εποξειδικής βαφής (πάχος: min 20 μm)
Κατηγορία II	Μία ή περισσότερες στρώσεις βαφής (πάχος: min 250 μm)
Κατηγορία III	Δύο ή περισσότερες στρώσεις βαφής (πάχος: min 350 μm)

Στην περίπτωση της πλωτής κατασκευής πολλαπλών χρήσεων θα θεωρηθεί ότι η περιοχή ψεκασμού και η επιφάνεια που είναι μονίμως βυθισμένη ανήκουν στην 1^η κατηγορία .

Δεδομένου ότι η κατασκευή έχει βύθισμα 20 μέτρων, έχουμε ότι για τον συντελεστή διάσπασης της επικάλυψης f_c , $\alpha=0.10$ και $b=0.025$. Το προσδόκιμο ζωής της πλωτής ανεμογεννήτριας είναι ίσο με 20 χρόνια [18] , έτσι $t=20$ y . Συνεπώς $f_c=2.26>1$. Στους κανονισμούς αναφέρει ότι στην περίπτωσή που το f_c είναι μεγαλύτερο της μονάδας , πρέπει να λαμβάνεται ίσο με 1 . Άρα $f_c=1$.

Για την μέση πυκνότητα ρεύματος σχεδίασης (mean design current density) ο οδηγός του DNV-GL προτείνει για κατασκευές από χάλυβα που είναι τοποθετημένες στην υποτροπική ζώνη (το Αιγαίο πέλαγος ανήκει στην υποτροπική ζώνη με μέσες θερμοκρασίες 12 με 20 °C) να είναι ίση με $i_c = 0.08 \text{ A/m}^2$



Εικόνα 4.2: Κλιματικές Ζώνες του Κόσμου , όπως διακρίνεται το Αιγαίο πέλαγος βρίσκεται στην υποτροπική ζώνη (subtropical)⁸

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το απαιτούμενο ρεύμα προστασίας της μεταλλικής κατασκευής είναι ίσο με :

$$I_c = 654.53 \text{ A}$$

Υπολογισμός αριθμού ανόδων

Ο αριθμός ανόδων (N) που προκύπτει με βάση το απαιτούμενο ρεύμα είναι ίσος με :

$$N = \text{ROUNDUP} \left(\frac{I_c}{I_a} \right) = 185 \text{ anodes}$$

⁸ World Climate Zones; A. Balasubramanian (2017) ; University of Mysore,

Όμως, πρέπει να ληφθεί υπόψιν και το απαιτούμενο βάρος των ανόδων, ώστε να έχουμε την ζητούμενη καθοδική προστασία της μεταλλικής επιφάνειας :

$$M_a = \frac{I_c \cdot t_f \cdot 8760}{u \cdot \varepsilon} \quad (Kg)$$

Όπου,

$I_c = 654.53 \text{ A}$ [απαιτούμενο ρεύμα προστασίας]

$t_f = 20 \text{ χρόνια}$ [εκτιμώμενη διάρκεια ζωής της κατασκευής]

$u = 2420 \text{ Ah /kg}$ [ηλεκτροχημική χωρητικότητα κράματος]

$\varepsilon = 0.85$ [ποσοστό του καθαρού βάρους της ανόδου που έχει καταναλωθεί στο τέλος της ζωής της κατασκευής]

Πίνακας 4.8: Προτεινόμενες τιμές συντελεστή κατανάλωσης (ε) για τον σχεδιασμό της καθοδικής προστασίας (16)

Τύπος Ανόδου	Συντελεστής Κατανάλωσης (ε)
Long slender stand-off $L > 4r$	0.90
Short slender stand-off $L < 4r$	0.85
Long flush mounted $L > 4 \cdot \text{πλάτος}$ $L > 4 \cdot \text{πάχος}$	0.85
Short flush-mounted, bracelet and other types	0.80

Από τα παραπάνω προκύπτει :

$$M_a = 55748 \text{ Kg}$$

Συνεπώς, ο αριθμός των ανόδων για να ικανοποιείται η συγκεκριμένη απαίτηση είναι ίσος με :

$$N = \text{ROUNDUP} \left(\frac{M_a}{M_{\alpha}} \right) = 161 \text{ anodes}$$

Τέλος, από συγκερασμό των δύο απαιτούμενων αριθμών ανόδων προκύπτει ότι για να υπάρχει η απαιτούμενη καθοδική προστασία της υπεράκτιας πλωτής κατασκευής πολλαπλών χρήσεων στην θάλασσα του Αιγαίου πελάγους απαιτούνται **185** άνοδοι βάσει των κανονισμών του DNV-GL.

Μέρος 5^ο : Προσομοίωση Στατικού Φαινομένου Καθοδικής Προστασίας (18)_(19)_(20)

Η διάβρωση αποτελεί ένα πολύπλοκο φυσικοχημικό φαινόμενο το οποίο δεν έχει κατανοηθεί πλήρως ακόμα. Η μελέτη της αλληλεπίδρασης μίας κατασκευής σε ένα διαβρωτικό περιβάλλον μπορεί να πραγματοποιηθεί με εργαστηριακά πειράματα κάνοντας αναγκαίες υποθέσεις απλοποίησης της μελέτης, ή και με την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων που διέπουν το φαινόμενο σε κάποιο πρόγραμμα προσομοίωσης. Προφανώς και στην δεύτερη μέθοδο είναι αναγκαία η απλοποίηση των εξισώσεων με την χρήση κατάλληλων αρχικών συνθηκών αλλά έχουμε τα εξής πλεονεκτήματα :

1. Ακριβής προσέγγιση του φαινομένου σε μικρό χρονικό διάστημα. Επίλυση πολύπλοκων εξισώσεων σε χρόνο δευτερολέπτων.
2. Προσομοίωση του φαινομένου σε σχετικά πολύπλοκες γεωμετρίες.
3. Με την χρήση των βιβλιοθηκών του προγράμματος, ο μελετητής μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα εύρος υλικών και διαβρωτικών συνθηκών που στο εργαστήριο του μπορεί να μην είχε την δυνατότητα.

Έχοντας μελετήσει αναλυτικά τη γεωμετρία της προστατευόμενης επιφάνειας της προστατευόμενης κατασκευής OWC (Μέρος 3),ορίζοντας στη συνέχεια τα χαρακτηριστικά, το είδος των θυσιαζόμενων ανόδων και έχοντας υπολογίσει τον απαιτούμενο αριθμό, είναι δυνατή η προσομοίωση του φαινομένου μέσω του προγράμματος Comsol Multiphysics 5.3 .

5.1 Comsol Multiphysics 5.3

Το COMSOL Multiphysics® είναι ένα λογισμικό γενικής χρήσης, ιδανικό για εφαρμογές προσομοίωσης φυσικών, χημικών και μηχανικών φαινομένων. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM) για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων (Partial Differential Equations / PDEs) με τις αντίστοιχες αρχικές και συνοριακές συνθήκες για τέτοιου είδους φαινόμενα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο του ή να επεκταθεί η λειτουργικότητά του με οποιονδήποτε συνδυασμό συμπληρωματικών ενοτήτων για προσομοίωση σχεδιασμών και διαδικασιών από διάφορους κλάδους της φυσικής και της χημείας, όπως ο ηλεκτρομαγνητισμός, η δομική μηχανική, η ακουστική, η μηχανική των ρευστών και η μεταφορά θερμότητας.

Τα βασικά βήματα για την δημιουργία του μοντέλου με χρήση του προγράμματος Comsol Multiphysics είναι τα εξής :

- Επιλογή κατάλληλου είδους πρόσθετης εφαρμογής του Comsol.
- Ορισμός σταθερών και δεδομένων που θα εισαχθούν στο πρόγραμμα.
- Δημιουργία Γεωμετρίας.
- Ορισμός της φυσικής του συστήματος και των συνοριακών συνθηκών του.
- Διακριτοποίηση του προβλήματος.
- Επίλυση του προβλήματος και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, θα χρησιμοποιηθεί το πρόσθετο πρόγραμμα του λογισμικού πακέτου COMSOL Multiphysics : Corrosion Module. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση των ηλεκτροχημικών διεργασιών που οδηγούν στη διάβρωση, την κατανόηση του βαθμού διάβρωσης που μπορεί να υπάρξει κατά τη διάρκεια της ζωής μίας κατασκευής και την εφαρμογή προληπτικών μέτρων για τον περιορισμό της.

5.2 Ηλεκτροχημική Θεωρία Προσομοίωσης

Τα ηλεκτροχημικά φαινόμενα διέπονται από τον συνδυασμό δύο βασικών αρχών. Η πρώτη είναι η αρχή της διατήρησης του φορτίου και ρεύματος στο σύστημα του ηλεκτρολύτη και των ηλεκτροδίων, ενώ η δεύτερη είναι η αρχή διατήρησης της μάζας των διαλυόμενων ουσιών στον όγκο του ηλεκτρολύτη. Τα συγκεκριμένα φαινόμενα περιγράφονται μαθηματικά με τη χρήση μερικών διαφορικών εξισώσεων (Partial Differential Equations -PDEs) και επιλύονται με την χρήση των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών στη γεωμετρία του προβλήματος.

Στην γενική περίπτωση, η αρχή διατήρησης του φορτίου ακολουθεί το νόμο του Gauss (Εξίσωση (5.1)) και η μεταφορά μάζας για ιδανικό διάλυμα υπακούει στις εξισώσεις Nernst-Planck (Εξίσωση (5.2)) και την εξίσωση συνέχειας (Εξίσωση (5.3)).

$$-\nabla \cdot (\epsilon \nabla \varphi) = \rho \quad (5.1)$$

$$N_i = -D_i \nabla C_i - z_i u_i C_i \nabla \varphi + C_i U \quad (5.2)$$

$$\frac{\theta C_i}{\theta t} + \nabla N_i = R_i \quad (5.3)$$

Όπου, ϵ : ηλεκτρική διαπερατότητα ($F \cdot m^{-1}$), φ : δυναμικό(V), ρ : πυκνότητα φορτίου($C \cdot m^{-3}$), C_i : συγκέντρωση ουσίας i ($mol \cdot m^{-3}$), N_i : ροή ουσίας i ($mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), D_i : σταθερά διάχυσης ουσίας i ($m^2 \cdot s^{-1}$), Z_i : αριθμός φορτίου ουσίας i , U_i : ηλεκτρική κινητικότητα ουσίας i ($m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$), U : ταχύτητα μείγματος($m \cdot s^{-1}$), R_i : ρυθμός παραγωγής ή κατανάλωσης της ουσίας i ($mol \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$).

Μαζί, αυτές οι εξισώσεις καλούνται Εξισώσεις Nernst-Planck-Poisson και χαρακτηρίζονται από εξαιρετική μη γραμμικότητα. Η πλήρης επίλυση των εξισώσεων είναι σπανίως πρακτική ή επιθυμητή για πραγματικά προβλήματα και γι' αυτό τον λόγο γίνονται οι παρακάτω απλοποιήσεις. Η πιο ευρέως εφαρμοσμένη παραδοχή είναι αυτή της ηλεκτροουδετερότητας (Εξίσωση (5.4)) η οποία εφαρμόζεται για κλίμακες σε επίπεδο μεγαλύτερο των νανόμετρων.

$$\sum_i z_i C_i = 0 \quad (5.4)$$

Υποθέτοντας ότι ισχύει η ηλεκτροουδετερότητα του διαλύματος και υπάρχει ελάχιστη μεταβολή της απόλυτης συγκέντρωσης των ιόντων στο διάλυμα, το ηλεκτρικό ρεύμα του ηλεκτρολύτη υπακούει τον νόμο του Ohm (Εξίσωση (5.5)) και έχει σταθερή αγωγιμότητα (Εξίσωση (5.6)).

$$-\nabla \cdot (\sigma_{sol} \nabla \varphi) = Q \quad (5.5)$$

$$\sigma_{sol} \approx F \sum_i z_i^2 u_i C_i \quad (5.6)$$

Στον νόμο του Ohm, η αναλογία του ρεύματος προς το ηλεκτρικό πεδίο εκφράζεται με την αγωγιμότητα. Καθώς η συγκέντρωση του αδρανούς ηλεκτρολύτη (supporting electrolyte) αυξάνεται σε σύγκριση με την συγκέντρωση των αντιδρώντων, η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνεται και το ηλεκτρικό πεδίο τείνει στο μηδέν για το συγκεκριμένο ηλεκτρικό ρεύμα. Με την αύξηση της παρουσίας του αδρανούς ηλεκτρολύτη στο διάλυμα είναι σύνηθες να θεωρούμε ότι η συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη είναι «ουσιαστικά άπειρη» με αποτέλεσμα τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας των αντιδρώντων να συμβαίνουν μόνο με διάχυση (diffusion) και δεν υπάρχει μεταφορά φορτίου (mitigation). Συνεπώς σύμφωνα με τον 2^ο νόμο του Fick για μία ασυμπίεστη ροή ισχύει :

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -D_i \nabla^2 C_i - u \nabla C_i \quad (5.7)$$

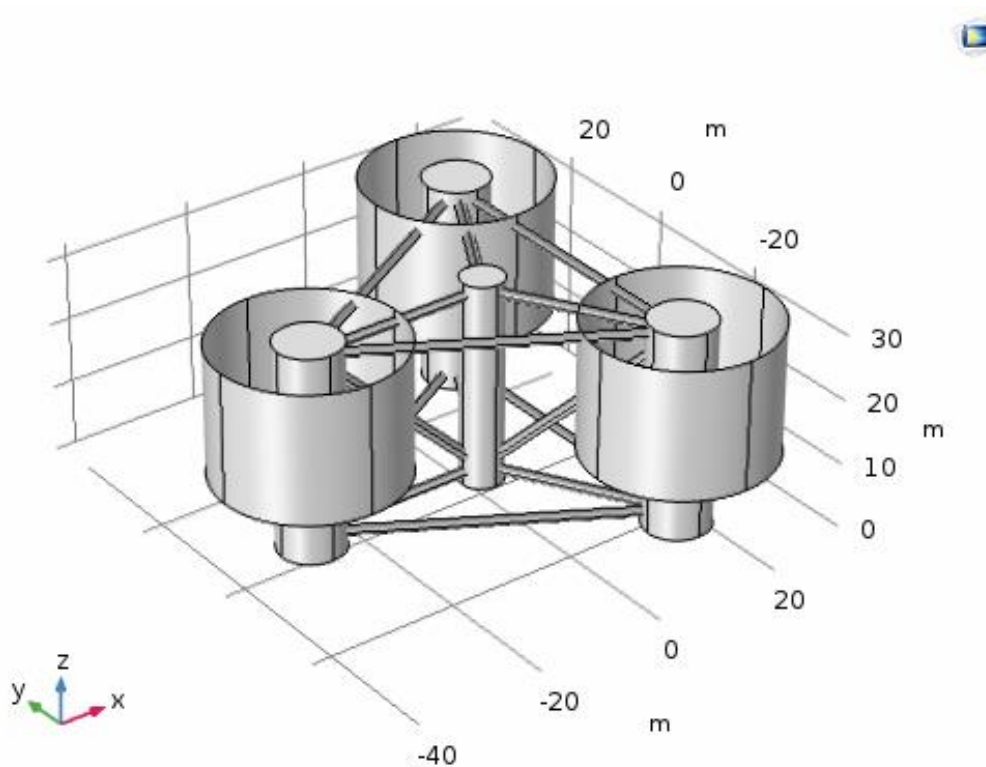
5.3 Διαδικασία Προσομοίωσης

Για την προσομοίωση της καθοδικής προστασίας με την εφαρμογή θυσιαζόμενων ανόδων της υπεράκτιας πλωτής κατασκευής πολλαπλών χρήσεων ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

- i. Δημιουργία γεωμετρίας μεταλλικής κατασκευής στο γραφικό περιβάλλον του προγράμματος.
- ii. Σχεδιασμός και τοποθέτηση των ανόδων πάνω στην προστατευόμενη επιφάνεια.
- iii. Ορισμός της φυσικής του συστήματος και των ποσοτικών φυσικών χαρακτηριστικών των υλικών των ανόδων και της μεταλλικής κατασκευής.
- iv. Δημιουργία πλέγματος (Mesh) για την διεξαγωγή των υπολογισμών μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements Method).
- v. Εκτέλεση του προγράμματος και υπολογισμός της διαφοράς δυναμικού και της πυκνότητας ρεύματος στην κατασκευή και στις ανόδους.
- vi. Δημιουργία σχετικών διαγραμμάτων
- vii. Σε περίπτωση που δεν επιτυγχάνεται η απαιτούμενη προστασία χρειάζεται ο επαναπροσδιορισμός της θέσης των ανόδων (βήμα ii)

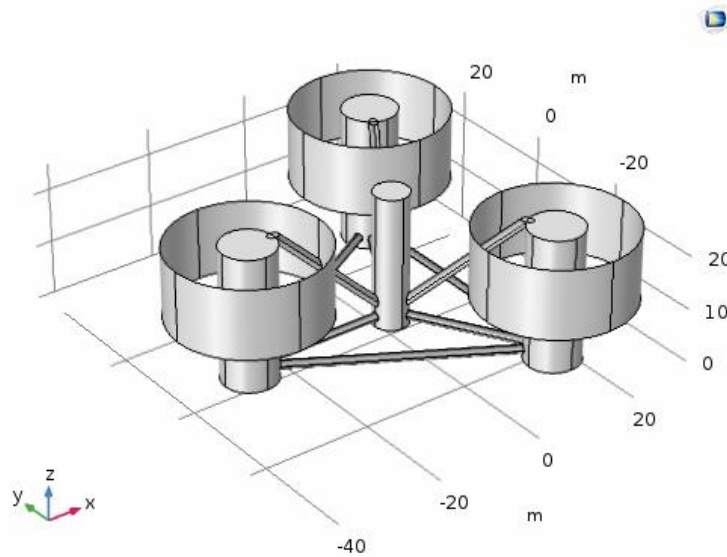
5.4 Δημιουργία Γεωμετρίας (OWC)

Η δημιουργία της μεταλλικής κατασκευής στο γραφικό περιβάλλον του COMSOL Multiphysics βασίστηκε στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που δίνονται σε προηγούμενη παράγραφο. Πιο αναλυτικά, κατασκευάστηκαν: Ο Κεντρικός κύλινδρος στήριξης της ανεμογεννήτριας, οι τρεις εσωτερικοί ανωτικοί κύλινδροι και εξωτερικοί μανδύες της συσκευής OWC καθώς και οι βραχίονες στήριξης.



Εικόνα 5.1: Γεωμετρία πλατφόρμας στο γραφικό περιβάλλον του COMSOL Multiphysics

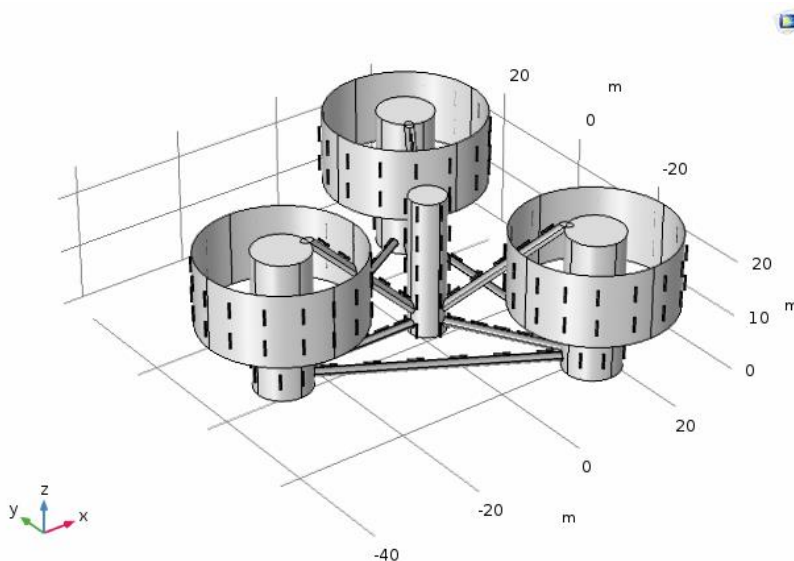
Στη μελέτη της διάβρωσης από το θαλάσσιο περιβάλλον της πλωτής εξέδρας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, συμπεριλαμβάνεται η ζώνη της μονίμως βυθισμένη επιφάνειας και σε αυτήν προστίθεται και η ζώνη ψεκασμού. Συνεπώς, στην παραπάνω γεωμετρία έχει αφαιρεθεί το μέρος των εξάλλων το οποίο δεν συμπεριλαμβάνεται. Δηλαδή η κατασκευή θα φτάνει μέχρι το βύθισμα $T=25$ μέτρα .



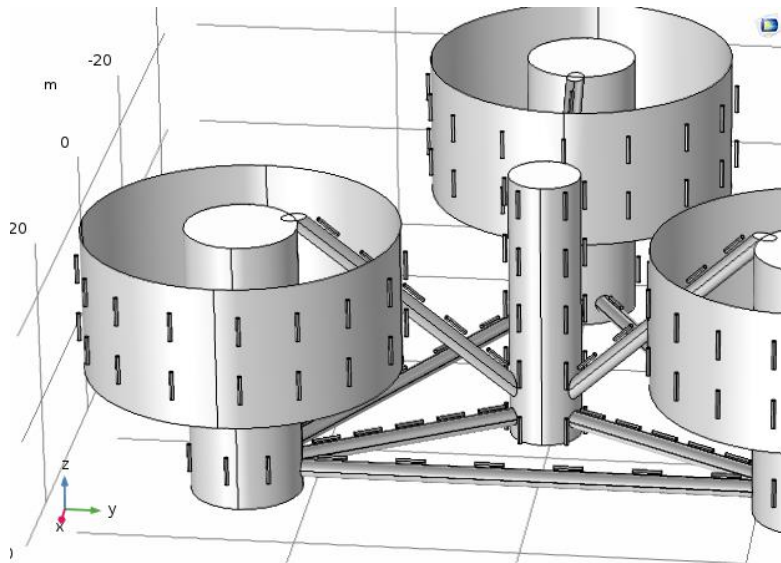
Εικόνα 5.2: Γεωμετρία της υπό προστασίας επιφάνειας στο γραφικό περιβάλλον COMSOL Multiphysics

5.5 Σχεδίαση και τοποθέτηση Ανόδων

Συμφωνά με τις οδηγίες του DNV-GL η τοποθέτηση των ανόδων πρέπει να γίνει συμμετρικά πάνω στην κατασκευή έτσι ώστε να παρέχεται όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη καθοδική προστασία. Οι άνοδοι δεν πρέπει να τοποθετηθούν σε σημεία της κατασκευής που καταπονούνται από υψηλά φορτία με κίνδυνο μηχανικής κόπωσης. Ο αριθμός των τεμαχίων σύμφωνα με τη μελέτη που έγινε είναι ίσος με 185 τεμχ , αλλά για την επίτευξη της απαιτούμενης συμμετρίας τοποθετήθηκαν 195 άνοδοι. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των θυσιαζόμενων ανόδων A533.0S1 έχουν ήδη αναφερθεί παραπάνω (Παράγραφος 4.1). Στη συνέχεια παρουσιάζεται η τελική διάταξη των ανόδων (Εικ. 5.3, 5.4).

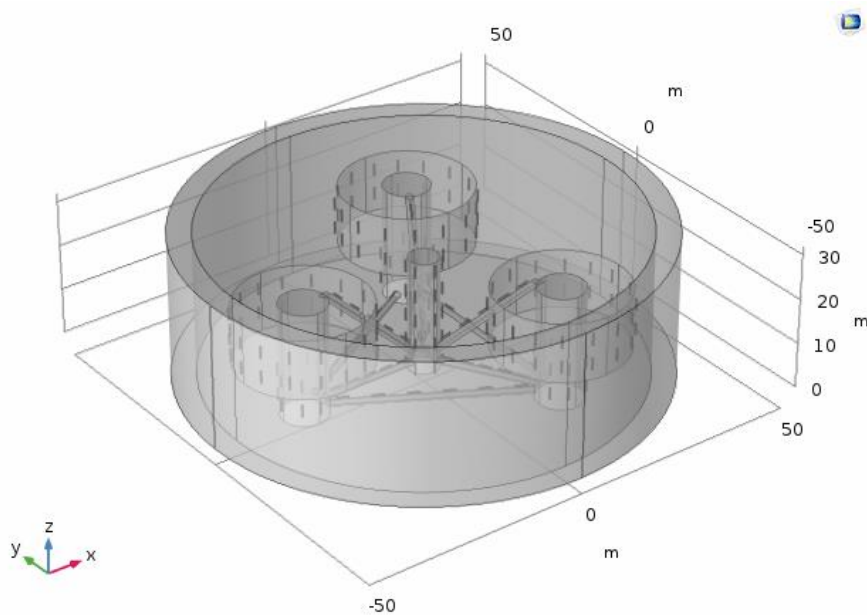


Εικόνα 5.3: Διάταξη θυσιαζόμενων ανόδων στην προστατευόμενη επιφάνεια των OWC



Εικόνα 5.4: Λεπτομέρεια της διάταξη θυσιαζόμενων ανόδων στην προστατευόμενη επιφάνεια των OWC

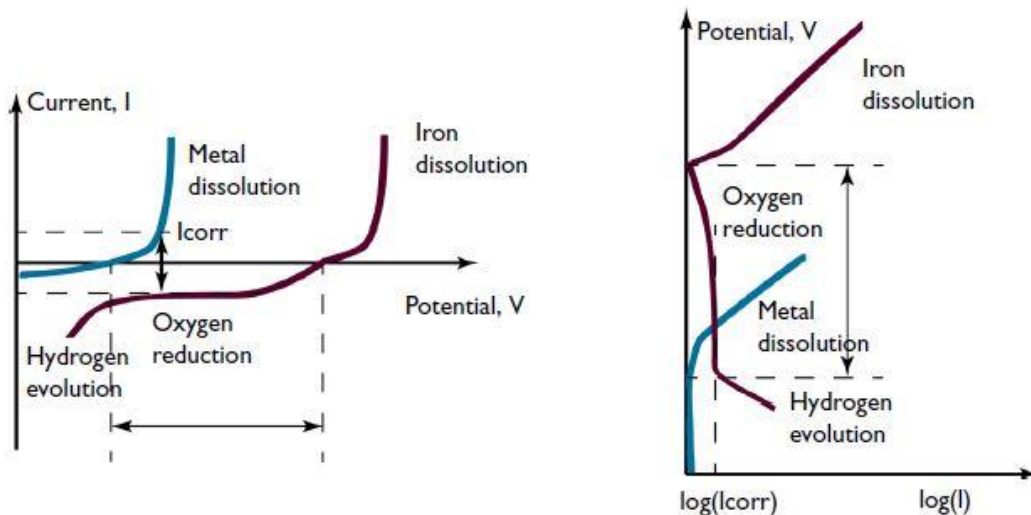
Έχοντας κατασκευάσει την γεωμετρία της καθόδου (επιφάνεια των συσκευών OWC) και της ανόδου (θυσιαζόμενες άνοδοι) του συστήματος, το επόμενο βήμα είναι να οριστεί ο όγκος που καταλαμβάνει ο ηλεκτρολύτης (θαλασσινό νερό). Θεωρούμε ότι ο ηλεκτρολύτης καταλαμβάνει τον όγκο ενός κυλίνδρου ακτίνας 50 μέτρων και ύψους 25 μέτρων έτσι ώστε να περιβάλλει ολόκληρη την μεταλλική κατασκευή. Ο εξωτερικός κύλινδρος όπως φαίνεται στην εικόνα ορίζεται ως μια άπειρη περιοχή στοιχείων (Infinite Element Domain), η οποία επαναπροσδιορίζει τις εξισώσεις που διέπουν το φαινόμενο της διάβρωσης, ώστε να αντιπροσωπεύει τα σημεία ενός έως και χίλιες φορές μεγαλύτερου κυλίνδρου (Εικ.5.5).



Εικόνα 5.5: ο εσωτερικός και εξωτερικός κύλινδρος που ορίζουν τον όγκο μέσα στον οποίον θα πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί

5.6 Φυσική του συστήματος (19) (21) (22)

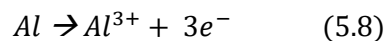
Η βασική αρχή της καθοδικής προστασίας που χρησιμοποιεί θυσιαζόμενες ανόδους είναι η ακόλουθη: Η χαλύβδινη κατασκευή συνδέεται αγώγιμα με ένα λιγότερο ευγενές μέταλλο, στην περίπτωση μας, κράμα αλουμινίου και αυτό οδηγεί στην ανοδική πόλωση της θυσιαζόμενης ανόδου και στην καθοδική πόλωση της υπό προστασίας επιφάνειας όταν βυθίζονται στο θαλασσινό νερό. Οι άνοδοι διαλύονται μέσω της ανοδικής διάλυσης του μετάλλου, ενώ η αναγωγή του οξυγόνου λαμβάνει χώρα πάνω στην επιφάνεια του χάλυβα. Η παροχή οξυγόνου είναι αυτό που συχνά περιορίζει την πυκνότητα ρεύματος για την αναγωγή του οξυγόνου, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει ένα όριο ρεύματος που έχει σταθερή τιμή για ένα εύρος μερικών εκατοντάδων millivolts δυναμικού επιφάνειας του χάλυβα.



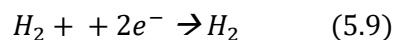
Εικόνα 5.6 :Διάγραμμα πόλωσης των θυσιαζόμενων ανόδων (μπλε καμπύλη) και της αναγωγής του οξυγόνου που συμβαίνει στην επιφάνεια του χάλυβα (κόκκινη καμπύλη) . Στο αριστερό διάγραμμα παρουσιάζεται η τιμή του ρεύματος της ανόδου και της καθόδου συναρτήσει του ηλεκτρικού δυναμικού. Ενώ σ τα δεξιά παρουσιάζεται το ηλεκτρικό δυναμικό ως συνάρτηση του λογαρίθμου της απόλυτης τιμής του ρεύματος. (19)

Οι χημικές αντιδράσεις που περιγράφουν το φαινόμενο έχουν ως ακολούθως :

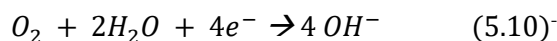
I. Ανοδική διάλυση του μετάλλου της ανόδου:



II. Σχηματισμός υδρογόνου:



III. Αναγωγή Οξυγόνου



Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι το πρώτο βήμα στο σχεδιασμό ενός συστήματος καθοδικής προστασίας είναι η διερεύνηση του δυναμικού E της χαλύβδινης κατασκευής υποθέτοντας ένα σταθερό καθοδικό ρεύμα I_{CORR} . Η οριακή τιμή του ρεύματος αυτού είναι συνάρτηση του δυναμικού της κατασκευής. Το δυναμικό της

κατασκευής πρέπει να λαμβάνει τιμές εντός του εύρους του δυναμικού προστασίας, δηλαδή όπου αφενός αποτρέπεται η διάβρωση του χάλυβα (σε υψηλές τιμές δυναμικού) και αφετέρου παρεμποδίζεται η ψαθυροποίηση του λόγω υδρογόνου (σε χαμηλές τιμές δυναμικού). Σύμφωνα με την προδιαγραφή του DNV-GL το δυναμικό της μεταλλικής επιφάνειας των OWC πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ **-1.10** και **-0.9Volts**.

Η μεταβολή του δυναμικού (πόλωση ή υπέρταση) μπορεί να επέλθει εξαιτίας των ακόλουθων παραγόντων :

- α) Της μεταβολής της συγκέντρωσης των ιόντων που υπάρχουν στον ηλεκτρολύτη στην επιφάνεια του χάλυβα από την ροή του ρεύματος (Πόλωση Συγκέντρωσης),
- β) Του ενεργειακού φράγματος των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων και της αντίστασης μεταφοράς του φορτίου (Πόλωση Ενεργοποίησης),
- γ) Της αντίστασης που έχει το θαλασσινό νερό δεδομένου της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας (Ωμική πτώση τάσης).

Στην παρούσα μελέτη, η σύσταση του θαλασσινού νερού (ηλεκτρολύτης) θεωρείται ότι μεταβάλλεται σε πολύ μικρό βαθμό και ότι η διάχυση των ιόντων είναι αμελητέα με αποτέλεσμα η πόλωση συγκέντρωσης να αγνοείται. Στην συνέχεια, κάνουμε την υπόθεση ότι οι χημικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα με υψηλή χημική κινητική, συνεπώς αμελητέα θεωρείται και η πόλωση ενεργοποίησης.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι γίνεται η χρήση Πρωτογενούς Ανάλυσης Κατανομής Πυκνότητας Ρεύματος στο σύστημα (Primary Current Density Distribution Analysis) λαμβάνοντας υπόψη μόνο την μεταβολή του δυναμικού (Πόλωση) λόγω της ωμικής πτώσης τάσης.

Το δυναμικό στην επιφάνεια των ανόδων θεωρείται σταθερό και για τον συγκεκριμένο τύπο ανόδων συμφωνά με την παράγραφο 4.1 είναι ίσο με :

$$E_{eq,Al} = -1.05 \text{ Volts}$$

Η αντίδραση της αναγωγής οξυγόνου στην επιφάνεια του χάλυβα σύμφωνα με την εικόνα 5.6 λαμβάνει χώρα με τιμή ίση με την οριακή τιμή πυκνότητα ρεύματος i_l (limiting current density). Στην συγκεκριμένη τιμή, το φαινόμενο της αναγωγής του οξυγόνου στην επιφάνεια είναι περιορισμένο και η μεταλλική επιφάνεια είναι επαρκώς προστατευμένη σε τέτοιο βαθμό, ώστε τα ρεύματα που προκαλούν διάβρωση των μετάλλων να αμεληθούν. Αυτό συνεπάγεται μια σταθερή κατάσταση οριακής τιμής πυκνότητας ρεύματος i_{cor} στην επιφάνεια του χάλυβα. Η συνοριακή συνθήκη για την επιφάνεια του χάλυβα είναι:

$$-n \cdot i_l = i_{limOx} = i_{cor} \quad (5.11)$$

Έτσι η τιμή της πυκνότητα ρεύματος στην επιφάνεια του χάλυβα θεωρείται ίση με $i_{limOxygen} = i_{cor} = -0.1 \text{ A/m}^2$

Name	Expression	Value	Description
sigma_sea	5[S/m]	5 S/m	Ηλ. αγωγιμότητα θαλ. νερού
Eeq_Al	-1.05 [V]	-1.05 V	Δυναμικό ανόδων
i_oxygen	-0.1[A/m^2]	-0.1 A/m ²	Πυκνότητα ρεύματος αναγωγής οξυγόνου

Εικόνα 5.7: Συνολικά οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν όπως φαίνονται στο γραφικό περιβάλλον του COMSOL Multiphysics

5.7 Διακριτοποίηση Προβλήματος (Meshing)

Η βασική αρχή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method) είναι η προσέγγιση μίας συνεχούς συνάρτησης χρησιμοποιώντας διακριτά στοιχεία. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται διακριτοποίηση και περιλαμβάνει την απλοποίηση μίας περίπλοκης γεωμετρίας με τη χρήση απλούστερων γεωμετρικών σχημάτων (πεπερασμένων στοιχείων). Τα στοιχεία αυτά πρέπει να καλύψουν όλη την περιοχή όπου λαμβάνει χώρα το φαινόμενο.

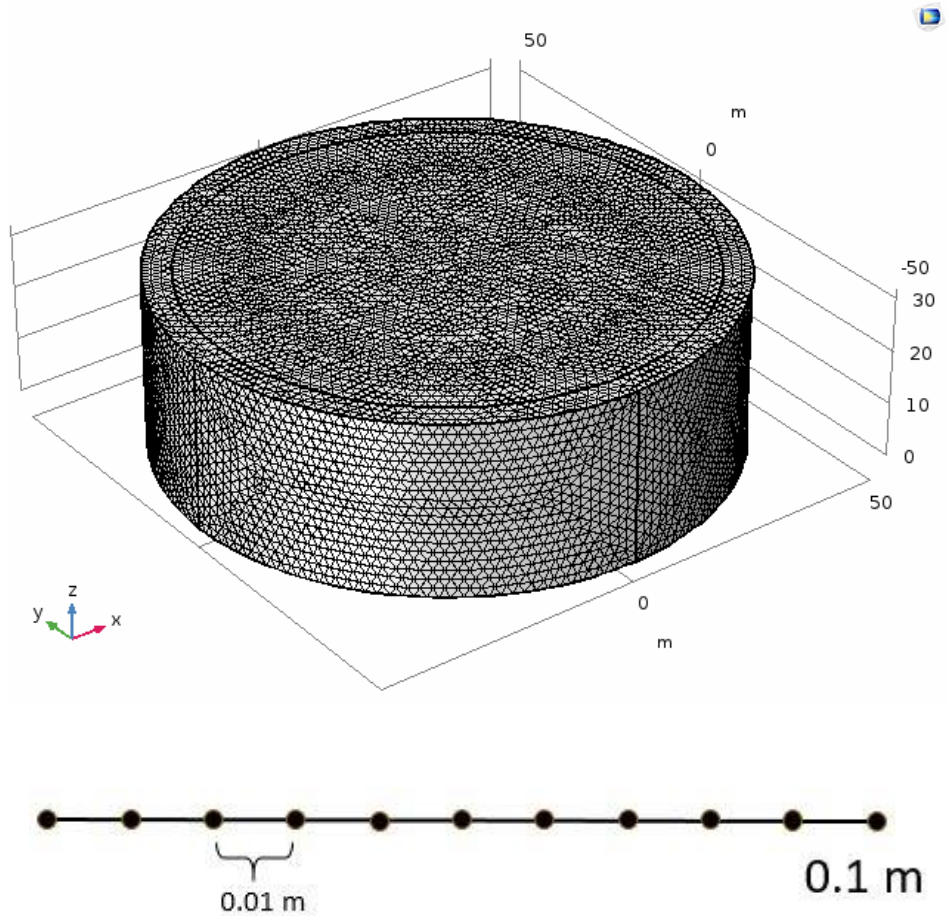
Το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Mesh) εξυπηρετεί δύο σκοπούς. Αρχικά υποδιαιρεί τη γεωμετρία CAD σε μικρότερα τεμάχια ή στοιχεία, στα οποία είναι δυνατόν να εισάγουμε ένα σύνολο εξισώσεων που περιγράφουν τη συνολική λύση του προβλήματος. Και δεύτερον το πλέγμα που χρησιμοποιείται αντιπροσωπεύει το πεδίο λύσης του φυσικού φαινομένου που επιλύεται.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το πρόγραμμα μοντελοποιεί το φαινόμενο της διάβρωσης μιας κατασκευής με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με συστατικά στοιχεία τα οποία συνδέονται με έναν πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Τα τεχνητά αυτά στοιχεία (ή πεπερασμένα στοιχεία) είναι συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά και οι κόμβοι συνήθως βρίσκονται στα άκρα και στα μέσα των ευθύγραμμων τμημάτων τους. Όσο πιο μικρά είναι αυτά τα στοιχεία, τόσο περισσότερους κόμβους έχουμε και τόσο πιο ακριβής είναι η επίλυση.

Στην συγκεκριμένη επίλυση θα χρησιμοποιηθεί Extra Fine Mesh, δηλαδή επιπλέον εκλεπτυσμένο πλέγμα. Πλέγματα υψηλότερης τάξης είναι επίσης διαθέσιμα, αλλά το συγκεκριμένο πλέγμα αντιπροσωπεύει έναν καλό συμβιβασμό μεταξύ της ακρίβειας και των υπολογιστικών απαιτήσεων για τη δεδομένη γεωμετρία. Το Comsol Multiphysics 5.3 αναπτύσσει ένα πλέγμα από τριγωνικά στοιχεία τα οποία είναι μικρότερα σε μέγεθος στη διεπιφάνεια του ηλεκτρολύτη με την μεταλλική κατασκευή και τις ανόδους και πιο μεγάλα μακριά από αυτήν. Αυτό επιτυγχάνεται με τον μηχανισμό που έχει το ίδιο το πρόγραμμα να προσαρμόζει το πλέγμα στην φυσική του συστήματος. Στην εικόνα 5.8 φαίνεται η διακριτοποίηση του πλέγματος στον όγκο του ηλεκτρολύτη. Ο χρήστης επιλέγει το μέγεθος των στοιχείων, όσο πιο εκλεπτυσμένο είναι το πλέγμα τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια έχει η επίλυση, αλλά και τόσο μεγαλύτερη είναι η απαίτηση σε υπολογιστική ισχύ. Τα χαρακτηριστικά του πλέγματος εμφανίζονται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά Extremely Fine Πλέγματος

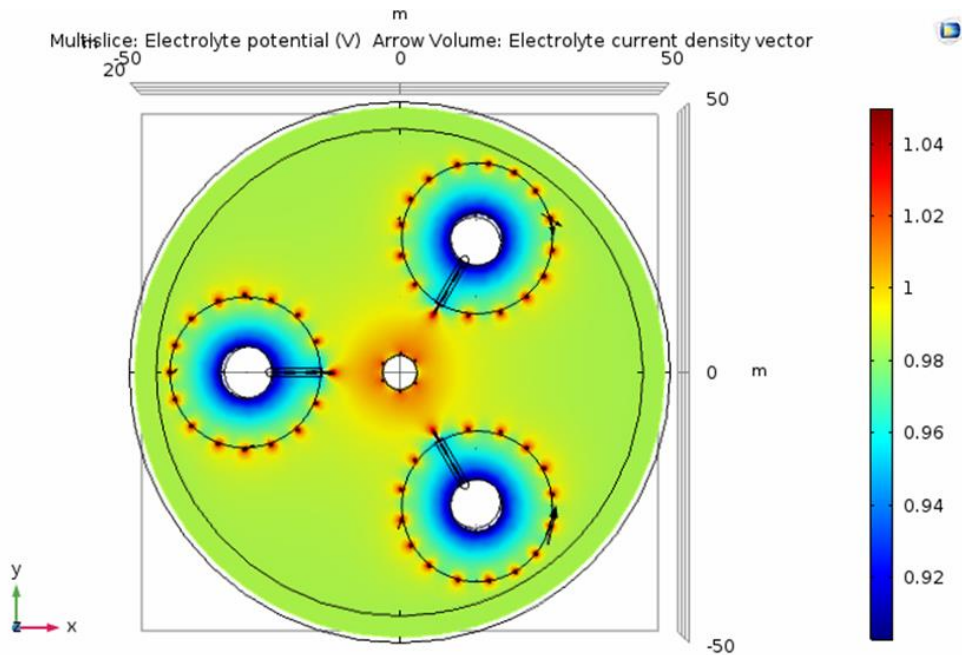
Ελάχιστο Μέγεθος Στοιχείου	0.02 m
Μέγιστο Μέγεθος Στοιχείου	2 m
Συντελεστής Καμπυλότητας	0.2
Αριθμός Στοιχειών	2792739



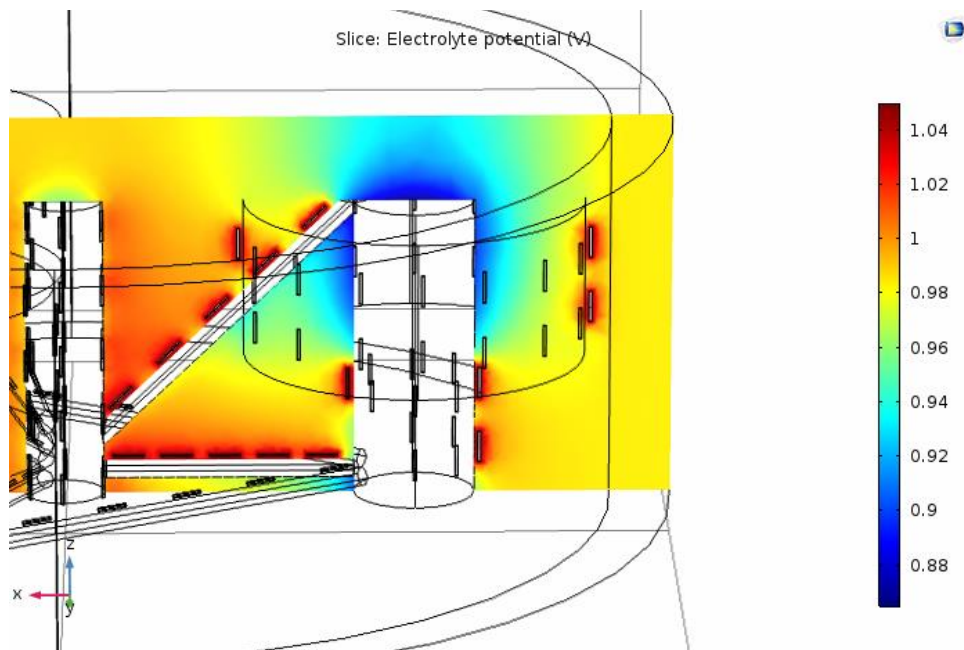
Εικόνα 5.8: Απεικόνιση Πλέγματος στον όγκο ελέγχου του φαινομένου της διάβρωσης και λεπτομέρεια του αριθμού των κόμβων που υπάρχουν πάνω στην διεπιφάνεια ηλεκτρολύτη - ηλεκτροδίων

5.8 Εκτέλεση Προγράμματος και Εμφάνιση Αποτελεσμάτων

Με βάση τα παραπάνω, πραγματοποιήθηκε εκτέλεση του προγράμματος και έγινε η παραγωγή των παρακάτω διαγραμμάτων 5.9 και 5.10. Τα διαγράμματα αυτά αναφέρονται στην κατανομή του δυναμικού, στην επιφάνεια των θυσιαζόμενων ανόδων και της υπό προστασία κατασκευής όσο και στη χωρική κατανομή του στο θαλασσινό νερό (ηλεκτρολύτης).



Εικόνα 5.9: Κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στην τομή του επιπέδου xy



Εικόνα 5.10: Κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στην τομή του επιπέδου xz

Όπως φαίνεται από τις εικόνες 5.9 και 5.10 το δυναμικό του θαλασσινού νερού εμφανίζει κοντά στις θυσιαζόμενες ανόδους τις υψηλότερες τιμές του, προσεγγίζοντας την τιμή $-E_{eq,Al}$ των ανόδων. Στην περιοχή του ανωστικού κυλίνδρου που δεν έχουν τοποθετηθεί άνοδοι το δυναμικό λαμβάνει τιμές μεταξύ 0.87 - 0.94 Volt.

Για τον υπολογισμό του δυναμικού του χάλυβα θα πρέπει να εισαχθεί στη μελέτη το ηλεκτρόδιο αναφοράς. Έτσι συσχετίζεται το δυναμικό του ηλεκτρολύτη (θαλασσινό νερό) Φ_1 , με το δυναμικό του ηλεκτροδίου (χάλυβας), θεωρώντας ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς τοποθετημένο στον ηλεκτρολύτη σε πολύ κοντινή απόσταση από την επιφάνεια της μεταλλικής κατασκευής. Τότε το ηλεκτρικό δυναμικό του ηλεκτροδίου αναφοράς Φ_{ref} θα είναι ίσο με :

$$\Phi_{s,ref} = E_{eq,ref} + \Phi_1 \quad (5.12)$$

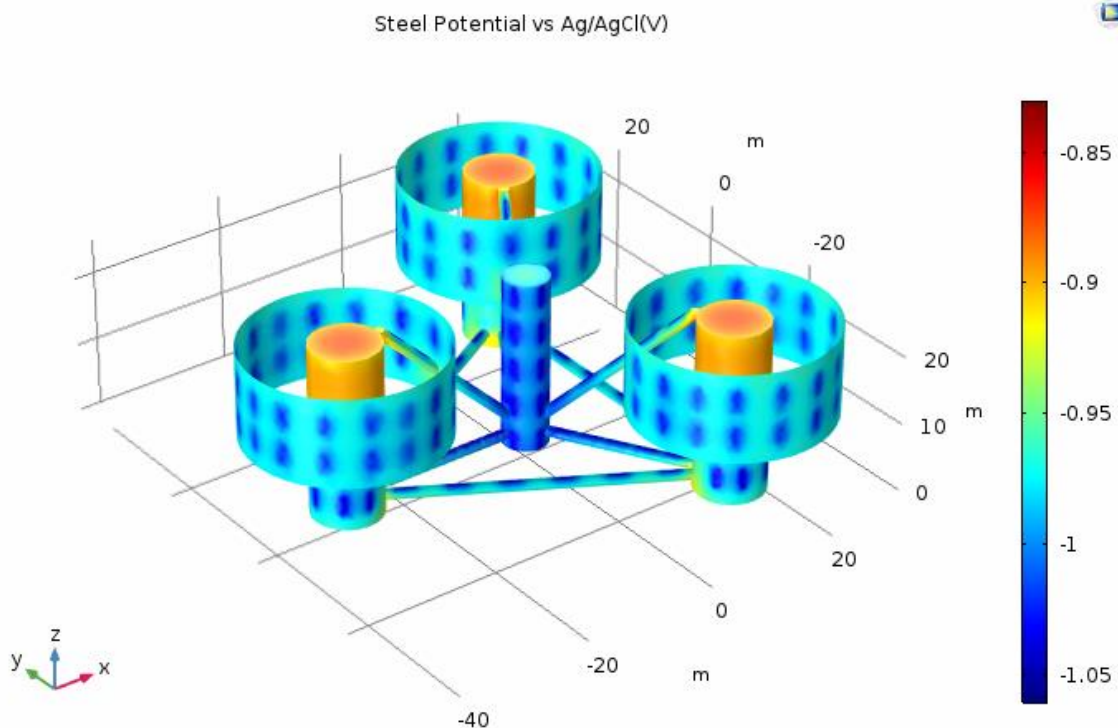
Το δυναμικό στην επιφάνεια του χάλυβα θεωρείται σταθερό λόγω της υψηλής αγωγιμότητας του μετάλλου. Συνεπώς το δυναμικό του χάλυβα συναρτηθεί του ηλεκτροδίου αναφοράς γίνεται ίσο με :

$$E_{steel\ vs\ ref} = \Phi_{s,steel} - \Phi_{s,ref} = \Phi_{s,steel} - E_{eq,ref} - \Phi_1 \quad (5.13)$$

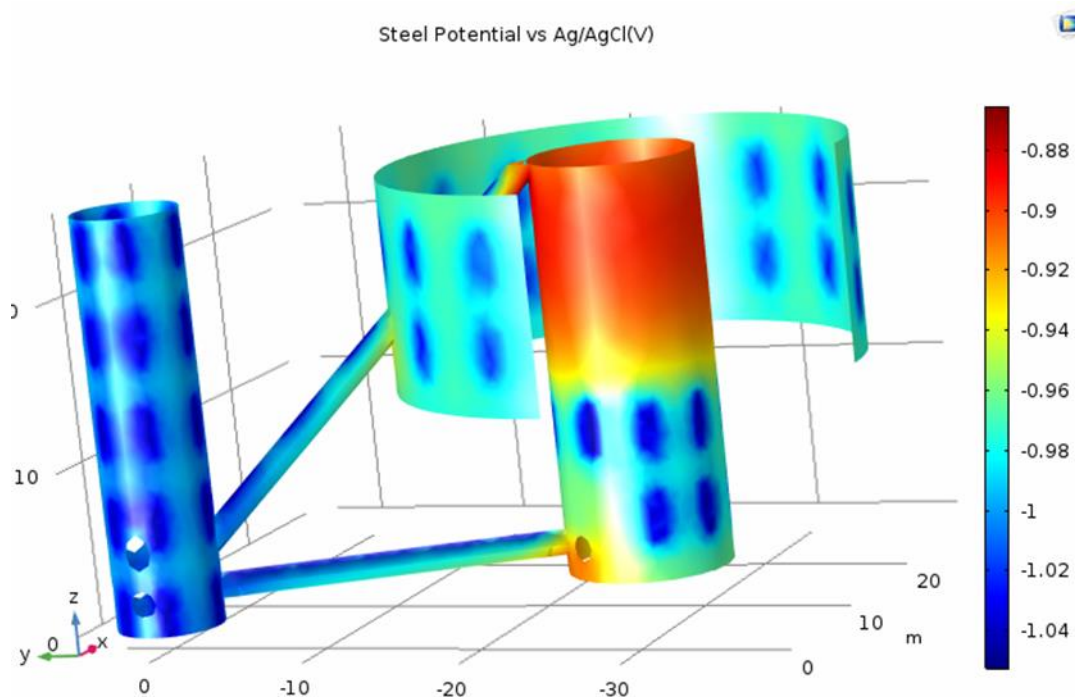
Δηλαδή:

$$E_{steel\ vs\ Ag/AgCl} = -\Phi_1 \quad (5.14)$$

Στη συγκεκριμένη μελέτη ως ηλεκτρόδιο αναφοράς (Ref) θεωρείται ηλεκτρόδιο Ag/AgCl.



Εικόνα 5.11: Κατανομή δυναμικού πάνω στην μεταλλική κατασκευή της πλατφόρμας



Εικόνα 5.12: Κατανομή δυναμικού πάνω σε λεπτομέρεια της μεταλλικής κατασκευής της πλατφόρμας

Η κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια της μεταλλικής κατασκευής όπως φαίνεται στις εικόνες 5.11 & 5.12 λαμβάνει αρνητικότερες τιμές στις περιοχές που έχουν τοποθετηθεί άνοδοι και θετικότερες στα σημεία μακριά από αυτές. Όπως φαίνεται και στη χρωματική στήλη του διαγράμματος, όσο οι αποχρώσεις κινούνται στο φάσμα του κυανού τόσο χαμηλότερες είναι οι τιμές του δυναμικού και το αντίθετο όσο οι αποχρώσεις κινούνται στο φάσμα του ερυθρού. Έτσι, όσο οι αποχρώσεις αγγίζουν το φάσμα του κυανού η μεταλλική κατασκευή είναι περισσότερο καθοδικά προστατευμένη, σε αντίθεση με τις περιοχές που είναι στο φάσμα του ερυθρού και είναι πιο επιρρεπείς στην διάβρωση. Η επιφάνεια του ανωστικού κυλίνδρου σε ύψος 12 μέτρων καθώς και τα σημεία των μπρακέτων που ενώνουν το πυλώνα στήριξης της ανεμογεννήτριας με τον ανωστικό κύλινδρο εμφανίζουν τις θετικότερες τιμές. Όμως ακόμα και σε αυτές τις περιοχές η τιμή του δυναμικού δεν ξεπερνάει την τιμή υποπροστασίας του χάλυβα των -0.8 Volt.

Μέρος 6^ο : Προσομοίωση Δυναμικού Φαινομένου Καθοδικής Προστασίας (23)

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε μελέτη της καθοδικής προστασίας της κατασκευής μόνο για την χρονική στιγμή της εγκατάστασης των θυσιαζόμενων ανόδων και λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα ωμικά φαινόμενα. Στην συνέχεια θα γίνει προσπάθεια προσδιορισμού της μεταβολής του δυναμικού στην κατασκευή λαμβάνοντας υπόψη και την μεταβολή δυναμικού λόγω της πόλωσης ενεργοποίησης για ολόκληρη τη διάρκεια της ζωής της.

6.1 Διαδικασία Προσομοίωσης

Για την μοντελοποίηση του δυναμικού φαινομένου καθοδικής προστασίας με την εφαρμογή θυσιαζόμενων ανόδων της υπεράκτιας πλωτής κατασκευής πολλαπλών χρήσεων ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

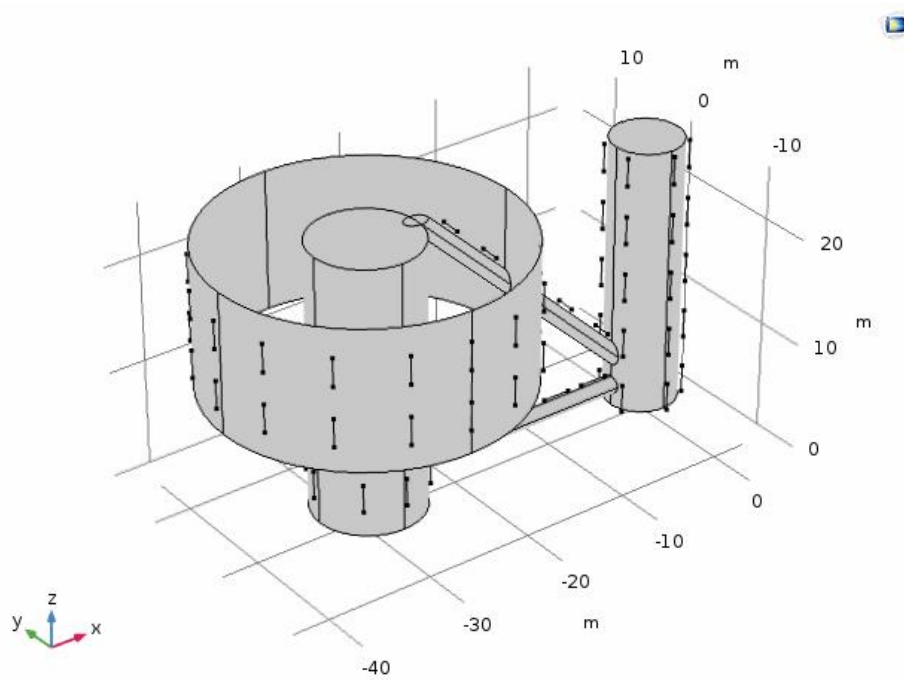
Λαμβάνοντας υπόψη την συμμετρία της τριγωνικής πλατφόρμας έγινε απλοποίηση της γεωμετρίας της κατασκευής

- i. Ορισμός της φυσικής του συστήματος και των ποσοτικών φυσικών χαρακτηριστικών των υλικών των ανόδων και της μεταλλικής κατασκευής.
- ii. Δημιουργία πλέγματος (Mesh) για την διεξαγωγή των υπολογισμών μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements Method).
- iii. Ορισμός τρόπου επίλυσης του προβλήματος.
- iv. Εκτέλεση του προγράμματος και υπολογισμός της διαφοράς δυναμικού και της πυκνότητας ρεύματος στην κατασκευή και στις ανόδους.
- v. Δημιουργία επιθυμητών διαγραμμάτων

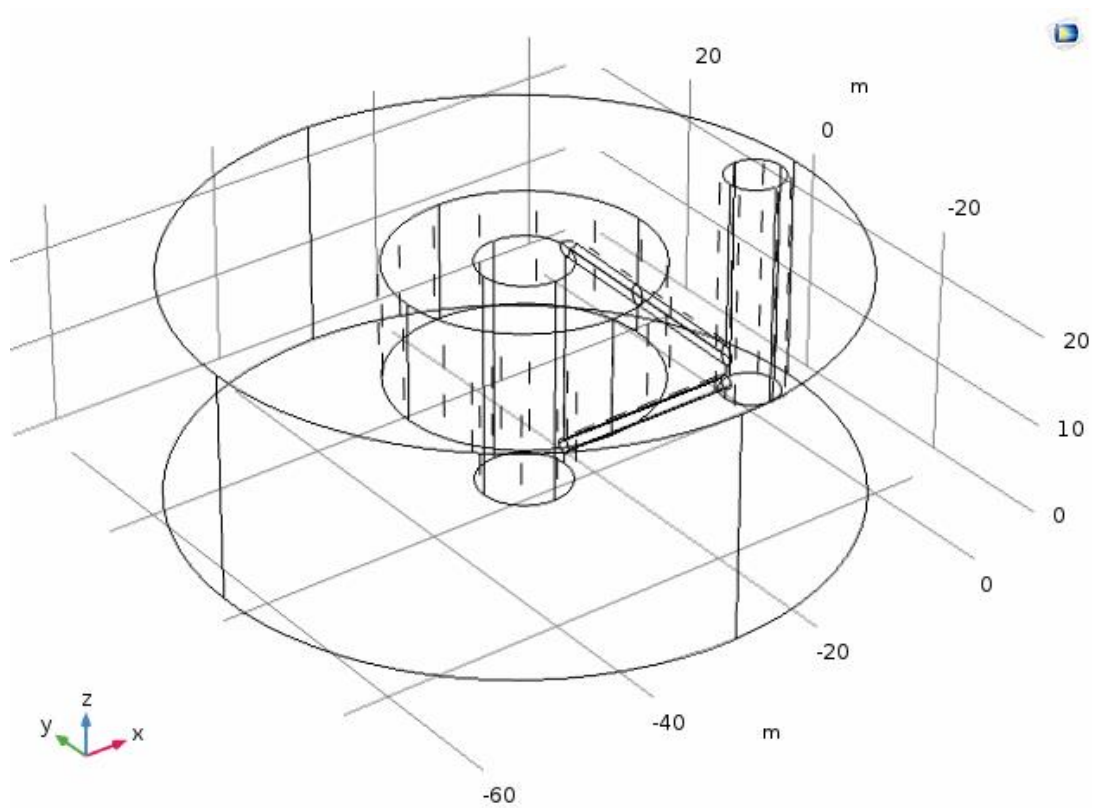
6.2 Γεωμετρία Κατασκευής (OWC)

Λόγω της υψηλής απαίτησης σε υπολογιστική ισχύ που έχει η μελέτη ενός χρονικά μεταβαλλόμενου φαινομένου χρειάστηκε η απλοποίηση της εισαγόμενης γεωμετρίας στο πρόγραμμα. Συνεπώς για την προσομοίωση έγινε χρήση της γεωμετρίας του ενός μόνο από τους τρεις ανωστικούς κυλίνδρους (OWC) της κατασκευής, καθώς και του κεντρικού πυλώνα στήριξης της ανεμογεννήτριας, μαζί με τον αριθμό των θυσιαζόμενων ανόδων που απαιτούνται (Εικ.6.1).

Οι θυσιαζόμενες άνοδοι με το πέρας του χρόνου διαλύονται συναρτήσει της ηλεκτροχημικής τους χωρητικότητας και εξαιτίας της απαίτησης σε ρεύμα. Ως εκ τούτου, η επιφάνεια της διατομής των ανόδων είναι μεταβλητή και για αυτόν τον λόγο οι άνοδοι τοποθετούνται στην γεωμετρία της κατασκευής ως ευθύγραμμα τμήματα μήκους $L=2.57\text{m}$ με μεταβλητό πάχος σε αντίθεση με την προηγούμενη μελέτη όπου τοποθετήθηκαν ως τρισδιάστατοι κύλινδροι (Εικόνα 6.1).



Εικόνα 6.1: Απλοποιημένη γεωμετρία υπεράκτιας ανεμογεννήτριας πολλαπλών χρήσεων



Εικόνα 6.2: Δημιουργία του κυλίνδρου του ηλεκτρολύτη που περιβάλλει την κατασκευή

6.3 Φυσική του Συστήματος (21) (24) (23) (20)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί (παρ. 6.1) στην παρούσα μελέτη θα ληφθούν υπόψη όχι μόνο τα ωμικά, αλλά και η μεταβολή του δυναμικού της κατασκευής εξαιτίας του φαινομένου της πόλωσης ενεργοποίησης συναρτήσει του χρόνου. Για την επίλυση του χρονικού προβλήματος έγινε χρήση της θεωρίας της Δευτερογενούς Κατανομής Ρεύματος (Secondary Current Distribution physics) που περιέχει το Corrosion Module του προγράμματος.

Η θεωρία της δευτερογενούς κατανομής ρεύματος (Secondary Current Distribution physics) διαφέρει με τη θεωρία πρωτογενούς κατανομής ρεύματος (Primary Current Distribution), ως προς το ότι λαμβάνει υπόψη και την πόλωση ενεργοποίησης (υπέρταση). Η σχέση μεταξύ της μεταφοράς του ηλεκτρικού φορτίου (πυκνότητα ρεύματος, i) και της υπέρτασης (η) μπορεί να περιγράψει χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις Butler-Volmer και Tafel.

Εξίσωση Butler-Volmer:

$$i = i_0 \cdot \left(e^{\left\{ \frac{\alpha_a z F}{RT} \eta \right\}} - e^{\left\{ \frac{\alpha_c z F}{RT} \eta \right\}} \right) \quad (6.1)$$

Όπου:

i : πυκνότητα ρεύματος του ηλεκτρολύτη (A/m^2)

i_0 = πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής (A/m^2)

α_a, α_c : σταθερά μεταφοράς φορτίου ανόδου και καθόδου

z, T, R, F : Αριθμός ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στην αντίδραση, θερμοκρασία, παγκόσμια σταθερά αερίων, σταθερά του Faraday αντίστοιχα.

Τα φαινόμενα μεταφοράς των ιόντων στο θαλασσινό νερό μπορούν να εκφραστούν με την βοήθεια της εξίσωσης Nernst-Planck που παρουσιάζεται παρακάτω (6.2). Τα φαινόμενα αυτά αποτελούν αποτέλεσμα των φαινομένων της διάχυσης (diffusion), της μεταφοράς φορτίου (migration) στο ηλεκτρικό πεδίο του ηλεκτρολύτη και της συναγωγής (convection) αντίστοιχα :

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -D \nabla^2 C_i - z_i F u_i \nabla (C_i \nabla \phi) + \nabla (C_i V) \quad (6.2)$$

Όπου F = Σταθερά του Faraday, ϕ =ηλεκτρικό δυναμικό, V =ταχύτητα της ροής του θαλασσινού νερού, C_i = Συγκέντρωση, z =αριθμός των ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στην αντίδραση, D = ο συντελεστής διάχυσης .

Η εξίσωση Nernst-Planck μπορεί να απλοποιηθεί για μία σταθερή κατάσταση όπου $\frac{\partial C_i}{\partial t} = 0$ κάνοντας τις εξής υποθέσεις:

- Η συγκέντρωση των ιόντων είναι ίδια σε όλο τον όγκο του ηλεκτρολύτη.
- Ο ηλεκτρολύτης θεωρείται ασυμπίεστο ρευστό.

- c) Ισχύει η αρχή ηλεκτροουδετερότητας $\sum_i z_i C_i = 0$, δηλαδή η κίνηση του ηλεκτρολύτη δεν συνεισφέρει στην μεταβολή της συνολικής πυκνότητας ρεύματος.

Συνεπώς ισχύει η εξίσωση Laplace για την εύρεση του ηλεκτρικού δυναμικού στον χώρο μελέτης, δηλαδή στον όγκο του ηλεκτρολύτη (Εικ.6.3):

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (6.3)$$

Η λύση της εξίσωσης μπορεί να υπολογιστεί με τον ορισμό κατάλληλων συνοριακών συνθηκών. Έτσι για τη διεπιφάνεια ηλεκτρολύτη και μεταλλικής κατασκευής και ηλεκτρολύτη και ανόδων (Εικ. 6.3) ισχύει ότι η πυκνότητα ρεύματος υπακούει στον Νόμο του Ohm δηλαδή :

$$i = -\sigma \nabla \phi \quad (6.4)$$

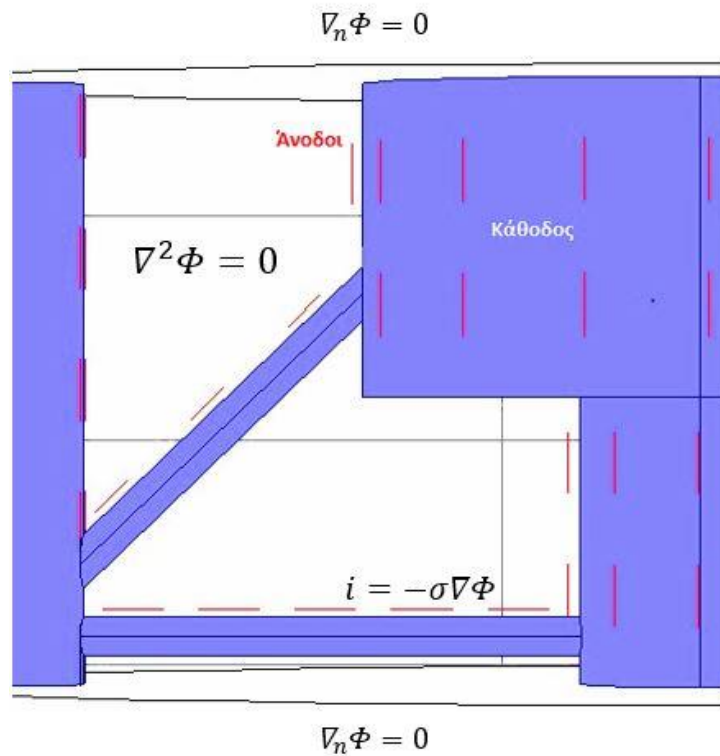
Όπου :

i = Διάνυσμα της πυκνότητας ρεύματος του ηλεκτρολύτη (electrolyte current density vector) σε A/m².

σ = Ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη , στην περίπτωση αυτή η ηλ. Αγωγιμότητα του θαλ. νερού είναι ίση με **5 S/m**.

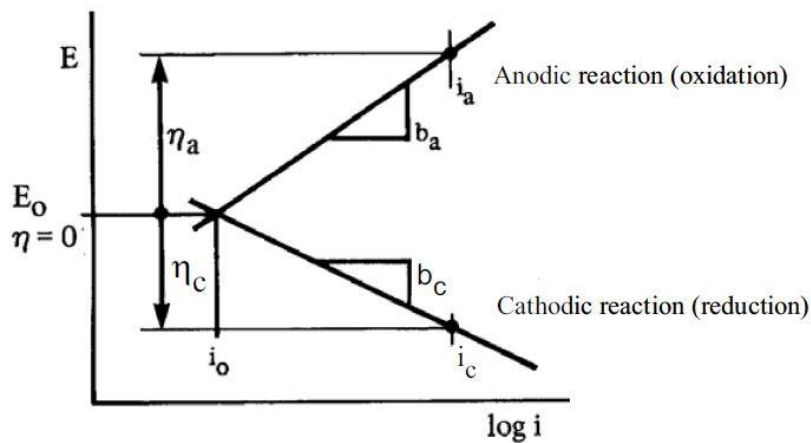
∇ = Διαφορικός τελεστής των μερικών παραγώγων μιας συνάρτησης ως προς τις τρεις διαστάσεις του χώρου.

Στην εικόνα 6.3 παρουσιάζεται σχηματικά οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος.



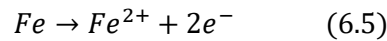
Εικόνα 6.3: Σχηματική απεικόνιση συνοριακών συνθηκών Προβλήματος

Στην επιφάνεια της υπό προστασία κατασκευής λαμβάνουν χώρα δυο χημικές διεργασίες. Η πρώτη είναι η οξείδωση του σιδήρου η οποία περιγράφεται από την ανοδική εξίσωση Tafel και η δεύτερη είναι η αναγωγή οξυγόνου που περιγράφεται από την καθοδική εξίσωση Tafel.



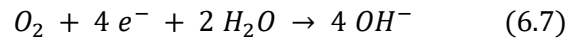
Εικόνα 6.4: Διάγραμμα Δυναμικού - Δεκαδικού λογάριθμου πυκνότητας ρεύματος[3]

Για την ανοδική αντίδραση (Anodic Reaction):



$$\eta_a = b_a \cdot \log \frac{i_a}{i_o} \quad \text{Εξίσωση Tafel (6.6)}$$

Για την Καθοδική αντίδραση (Cathodic Reaction):



$$\eta_c = -b_c \cdot \log \frac{i_c}{i_o} \quad \text{Εξίσωση Tafel (6.8)}$$

Όπου:

η_a, η_c = Υπέρταση ανόδου και καθόδου σε Volt

i_a, i_c = Οι ζητούμενες πυκνότητες ρεύματος σε άνοδο και κάθοδο σε A/m²

i_o = Πυκνότητα ρεύματος ισορροπίας ίση με 0.001 A/m²

b_a, b_c = Σταθερές του Tafel όπου είναι ίσες με $b_a = -b_c = 0.1$ Volt

Για τις θυσιαζόμενες ανόδους το βασικό στοιχείο είναι ο ρυθμός με τον οποίο γίνεται η διάλυσή τους. Η διάλυση των ανόδων είναι άμεσα εξαρτώμενη από την ηλεκτροχημική χωρητικότητα της ανόδου Q_0 . Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, για λόγους ευκολίας οι θυσιαζόμενες άνοδοι θεωρούνται κύλινδροι με κυκλική διατομή και όχι με διατομή τραπεζίου, όπως είναι στην πραγματικότητα. Για τη μεταβολή της ακτίνας της κυκλικής διατομής των ανόδων ισχύουν τα παρακάτω :

$$\frac{dQ}{dt} = \nabla_t(-D\nabla_t Q) - i_{tot,edge} \quad (6.9)$$

$$r = \sqrt{\frac{Q}{Q_0}(r_0^2 - r_{final}^2) + r_{final}^2} \quad (6.10)$$

Μετά από υπολογισμούς βάσει των χημικών ιδιοτήτων και γεωμετρικών στοιχείων των ανόδων που θα χρησιμοποιηθούν προκύπτει ότι :

$$R_0 = 0.168 \text{ m}$$

$$R_{final} = 0.09 \text{ m}$$

$$Q_0 = 2420 \text{ Ah/Kg}$$

Για το ρεύμα που παράγεται από τις θυσιαζόμενες ανόδους έγινε χρήση της γραμμικής εξίσωσης Butler-Volmer :

$$i_{oc} = i_0 \left(\frac{a_a + a_c}{RT} \right) \eta \quad (6.11)$$

Όπου :

i_0 = πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής ίσο με 0.001 A/m²

α_a, α_c = σταθερές μεταφοράς που είναι ίσες με 0.5

η = υπέρταση σε Volt

Θεωρούμε δυναμικό ανόδων ισορροπίας ίσο με $E_{eq_Al} = -1.05$ Volt

Προκειμένου να εκτιμηθεί ο ρυθμός διάβρωσης της ίδιας της χαλύβδινης κατασκευής, έγινε μελέτη υπολογισμού της απώλειας μάζας. Η μελέτη έγινε με χρήση του νόμου Faraday (Εξ. 6.12). Ο Νόμος Faraday ορίζει ότι η μάζα ενός στοιχείου (στην περίπτωση μας του χάλυβα) που απομονώνεται κατά την ηλεκτρόλυση είναι ανάλογη του διερχόμενου ηλεκτρικού φορτίου και του ατομικού βάρους του στοιχείου.

$$m = \frac{SMI_{oc}}{zF} \quad (6.12)$$

$M = 0.055$ kg/mol, μοριακή μάζα σιδήρου

$F = 96485.33$ C mol⁻¹, σταθερά του Faraday

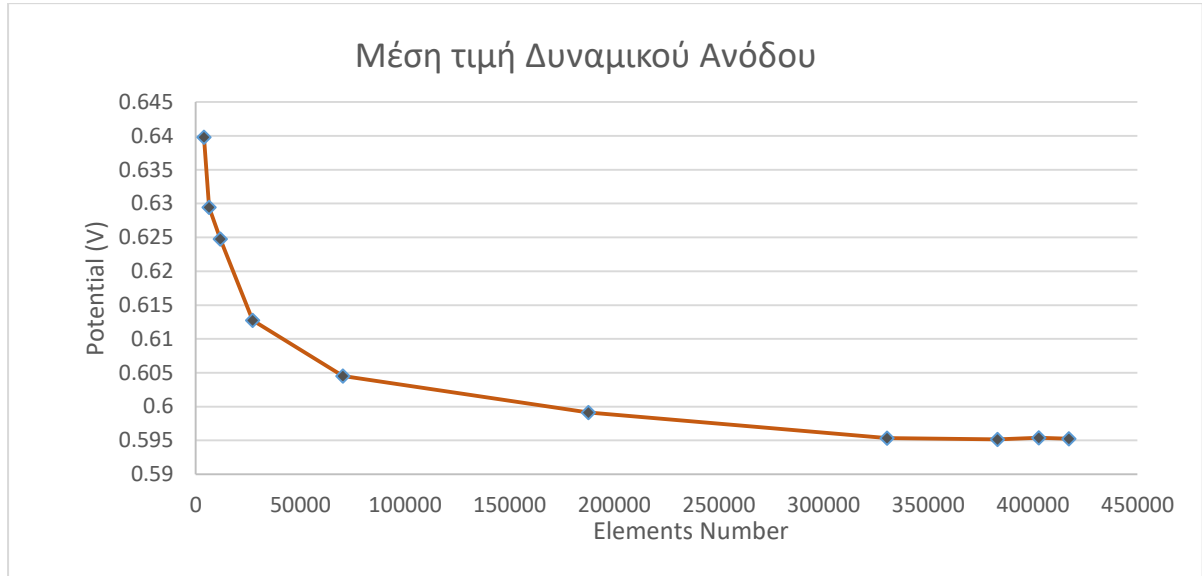
$Z = 2$, αριθμός ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στην αντίδραση (6.5)

$S = 1$, στοιχειομετρικός συντελεστής

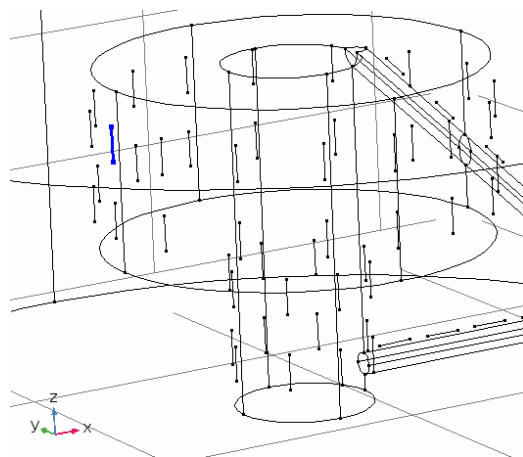
I_{oc} = η τιμή του ρεύματος στην επιφάνεια της μεταλλικής κατασκευής

6.4 Διακριτοποίηση Προβλήματος (Meshing)

Στη συγκεκριμένη μελέτη θα γίνει διακριτοποίηση του προβλήματος με την χρήση επιπλέον εκλεπτυσμένου πλέγματος (extra fine mesh). Η επιλογή του πλέγματος έγινε με βάση τα κριτήρια που αναφέρονται στην παράγραφο 5.6. Σε αντίθεση με την μελέτη στην παράγραφο 5 που επιλέχθηκε ένα πλέγμα με πολύ μεγάλο αριθμό στοιχείων, στην συγκεκριμένη μελέτη λόγω της υψηλής απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύς πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ανάμεσα σε πλέγματα διαφορετικού μεγέθους έτσι ώστε να επιτευχθεί ο βέλτιστος συνδυασμός ακρίβειας και υπολογιστικής ισχύος. Στο διάγραμμα της εικόνας 6.5 φαίνεται ο υπολογισμός του ηλεκτρικού δυναμικού του ηλεκτρολύτη στην περιοχή της ανόδου (Εικόνα 6.6). Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα όσο μεγαλώνει ο αριθμός των στοιχείων του πλέγματος, το ηλεκτρικό δυναμικό προσεγγίζει μία συγκεκριμένη τιμή. Το ίδιο παρατηρείται και για τις υπόλοιπες ποσότητες που υπολογίζει το πρόγραμμα.



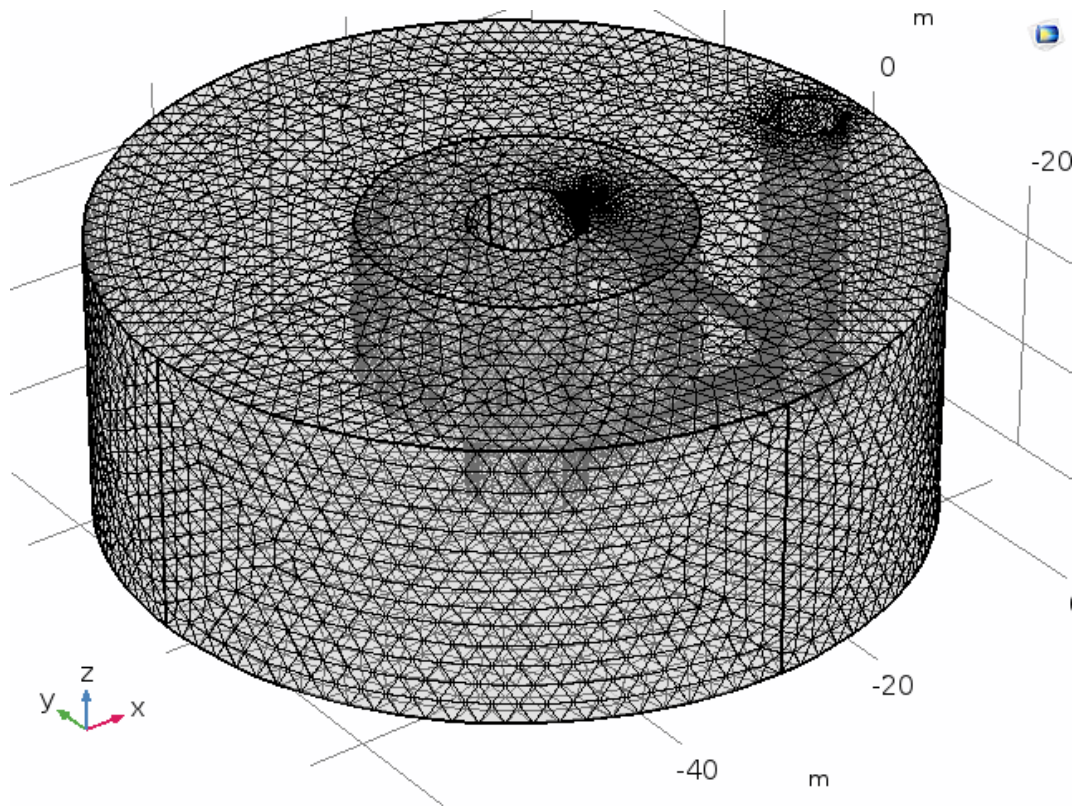
Εικόνα 6.5: Μέση τιμή του δυναμικού του ηλεκτρολύτη στην περιοχή της ανόδου συναρτήσει του πλέγματος



Εικόνα 6.6: Γραφική αναπαράσταση στο περιβάλλον του Comsol της ανόδου στην οποία αναφέρεται το διάγραμμα της εικόνας 6.5

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά Πλέγματος

Ελάχιστο Μέγεθος Στοιχείου	0.006 m
Μέγιστο Μέγεθος Στοιχείου	2.1 m
Συντελεστής Καμπυλότητας	0.3
Αριθμός Στοιχειών	417214

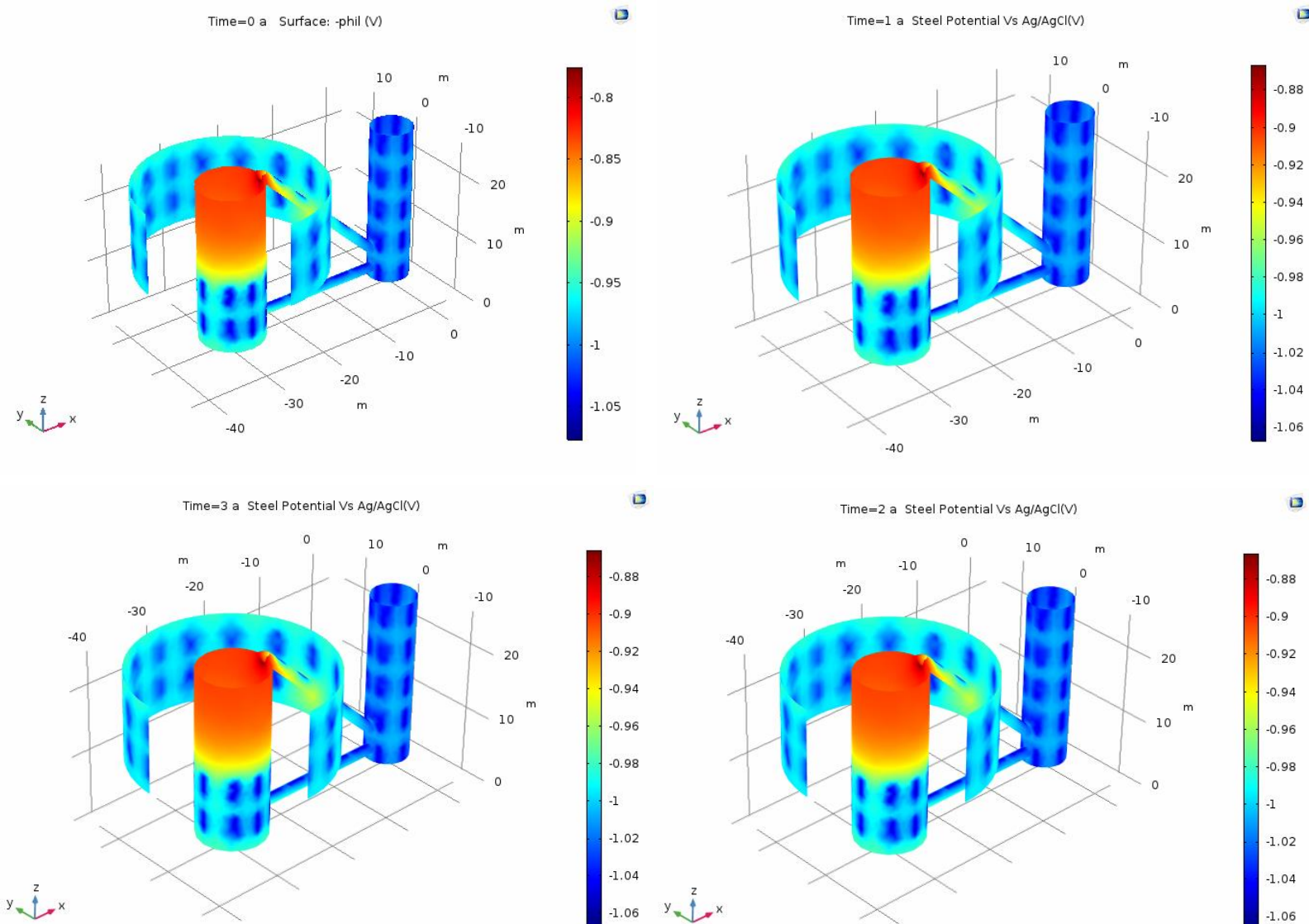


Εικόνα 6.7: Επιπλέον Εκλεπτυσμένο Πλέγμα (Extra Fine Mesh)

6.5 Επίλυση του προβλήματος

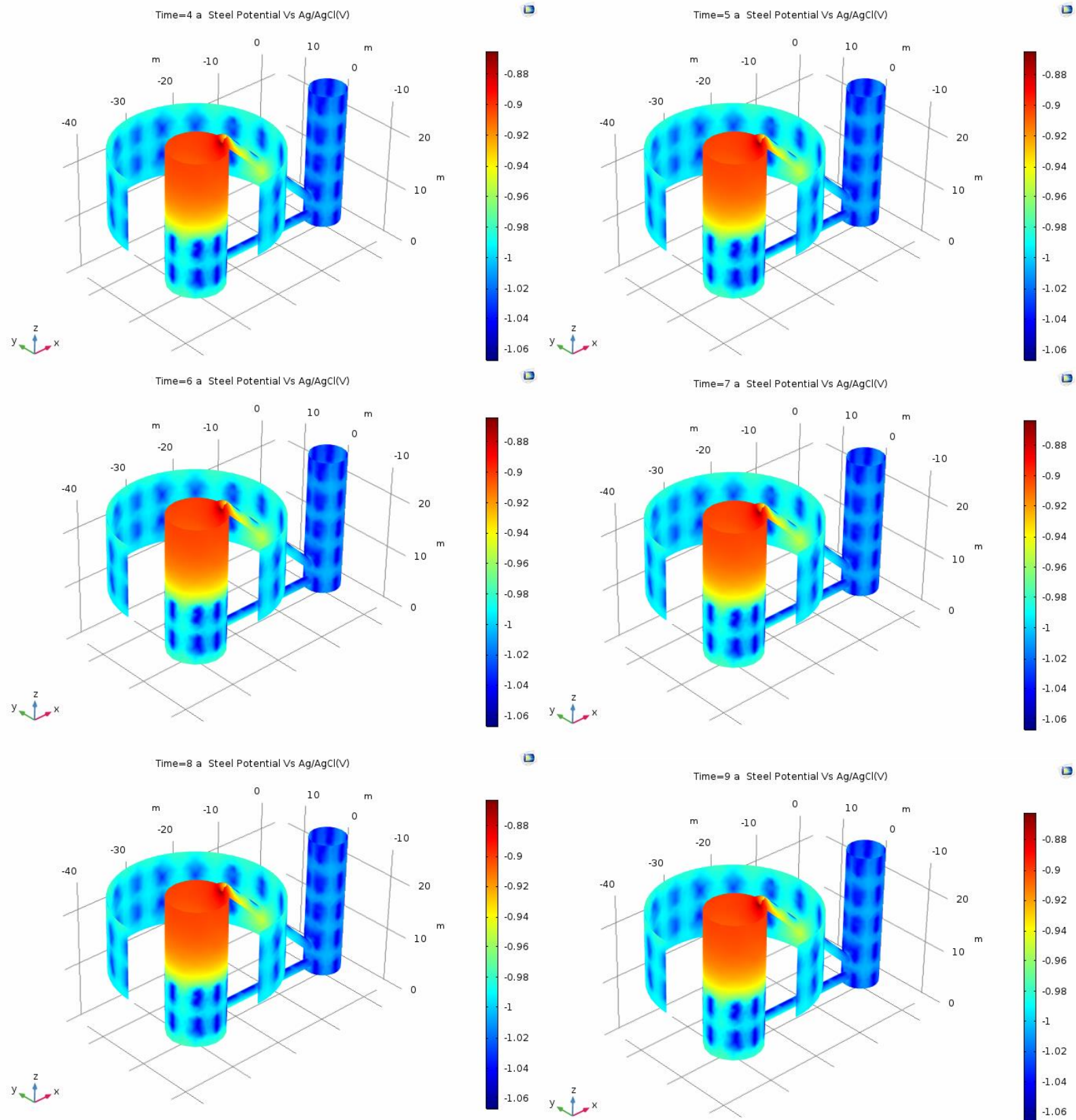
Το πρόβλημα ορίζεται ως χρονικά μεταβαλλόμενο και απαιτεί την επίλυση των διαφόρων αλληλεξαρτώμενων εξισώσεων με την χρήση αριθμητικής μεθόδου. Για την επίλυση χρησιμοποιείται η μέθοδος Newton-Raphson. Έτσι υπολογίστηκε η κατανομή του δυναμικού στον ηλεκτρολύτη από την τοποθέτηση της κατασκευής, με τις θυσιαζόμενες ανόδους στη θάλασσα μέχρι τον 20^ο χρόνο λειτουργίας, δηλαδή για όλη την διάρκεια της ζωής της κατασκευής.

Για τους υπολογισμούς απαιτήθηκε χρόνος μίας ώρα χρησιμοποιώντας έναν προσωπικό υπολογιστή με RAM 6GB. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών:



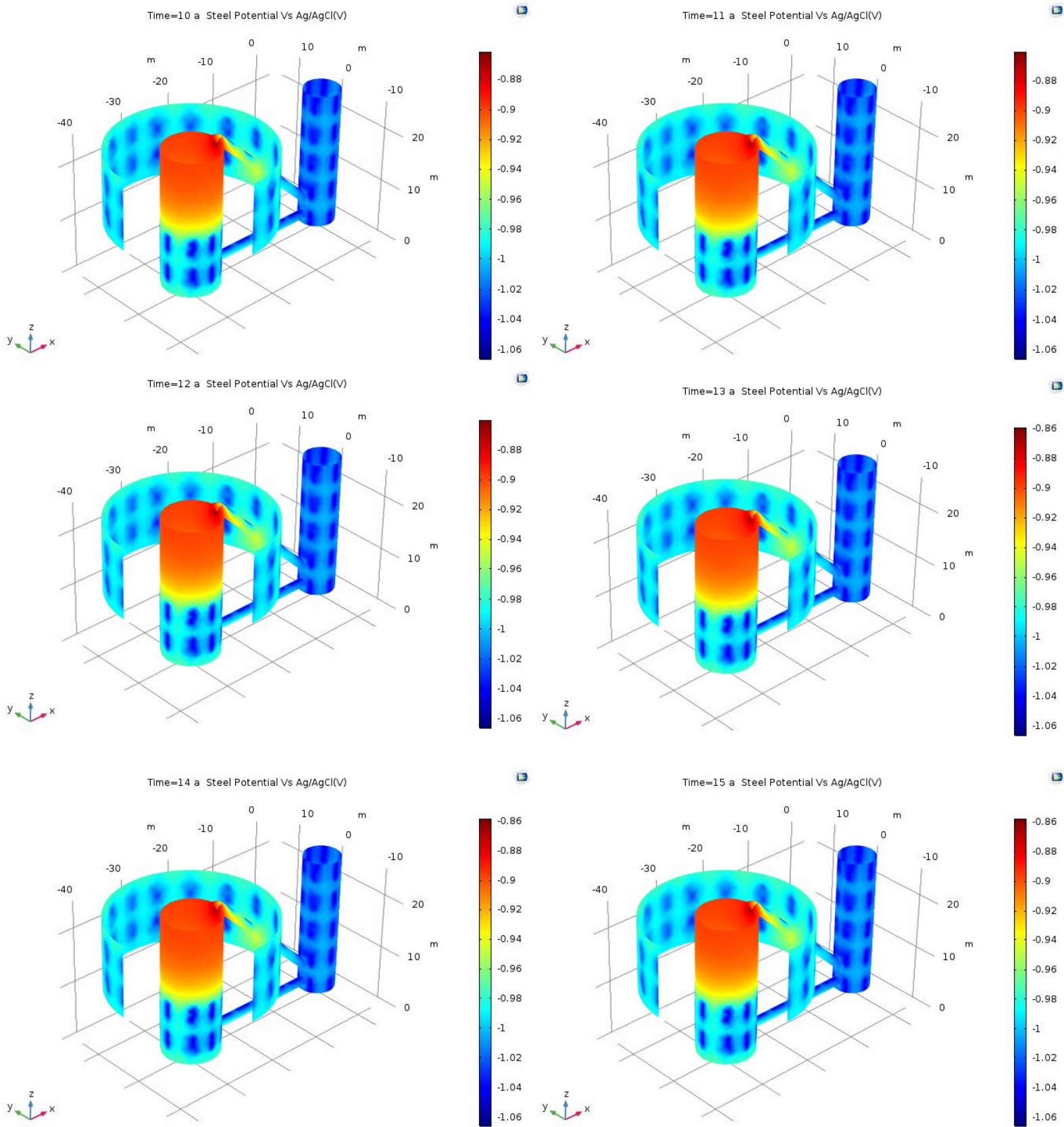
Εικόνα 6.8: Ετήσια μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού της μεταλλικής κατασκευής (Μέρος 1^ο)

Προσομοίωση Καθοδικής Προστασίας Πλωτής Υπεράκτιας Κατασκευής Πολλαπλών Χρήσεων
Μέρος 6°: Προσομοίωση Δυναμικού Φαινομένου Καθοδικής Προστασίας



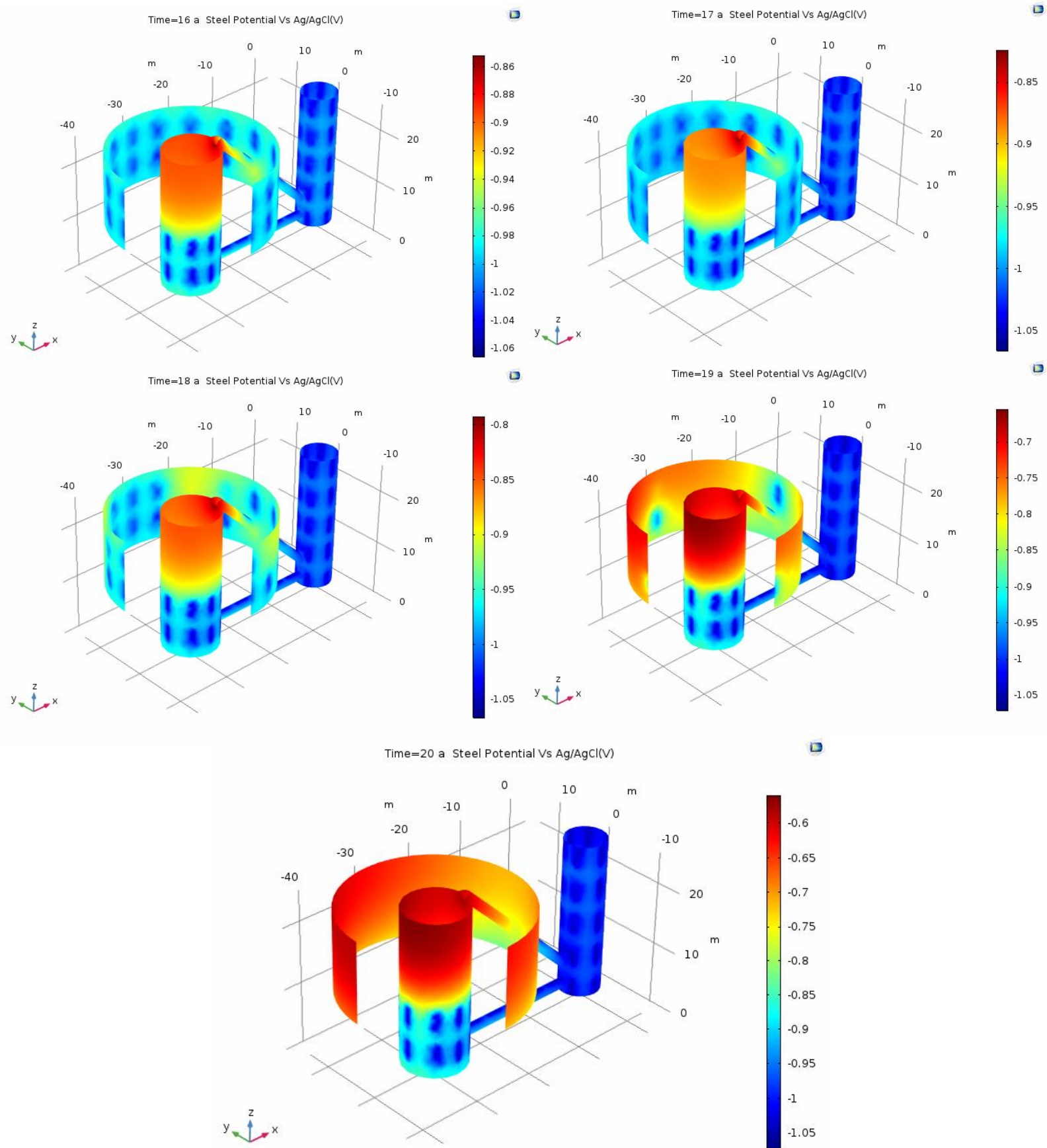
Εικόνα 6.9: Ετήσια μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού της μεταλλικής κατασκευής (Μέρος 2ο)

Προσομοίωση Καθοδικής Προστασίας Πλωτής Υπεράκτιας Κατασκευής Πολλαπλών Χρήσεων
Μέρος 6°: Προσομοίωση Δυναμικού Φαινομένου Καθοδικής Προστασίας



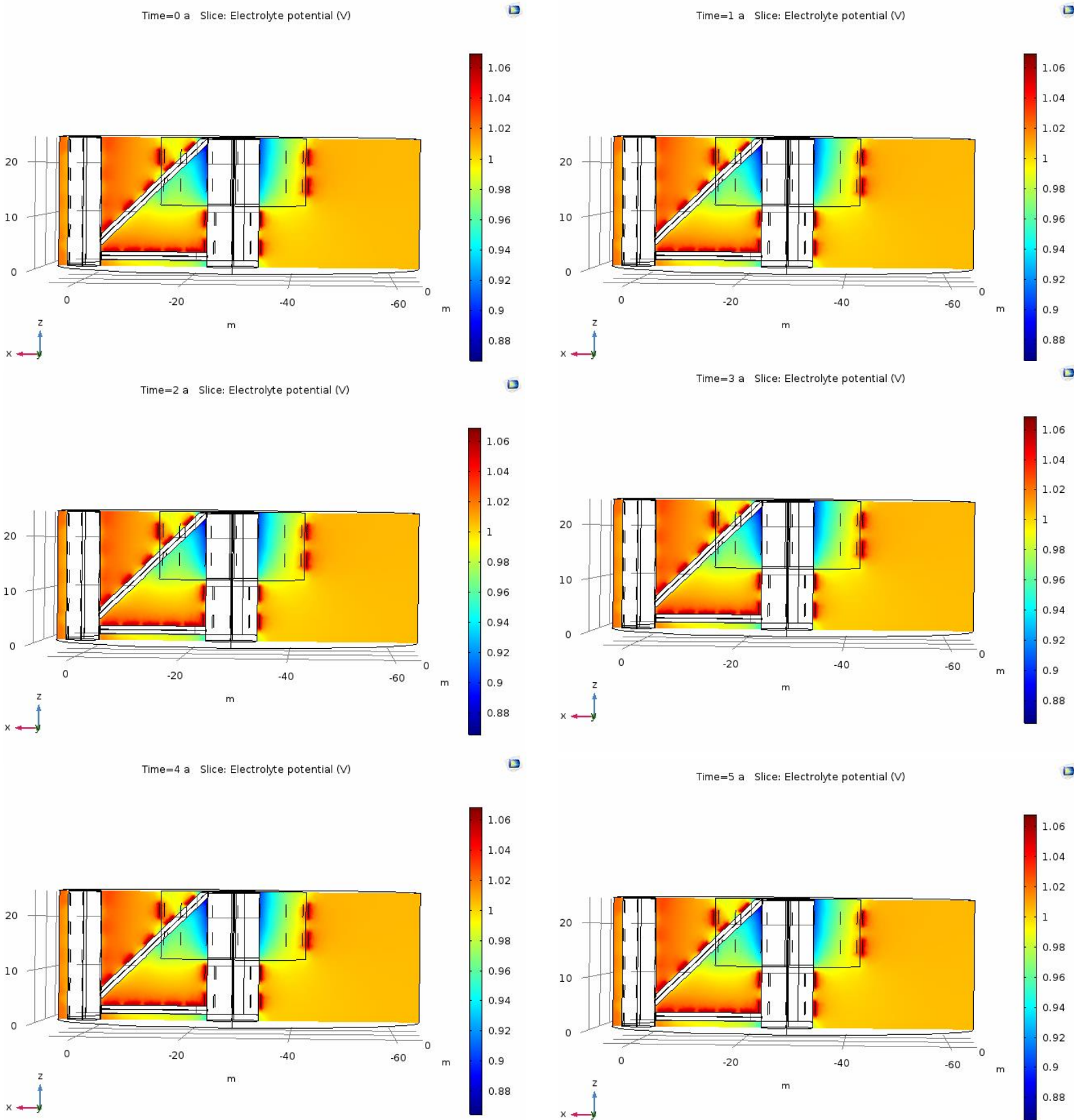
Εικόνα 6.10: Ετήσια μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού της μεταλλικής κατασκευής (Μέρος 3ο)

Προσομοίωση Καθοδικής Προστασίας Πλωτής Υπεράκτιας Κατασκευής Πολλαπλών Χρήσεων
Μέρος 6^ο: Προσομοίωση Δυναμικού Φαινομένου Καθοδικής Προστασίας



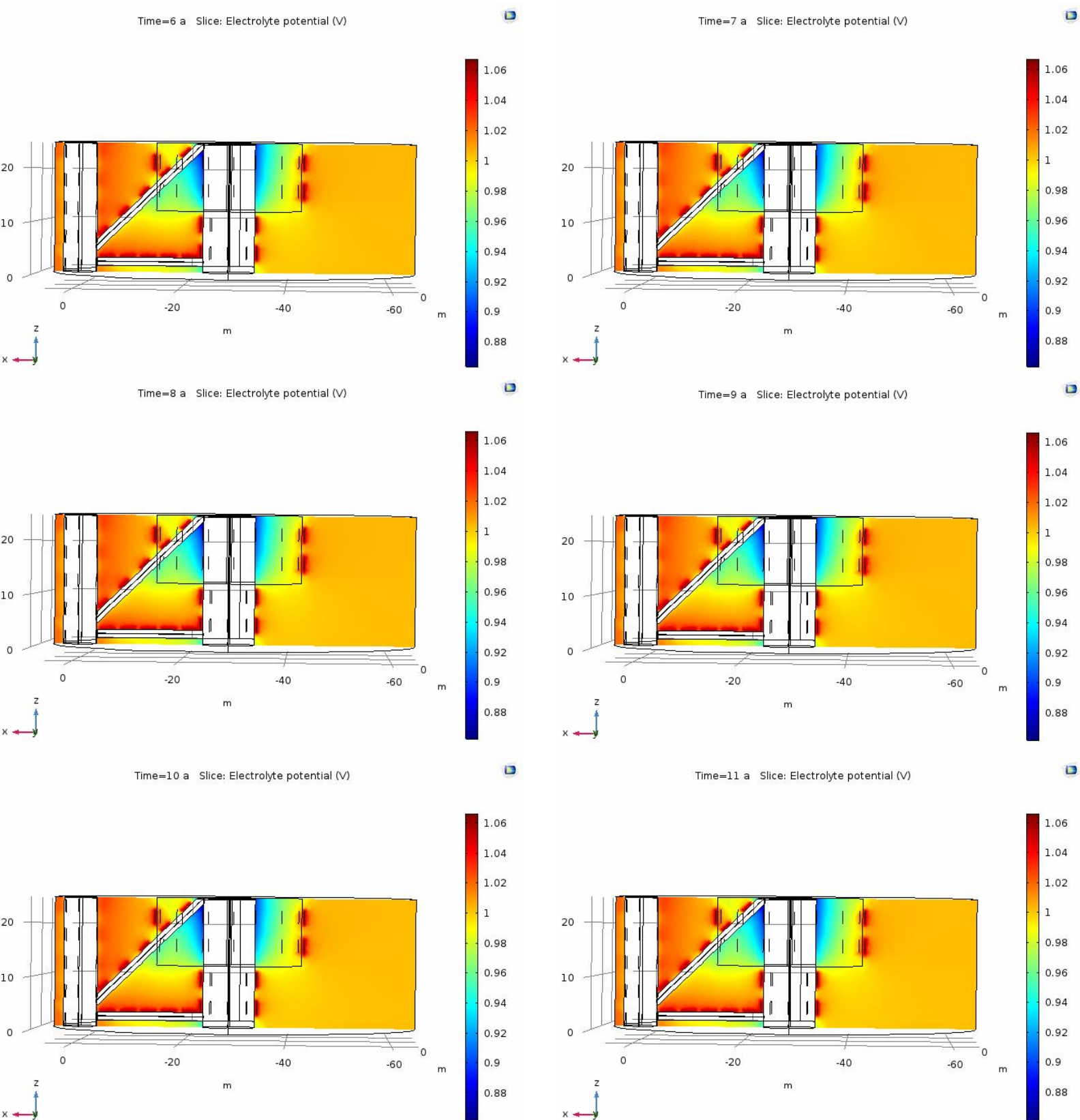
Εικόνα 6.11: Ετήσια μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού της μεταλλικής κατασκευής (Μέρος 4ο)

Προσομοίωση Καθοδικής Προστασίας Πλωτής Υπεράκτιας Κατασκευής Πολλαπλών Χρήσεων
Μέρος 6^ο: Προσομοίωση Δυναμικού Φαινομένου Καθοδικής Προστασίας



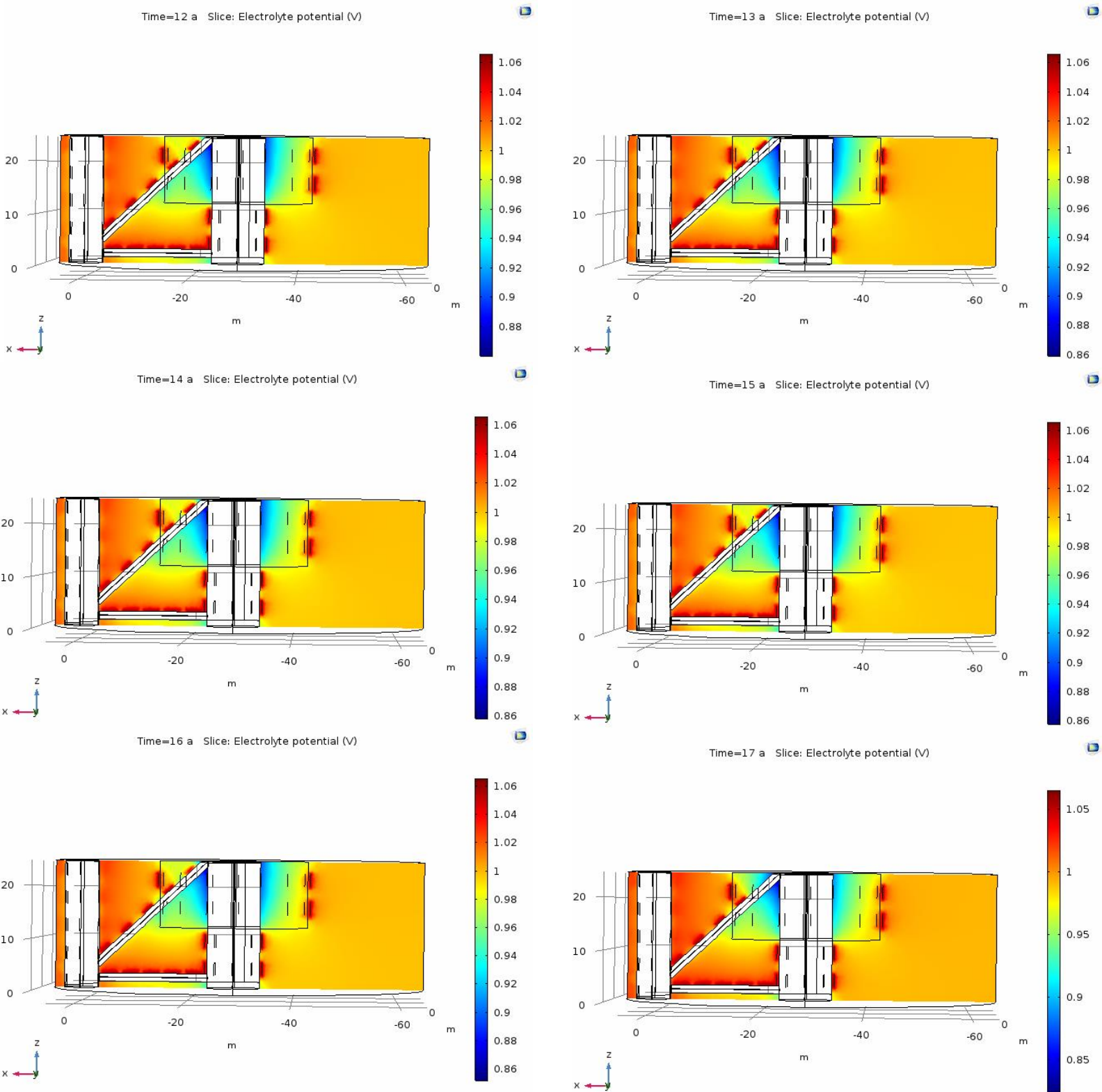
Εικόνα 6.12: Ετήσια μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού του ηλεκτρολύτη (Μέρος 1ο)

Προσομοίωση Καθοδικής Προστασίας Πλωτής Υπεράκτιας Κατασκευής Πολλαπλών Χρήσεων
Μέρος 6^ο: Προσομοίωση Δυναμικού Φαινομένου Καθοδικής Προστασίας



Εικόνα 6.13: Ετήσια μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού του ηλεκτρολύτη (Μέρος 2ο)

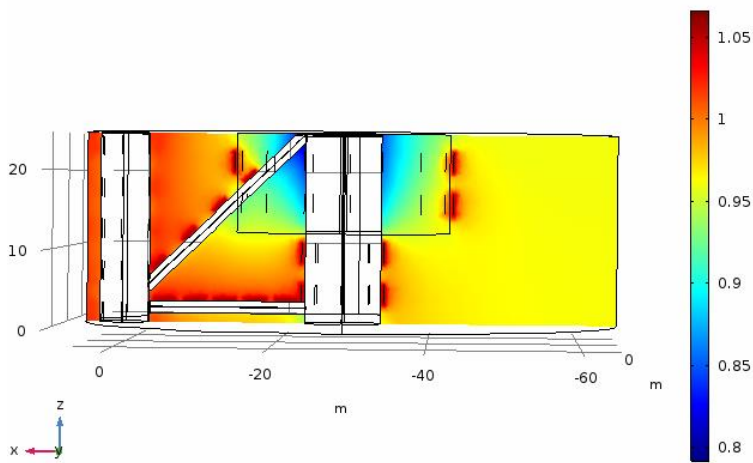
Προσομοίωση Καθοδικής Προστασίας Πλωτής Υπεράκτιας Κατασκευής Πολλαπλών Χρήσεων
Μέρος 6^ο: Προσομοίωση Δυναμικού Φαινομένου Καθοδικής Προστασίας



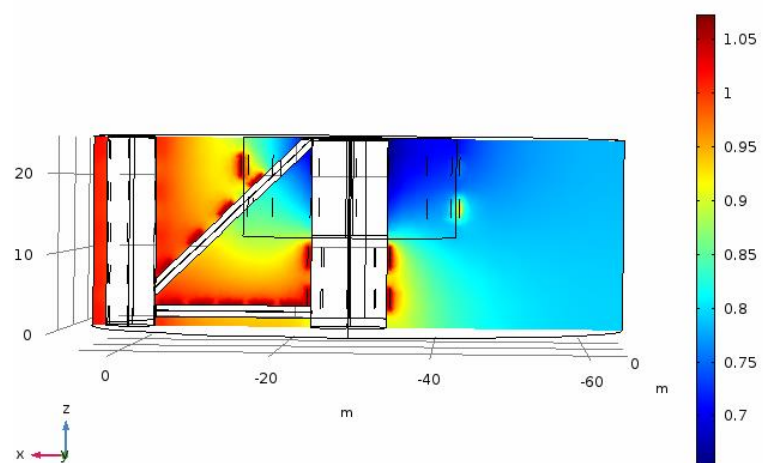
Εικόνα 6.14: Ετήσια μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού του ηλεκτρολύτη (Μέρος 3ο)

Προσομοίωση Καθοδικής Προστασίας Πλωτής Υπεράκτιας Κατασκευής Πολλαπλών Χρήσεων
Μέρος 6^ο: Προσομοίωση Δυναμικού Φαινομένου Καθοδικής Προστασίας

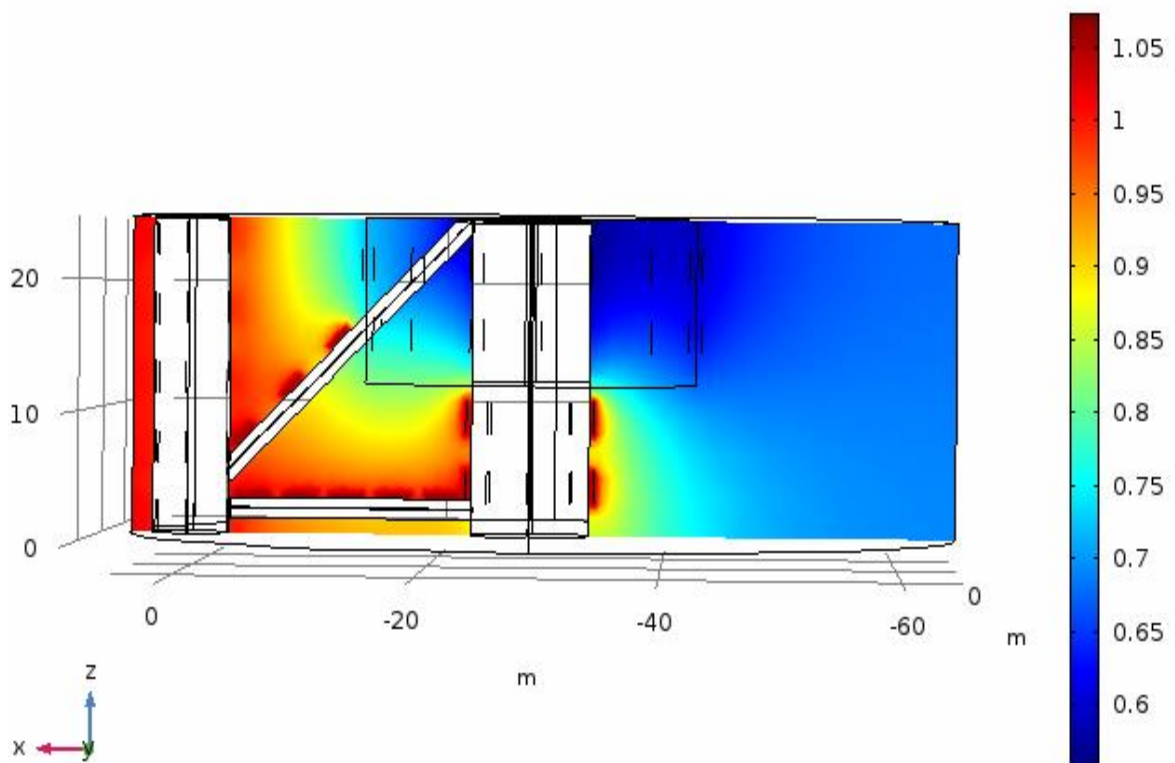
Time=18 a Slice: Electrolyte potential (V)



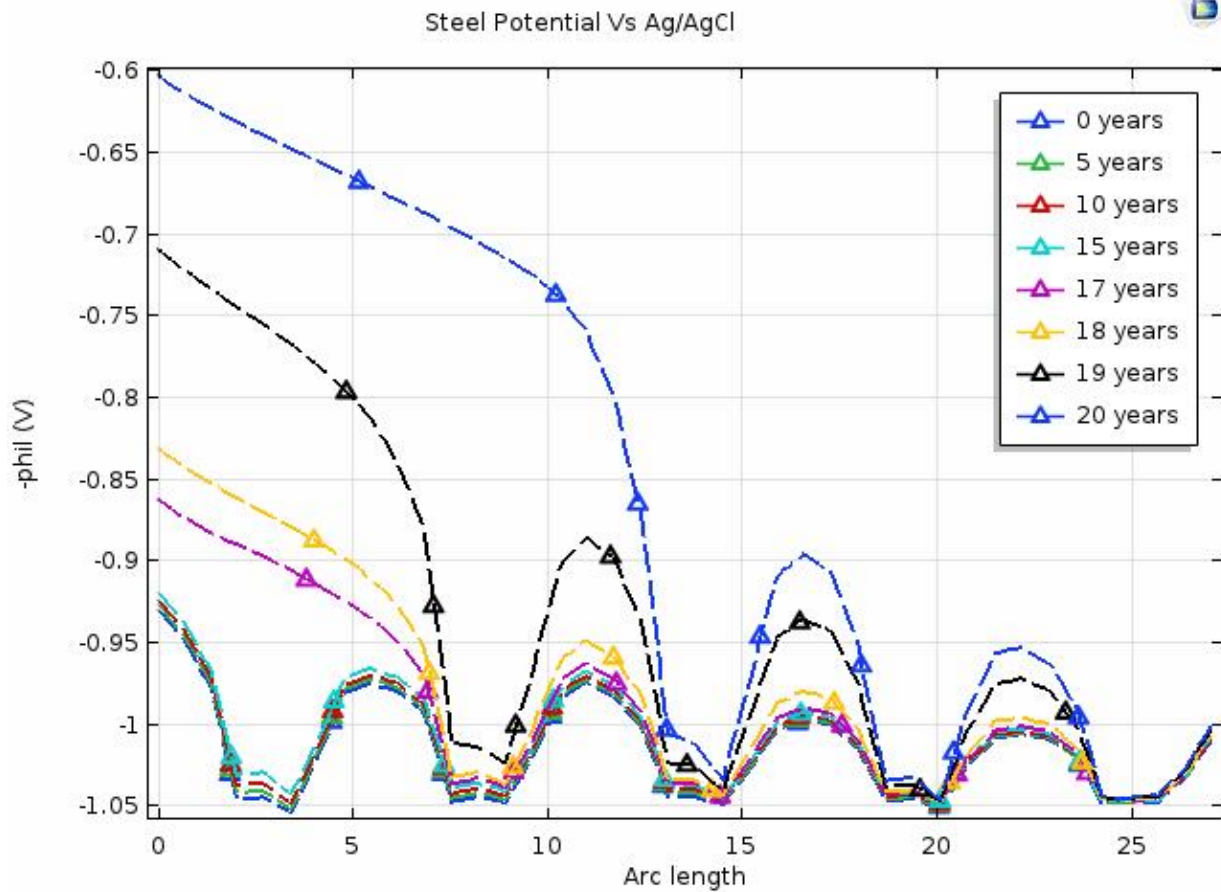
Time=19 a Slice: Electrolyte potential (V)



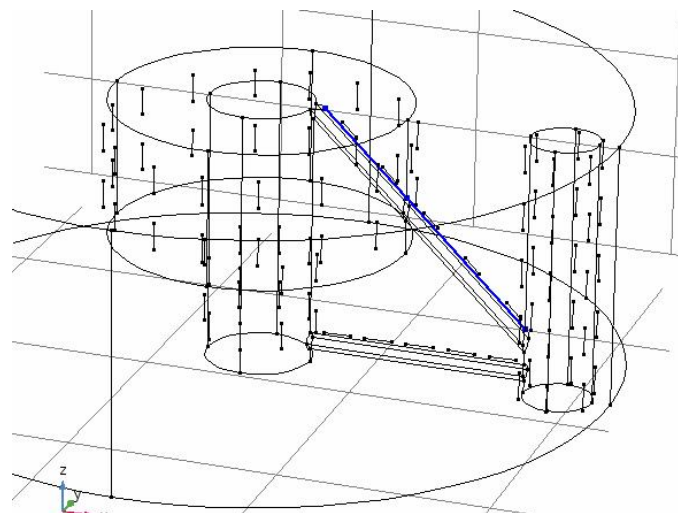
Time=20 a Slice: Electrolyte potential (V)



Εικόνα 6.15: Ετήσια μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού του ηλεκτρολύτη (Μέρος 4ο)



Εικόνα 6.16 : Μεταβολή του δυναμικού κατά μήκος του διαγώνιου μπρακέτου στήριξης . Όπως φαίνεται η αύξηση του δυναμικού ξεκινάει από τον ανωτικό κύλινδρο και χρονικά προχωράει προς τον πυλώνα στήριξης . Οι κοιλιάδες που εμφανίζονται είναι λόγω της ύπαρξης των ανόδων στα συγκεκριμένα σημεία.



Εικόνα 6.17: Σχηματική απεικόνιση του αναφερόμενου μήκους στο διάγραμμα της εικόνας 6.13

Μέρος 7^ο : Περιγραφή & Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων (12) (16) (6)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η προσομοίωση της καθοδικής προστασίας της κατασκευής χωρίστηκε σε δύο επίπεδα. Στο πρώτο, έγινε μελέτη της κατανομής του δυναμικού σε ολόκληρη τη γεωμετρία της πλατφόρμας για την χρονική στιγμή που μόλις έχει εγκατασταθεί και οι άνοδοι παραμένουν αναλλοίωτες. Στο δεύτερο επίπεδο έγινε υπολογισμός της κατανομής του δυναμικού για την διάρκεια ζωής των 20 χρόνων, λαμβάνοντας υπόψη τον ρυθμό διάλυσης των ανόδων. Επιπλέον έγινε μελέτη και αξιολόγηση της περίπτωσης προστασίας της κατασκευής με συνδυασμό θυσιαζόμενων ανόδων και επικαλύψεων.

7.1 Αξιολόγηση Στατικού Φαινομένου

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 5.7 έχουν υπολογιστεί βάσει της πρωτογενούς ανάλυσης κατανομής πυκνότητας ρεύματος (Primary Current Distribution) που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα Comsol Multiphysics. Με την συγκεκριμένη θεώρηση το πρόγραμμα λαμβάνει υπόψη μόνο τα ωμικά φαινόμενα, γι' αυτό το λόγο θεωρείται λιγότερο ακριβής λύση σε σχέση με την μοντελοποίηση του δυναμικού φαινομένου όπου γίνεται χρήση δευτερογενούς ανάλυσης (Secondary Current Distribution).

Πίνακας 7.1: Μέγιστη, Ελάχιστη και Μέση τιμή δυναμικού της υπό προστασίας επιφάνειας

Κατανομή Ηλ. Δυναμικού στην Κατασκευή (Volt)	
Μέγιστη Τιμή	-0.8347
Μέση Τιμή	-0.940
Ελάχιστη Τιμή	-1.050

Σύμφωνα με το ένθετο κανονισμών του DNV-GL, DNVGL-RP-B401 : Recommended Practice, Cathodic Protection Design, ένα σωστά σχεδιασμένο σύστημα καθοδικής προστασίας πρέπει να επιβάλλει δυναμικό προστασίας για το μεγαλύτερο μέρος της ζωής της κατασκευής με εύρος από -0.9 V μέχρι -1.05 V. Προς το τέλος της διάρκειας ζωής της κατασκευής, το δυναμικό θα προσεγγίζει την τιμή -0.8 V, φτάνοντας και σε θετικότερες τιμές. Στο σημείο που το δυναμικό ξεπεράσει το -0.8V η κατασκευή θεωρείται ότι μπαίνει στην περιοχή της υποπροστασίας και γίνεται επιρρεπής σε διάβρωση.

Από τον πίνακα 7.1 και από την εικόνα 5.11 & 5.12, βλέπουμε ότι το μεγαλύτερο μέρος της κατασκευής ανήκει στο εύρος που ορίζει ο νηογνώμονας. Τα σημεία που είναι πιο ευάλωτα βρίσκονται στους εσωτερικούς ανωστικούς κυλίνδρους ως συνέπεια της αδυναμίας τοποθέτησης ανόδων στη συγκεκριμένη επιφάνεια. Στην περίπτωση που

γινόταν τοποθέτηση ανόδων στην συγκεκριμένη περιοχή θα επηρεαζόταν η υδροδυναμική μελέτη που έχει διεξαχθεί, καθώς και η αποδιδόμενη ισχύς των συσκευών OWC. Βέβαια, ακόμα και έτσι, το δυναμικό συνεχίζει να βρίσκεται μέσα στα όρια προστασίας του μετάλλου από την διάβρωση.

Τα βασικά στοιχεία που παρέχουν στήριξη στην κατασκευή, όπως είναι ο βασικός πυλώνας στήριξης της ανεμογεννήτριας και τα μπρακέτα που προσφέρουν την συνοχή της κατασκευής, βρίσκονται μέσα στα καθορισμένα όρια προστασίας .

Πίνακας 7.2 : Προτεινόμενα δυναμικά προστασίας για διάφορα μέταλλα σε 30 Ω-cm θαλασσινό νερό και αλατότητα 3.2-3.8% (6)

Προστατευόμενο Υλικό	Ελάχιστο Αρνητικό Δυναμικό (V)	Μέγιστο Αρνητικό Δυναμικό (V)
Ανθρακούχος χάλυβας σε αερόβιο περιβάλλον	-0.80	-1.10
Ανθρακούχος χάλυβας σε αναερόβιο περιβάλλον	-0.90	-1.10
Ωστενιτικός χάλυβας με PREN ⁹ ≥40	-0.30	-1.10
Ωστενιτικός χάλυβας με PREN<40	-0.50	-1.10
Μαρτενσιτικός χάλυβας	-0.50	Εξαρτάται από την αντοχή του κράματος λόγω του κινδύνου ψαθυροποίησης
Duplex Χάλυβας Ανοξειδωτος Κράματα Νικελίου	-0.50	

7.2 Αξιολόγηση Χρονικά Μεταβαλλόμενου Φαινομένου

Στην συνέχεια έγινε μελέτη της προστασίας της κατασκευής στα 20 χρόνια ζωής της. Η μελέτη λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και φορτίου που συμβαίνουν, καθώς και την χρονικά μεταβαλλόμενη διάλυση της ακτίνας των θυσιαζόμενων ανόδων.

Όπως φαίνεται στις εικόνες 6.7 με 6.10 η κατανομή του δυναμικού πάνω στην επιφάνεια της κατασκευής είναι εντός των ορίων της προστασίας του χάλυβα για τα πρώτα 17 χρόνια της κατασκευής. Στην συνέχεια η υψηλή ζήτηση σε ρεύμα προστασίας στην περιοχή του ανωστικού κυλίνδρου λόγω της μεγάλης απροστάτευτης επιφάνειας

⁹ PREN (Pitting resistance equivalent number) , προβλέπει την αντίσταση του ανοξειδωτου χάλυβα στην τοπική διάβρωση με βελονισμούς βάσει της χημικής σύστασης του κράματος

οδηγεί σε γρήγορη κατανάλωση των ανόδων. Η κατανάλωση των ανόδων οδηγεί στην απότομη άνοδο του δυναμικού και στην εμφάνιση τιμών δυναμικού της περιοχής υποπροστασίας, όπου η προστασία της κατασκευής δεν είναι επαρκής.

Η μεταβολή αυτή γίνεται περισσότερο κατανοητή στην εικόνα 6.15, στην οποία φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού κατά μήκος του διαγώνιου μπρακέτου στήριξης μεταξύ του ανωστικού κυλίνδρου και του κεντρικού πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Στο συγκεκριμένο γράφημα φαίνεται ότι μετά το 18^ο έτος ξεκινάει η αύξηση του δυναμικού σε υψηλότερα επίπεδα από -0.8 Volt σηματοδοτώντας την έναρξη της διάβρωσης του υλικού. Καθώς οι άνοδοι διαλύονται χρονικά από τον κύλινδρο προς τον πυλώνα η αύξηση του δυναμικού εξαπλώνεται κατά μήκος του μπρακέτου. Οι κοιλάδες που υπάρχουν στο διάγραμμα αναδεικνύουν τις περιοχές που έχουν τοποθετηθεί θυσιαζόμενοι άνοδοι. Με την πάροδο των χρόνων οι άνοδοι διαλύονται με μεγαλύτερο ρυθμό από την περιοχή του χυτωνίου προς το κέντρο της κατασκευής επιτρέποντας την αύξησή του δυναμικού.

Πίνακας 7.3: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές του ηλεκτρικού δυναμικού πάνω στην επιφάνεια της κατασκευής συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας της κατασκευής.

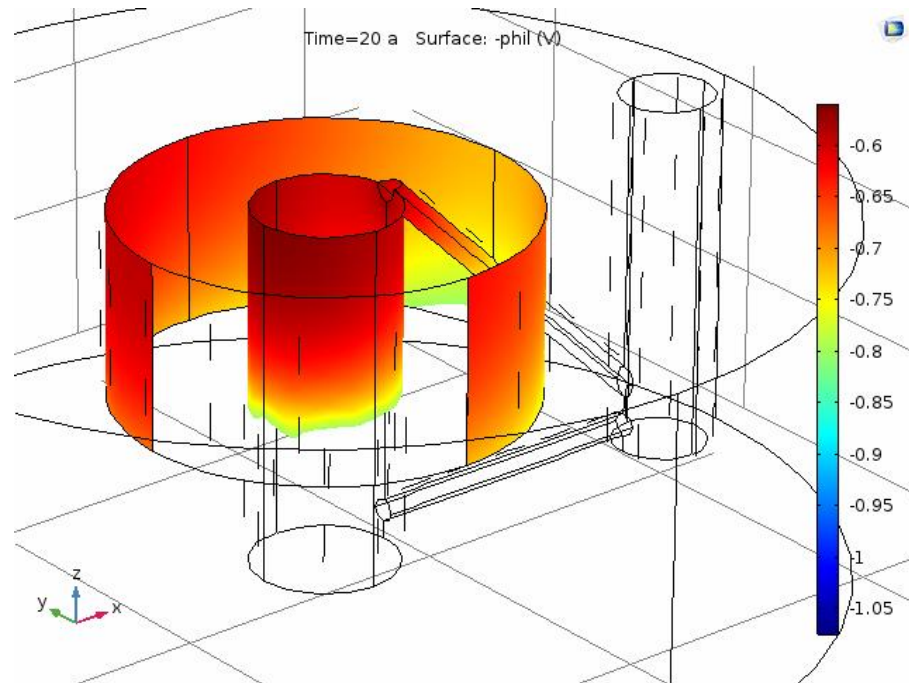
Έτος	0	1	2	3	4	5	6
Ελάχιστη Τιμή Δυναμικού(V)	-1.067	-1.067	-1.067	-1.067	-1.067	-1.066	-1.066
Μέγιστη Τιμή Δυναμικού(V)	-0.866	-0.866	-0.866	-0.865	-0.865	-0.865	-0.863

Έτος	7	8	9	10	11	12	13
Ελάχιστη Τιμή Δυναμικού(V)	-1.066	-1.066	-1.066	-1.066	-1.066	-1.066	-1.066
Μέγιστη Τιμή Δυναμικού(V)	-0.863	-0.862	-0.862	-0.861	-0.860	-0.860	-0.859

Έτος	14	15	16	17	18	19	20
Ελάχιστη Τιμή Δυναμικού(V)	-1.066	-1.066	-1.066	-1.066	-1.066	-1.070	-1.070
Μέγιστη Τιμή Δυναμικού(V)	-0.859	-0.858	-0.852	-0.825	-0.792	-0.66	-0.56

Από τον παραπάνω πίνακα 7.3 φαίνεται ότι στον 18^ο χρόνο η τιμή του μέγιστου δυναμικού στην μεταλλική επιφάνεια αυξάνεται πάνω από τα επιτρεπόμενα όρια. Η ελάχιστη τιμή του δυναμικού δεν πέφτει ποτέ κάτω από τα -1.10 Volt που σημαίνει ότι δεν τίθεται ζήτημα ψαθυροποίησης του χάλυβα λόγω υπερπροστασίας. Στην εικόνα 7.1

φαίνονται οι υψηλές τιμές του δυναμικού, μεγαλύτερες από $-0.7V$ σχεδόν σε όλη την επιφάνεια της υπό μελέτη περιοχής. Στο εσωτερικό τμήμα του ανωστικού κυλίνδρου μακριά από τους βραχίονες το δυναμικό λαμβάνει τιμές ακόμα και χαμηλότερες από $-0.6V$.



Εικόνα 7.1: Περιοχή που έχει υποστεί διάβρωση τον 20ο χρόνο της ζωής της πλωτής κατασκευής

7.3 Αξιολόγηση Χρονικά Μεταβαλλόμενου Φαινομένου με Επικάλυψη

Τα αποτελέσματα της μελέτης του δυναμικού φαινομένου έδειξαν ότι η προστασία της επιφάνειας του ανωστικού κυλίνδρου είναι ελλιπής περίπου από το 18^ο έτος λειτουργίας και μετά από την παρατήρηση ότι οι άνοδοι της γειτονικής περιοχής εξαντλούνται σχετικά γρήγορα, αποφασίστηκε να μελετηθεί ως λύση στο πρόβλημα η χρήση επιστρώσεων στην μεταλλική κατασκευή της πλατφόρμας και συγκεκριμένα μόνο στην επιφάνεια του ανωστικού κυλίνδρου άνω των 12 μέτρων (δηλαδή εσωτερικά του μανδύα).

Η δανέζικη εταιρεία Hempel που εξειδικεύεται στις βαφές που χρησιμοποιούνται για την επικάλυψη πλωτών ανεμογεννητριών σε περιοχές, όπως η βαλτική και η βόρεια θάλασσα, προτείνει την χρήση δύο στρώσεων επικαλύψεων, μίας εποξειδική (epoxy) και μίας πολυουρεθάνης (polyurethane) συνολικού πάχους 680 μm.

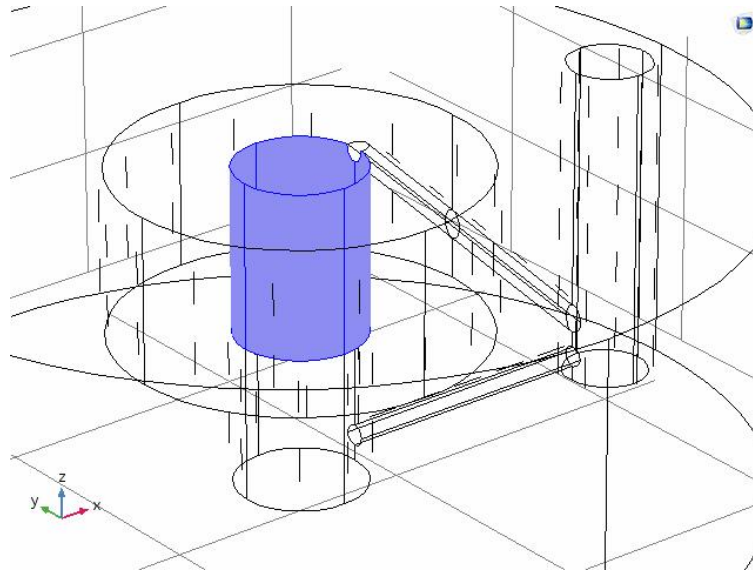
Από τα παραπάνω προκύπτει ότι πρέπει να ξαναγίνει ο υπολογισμός των αριθμού των ανόδων σύμφωνα με τις οδηγίες του DNV-GL όπως πραγματοποιήθηκαν στην παράγραφο 4. Από τον πίνακα 4.7 φαίνεται ότι η επιφάνεια που θα επικαλυφθεί ανήκει στην Κατηγορία 3 συνεπώς διαφοροποιούνται οι μεταβλητές υπολογισμού και πρέπει να υπολογιστεί ξεχωριστά το απαιτούμενο ρεύμα που θα δώσει τον τελικό αριθμό των ανόδων (Εικ.7.2).

Εκτελώντας την διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 4 προκύπτουν τα παρακάτω του Πίνακα 7.4:

Πίνακας 7.4: Υπολογισμός Αριθμού ανόδων

Αποτελέσματα Υπολογισμών	
Επικαλυμμένη Επιφάνεια (m ²)	1225.19
Μη Επικαλυμμένη Επιφάνεια (m ²)	6956.44
Συνολική Απαίτηση Ρεύματος (A)	582
Συνολική Απαίτηση Βάρους (Kg)	49570.36
Απαιτούμενος Αριθμός Ανόδων	165

Όπως φαίνεται με την επικάλυψη της επιφάνειας του ανωστικού κυλίνδρου μειώνεται ο αριθμός των ανόδων από 195 άνοδοι σε 165 συνολικά.

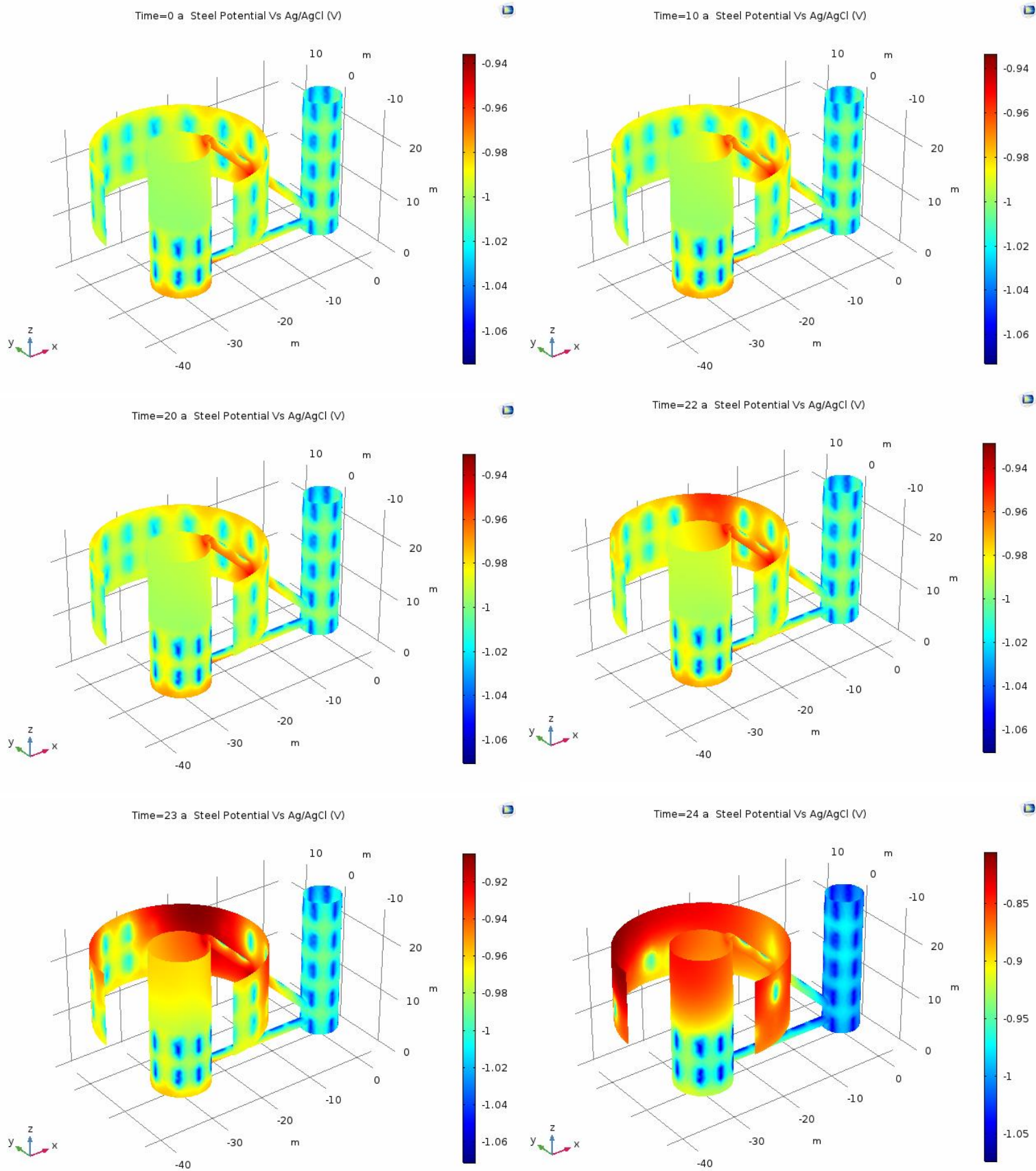


Εικόνα 7.2 : Η επιφάνεια του ανωστικού κυλίνδρου που θα έχει επικάλυψη όπως φαίνεται στο γραφικό περιβάλλον του Comsol Multiphysics 5.3

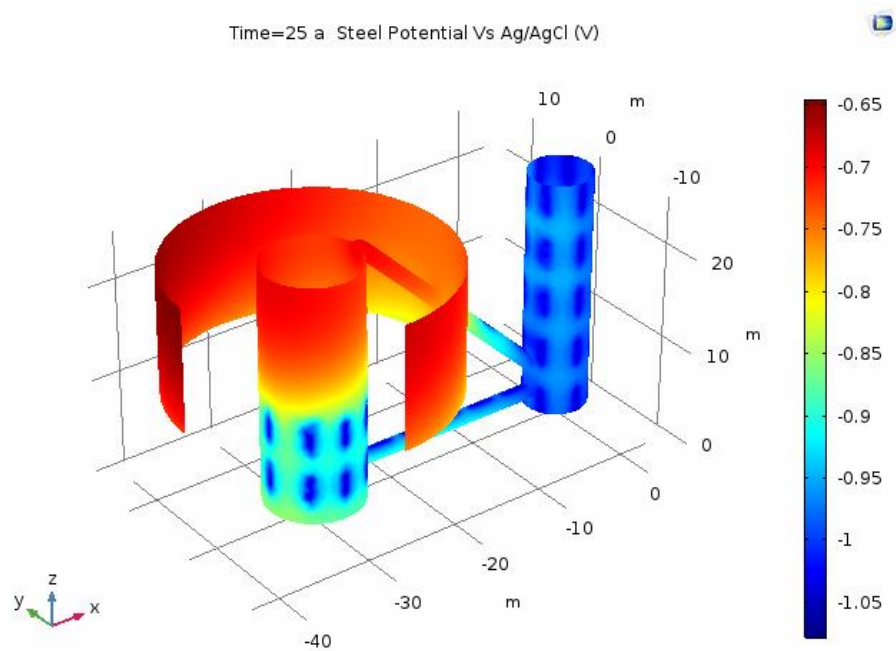
Βάσει των παραπάνω ακολουθείται η ίδια διαδικασία στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics 5.3 με αυτήν που αναλύθηκε στην παράγραφο 6. Και στις δύο διαδικασίες χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος αριθμός ανόδων, η μόνη διαφοροποίηση είναι ότι η επικαλυμμένη επιφάνεια θα έχει διαφορετικές συνοριακές συνθήκες σε σχέση με την υπόλοιπη μεταλλική κατασκευή. Η επιφάνεια του ανωστικού κυλίνδρου θεωρείται μη αγωγίμη και αφού η επιφάνεια της μεταλλικής κατασκευής προστατεύεται από την επικάλυψη, συνεπάγεται ότι η πυκνότητα ρεύματος (exchange current density), με την οποία πραγματοποιείται η οξείδωση του μετάλλου και η αναγωγή του οξυγόνου στην μεταλλική επιφάνεια, είναι μηδενική. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης στα διαγράμματα 7.3 και 7.4.

Στα διαγράμματα 7.3 και 7.4 φαίνεται καθαρά ότι η επικάλυψη παρέχει επαρκή προστασία στην κατασκευή στη διάρκεια του χρόνου. Ειδικότερα η εσωτερική επιφάνεια του χιτωνίου παραμένει προστατευμένη για μεγαλύτερο διάστημα όπως και οι βραχίονες στήριξης και μόνο μετά το 24^ο έτος εμφανίζεται τιμή δυναμικού μικρότερη από -0.8V. Ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας παραμένει επαρκώς προστατευμένος μέχρι και το 25^ο έτος. Οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές του δυναμικού φαίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 7.5.

Προσομοίωση Καθοδικής Προστασίας Πλωτής Υπεράκτιας Κατασκευής Πολλαπλών Χρήσεων
Μέρος 7^ο : Περιγραφή & Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων



Εικόνα 7.3: Μεταβολή του δυναμικού πάνω στην επιφάνεια της μεταλλικής κατασκευής με χρήση επικαλύψεων τον 1^ο, 10^ο, 20^ο, 22^ο, 23^ο και 24^ο χρόνο ζωής της εγκατάστασης

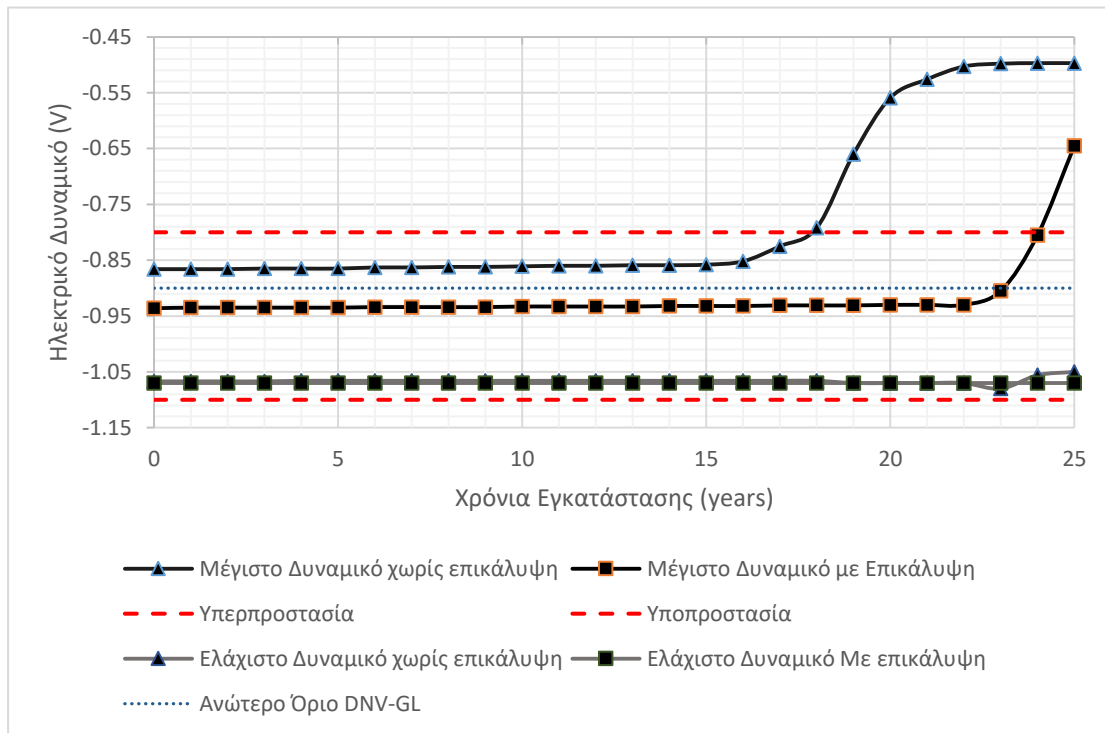


Εικόνα 7.4: Κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού στην μεταλλική κατασκευή τον 25^ο χρόνο λειτουργίας της

Πίνακας 7.5: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές του ηλεκτρικού δυναμικού πάνω στην επιφάνεια της κατασκευής μετά τη χρήση επικάλυψης

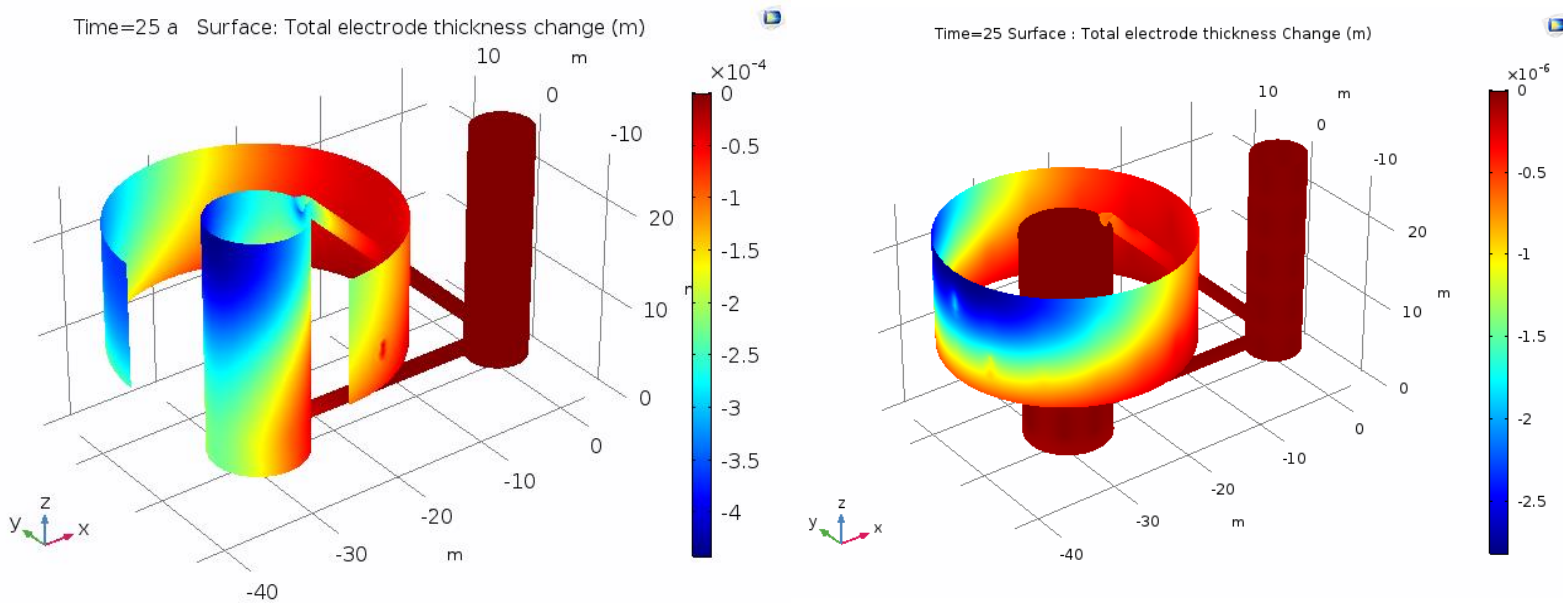
Έτος	0	10	20	22	23	24	25
Ελάχιστη Τιμή Δυναμικού(V)	-1.074	-1.072	-1.070	-1.07	-1.07	-1.073	-1.077
Μέγιστη Τιμή Δυναμικού(V)	-0.936	-0.933	-0.930	-0.928	-0.905	-0.805	-0.645

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης με τα αποτελέσματα της περίπτωσης χωρίς την χρήση επικάλυψης στον εσωτερικό ανωστικό κύλινδρο προκύπτει το παρακάτω συγκριτικό διάγραμμα :



Εικόνα 7.5: Χρονική μεταβολή μέγιστων και ελάχιστων τιμών του δυναμικού στην επιφάνεια της μεταλλικής κατασκευής με ή χωρίς εφαρμογή επικάλυψης στον εσωτερικό ανωστικό κύλινδρο

Σε πρώτη φάση, παρατηρείται ότι στην τελευταία μελέτη το μέγιστο δυναμικό στην μεταλλική επιφάνεια βρίσκεται σε χαμηλότερες τιμές του -0.9 Volt που σημαίνει ότι η προστασία βρίσκεται εντός των ορίων που έχει θέσει ο DNV-GL. Κατά δεύτερον, φαίνεται ότι με την χρήση επικάλυψης υπάρχει μια επιμήκυνση του προσδόκιμου ζωής της κατασκευής που φτάνει τα 25 χρόνια. Με την χρήση μόνο θυσιαζόμενων ανόδων η διάβρωση της κατασκευής ξεκινά από το 18^ο χρόνο λειτουργίας, αντίθετα με τον συνδυασμό των μεθόδων, το δυναμικό δεν έχει πέσει σε επίπεδα υποπροστασίας έως το 24^ο χρόνο της κατασκευής. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 7.6 η συνολική απώλεια πάχους για την κατασκευή χωρίς επικάλυψη φτάνει έως και τα 0.44 mm ενώ με επικάλυψη τα 2.81 μm.



Εικόνα 7.6: Συνολική απώλεια πάχους της κατασκευής στον 25^ο χρόνο , δεξιά έχει γίνει χρήση επικάλυψης ενώ αριστερά όχι

7.4 Πρόσθετο Βάρος & Υπολογισμός Έρματος

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή το βάρος της κάθε ανόδου είναι ίσο με 603 κιλά. Για την προστασίας της χαλύβδινης επιφάνειας χρησιμοποιήθηκαν 195 άνοδοι. Αναλυτικά η κατανομή του πρόσθετου βάρους παρουσιάζεται παρακάτω:

Πίνακας 7.6: Πρόσθετο βάρος Ανόδων ανά κατασκευαστικό στοιχείο

Κατασκευαστικό Στοιχείο	Αριθμός Ανόδων	Βάρος (t)
Κεντρικός Πυλώνας	20	12.06
Μανδύας Συσκευής	90	54.27
Εσωτερικός Ανωστικός Κύλινδρος	36	21.708
Τένοντες 1	15	9.045
Τένοντες 2	18	10.854
Τένοντες 3	15	9.045
Άθροισμα	194	116.982

Συνολικά προστίθενται 117 τόνοι οι οποίοι μπορεί να επηρεάσουν την προμελέτη της κατασκευής σε δύο πτυχές.

- Η πρώτη αφορά την μεταβολή της μηχανικής αντοχής της κατασκευής αφού θα δημιουργηθούν επιπλέον διατμητικές και καμπτικές τάσεις .
- Η δεύτερη αφορά την διατήρηση της ισάλου στα 20 μέτρα με μηδενική διαγωγή .

Οι άνοδοι έχουν τοποθετηθεί συμμετρικά πάνω στην πλατφόρμα έτσι δεν τίθεται θέμα μη μηδενικής διαγωγής. Για να διατηρηθεί το βύθισμα της κατασκευής πρέπει να γίνει η ανάλογη αφαίρεση από το έρμα που έχει τοποθετηθεί.

Σύμφωνα με τα στοιχεία της προμελέτης της πλωτής κατασκευής, στο κεντρικό πυλώνα στήριξης της ανεμογεννήτριας θα προστεθεί έρμα ίσο με 429 t και σε κάθε OWC συσκευή, θα προστεθεί ίσο με 139 t. Μετά την μελέτη της καθοδικής προστασίας, το νέο βάρος για ballast είναι ίσο με **410** τόνους στον πυλώνα στήριξης και **107** τόνους σε κάθε OWC συσκευή.

7.5 Εκτίμηση Κόστους Καθοδικής Προστασίας

Για την προστασία της μεταλλικής κατασκευής από την διάβρωση θα χρησιμοποιηθεί ένας συνδυασμός καθοδικής προστασίας και αντιδιαβρωτικών επικαλύψεων . Η εκτίμηση κόστους πραγματοποιήθηκε προσεγγιστικά λαμβάνοντας υπόψιν την κοστολόγηση διαφορετικών εταιρειών που παρέχουν παρόμοιες υπηρεσίες και όχι των συγκεκριμένων εταιρειών που πάρθηκαν τα στοιχεία για τις ανόδους και τις επικαλύψεις.

Για τις θυσιαζόμενες ανόδους από κράμα αλουμινίου η τιμή που υπολογίστηκε είναι ίση με **1600\$/τμχ** ενώ για την χρήση δύο στρώσεων αντιδιαβρωτικών επικαλύψεων (μίας εποξειδική (epoxy) και μίας πολυουρεθάνης) η τιμή είναι ίση με **25 \$/m²** . Μια προσέγγιση του συνολικού κόστους της καθοδικής προστασίας παρουσιάζεται στον πίνακα 7.7.

Πίνακας 7.7: Εκτίμηση Κόστους Καθοδικής Προστασίας

Κόστος Θυσιαζόμενων Ανόδων		
Αριθμός Ανόδων	Κόστος/ Άνοδο (\$/ τμχ)	Συνολικό Κόστος (\$)
195	1600	312.000
Κόστος Επικάλυψης		
Επιφάνεια(m ²)	Κόστος/τ.μ. (\$/m ²)	Συνολικό Κόστος (\$)
1225	25	30.600
ΣΥΝΟΛΟ:		342.600 \$

Μέρος 8^ο: Συμπεράσματα & Μελλοντική Έρευνα

8.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση της καθοδικής προστασίας της υπεράκτιας πλωτής ανεμογεννήτριας πολλαπλών χρήσεων σε δύο επίπεδα. Στο πρώτο επίπεδο, έγινε μελέτη της κατανομής του δυναμικού σε ολόκληρη τη γεωμετρία της πλατφόρμας για την χρονική στιγμή που μόλις έχει εγκατασταθεί η κατασκευή και οι άνοδοι παραμένουν αναλλοίωτες. Στο δεύτερο επίπεδο έγινε υπολογισμός της κατανομής του δυναμικού για την διάρκεια ζωής των 20 χρόνων, λαμβάνοντας υπόψη τον ρυθμό διάλυσης των ανόδων. Επίσης έγινε μελέτη και αξιολόγηση της περίπτωσης προστασίας της κατασκευής με συνδυασμό θυσιαζόμενων ανόδων και επικαλύψεων προεκτείνοντας την διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας στα 25 χρόνια.

Στη μελέτη του στατικού φαινομένου σε ολόκληρη την γεωμετρία της πλατφόρμας λήφθηκαν υπόψη μόνο τα ωμικά φαινόμενα που οδηγούν στην πόλωση της μεταλλικής κατασκευής (Primary Current Distribution). Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι το δυναμικό στην επιφάνεια του μεγαλύτερου μέρους της κατασκευής ανήκει στο εύρος που ορίζει ο νηογνώμονας (-1.05V με -0.9 V). Τα σημεία που είναι πιο ευάλωτα βρίσκονται στους εσωτερικούς ανωστικούς κυλίνδρους ως συνέπεια της αδυναμίας τοποθέτησης ανόδων στη συγκεκριμένη επιφάνεια, όπου δεν τοποθετήθηκαν άνοδοι για να μην επηρεαστεί η υδροδυναμική μελέτη, καθώς και η αποδιδόμενη ισχύς των συσκευών OWC. Βέβαια, ακόμα και έτσι, το δυναμικό συνεχίζει να βρίσκεται μέσα στα όρια προστασίας του μετάλλου από την διάβρωση (-1.10 V με -0.8 V). Τα βασικά στοιχεία που παρέχουν στήριξη στην κατασκευή, όπως είναι ο βασικός πυλώνας στήριξης της ανεμογεννήτριας και οι βραχίονες που προσφέρουν την συνοχή της κατασκευής, βρίσκονται μέσα στα καθορισμένα όρια προστασίας.

Στην συνέχεια έγινε μελέτη της προστασίας της κατασκευής στα 20 χρόνια ζωής της, όπου ελήφθησαν υπόψη τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και φορτίου που συμβαίνουν, καθώς και η χρονικά μεταβαλλόμενη διάλυση της ακτίνας των θυσιαζόμενων ανόδων. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η κατανομή του δυναμικού πάνω στην επιφάνεια της κατασκευής είναι εντός των ορίων της προστασίας του χάλυβα για τα πρώτα 17 χρόνια της κατασκευής. Στη συνέχεια η υψηλή ζήτηση σε ρεύμα προστασίας στην περιοχή του ανωστικού κυλίνδρου, λόγω της μεγάλης απροστάτευτης επιφάνειας οδηγεί σε γρήγορη κατανάλωση των ανόδων. Η κατανάλωση των ανόδων οδηγεί στην απότομη άνοδο του δυναμικού και στην εμφάνιση τιμών δυναμικού της περιοχής υποπροστασίας, σηματοδοτώντας την έναρξη της διάβρωσης του υλικού. Καθώς οι άνοδοι διαλύονται χρονικά από τον ανωστικό κύλινδρο προς τον πυλώνα της ανεμογεννήτριας η αύξηση του δυναμικού εξαπλώνεται κατά μήκος του βραχίονα. Με την πάροδο των χρόνων οι άνοδοι διαλύονται με μεγαλύτερο ρυθμό από την περιοχή του χιτωνίου προς το κέντρο της κατασκευής επιτρέποντας την περαιτέρω αύξηση του δυναμικού. Στο εσωτερικό τμήμα του ανωστικού κυλίνδρου μακριά από τους βραχίονες το δυναμικό λαμβάνει τιμές ακόμα και χαμηλότερες από -0.6V. Η ελάχιστη τιμή του

δυναμικού δεν πέφτει ποτέ κάτω από τα -1.10 Volt που σημαίνει ότι δεν τίθεται ζήτημα φαθυροποίησης του χάλυβα λόγω υπερπροστασίας.

Τέλος πραγματοποιήθηκε η μελέτη της καθοδικής προστασίας της κατασκευής με χρήση επιστρώσεων στην μεταλλική κατασκευή της πλατφόρμας και συγκεκριμένα μόνο στην επιφάνεια του ανωστικού κυλίνδρου άνω των 12 μέτρων (δηλαδή εσωτερικά του μανδύα) έδειξε ότι ο συνδυασμός επικάλυψης με θυσιαζόμενες ανόδους παρέχει επαρκή προστασία στην κατασκευή στη διάρκεια του χρόνου. Ειδικότερα η εσωτερική επιφάνεια του χιτωνίου παραμένει προστατευμένη για μεγαλύτερο διάστημα όπως και οι βραχίονες στήριξης και μόνο μετά το 240 έτος εμφανίζεται τιμή δυναμικού μικρότερη από $-0.8V$. Το μέγιστο δυναμικό στην μεταλλική επιφάνεια, την χρονική στιγμή της εγκατάστασης της κατασκευής, βρίσκεται σε χαμηλότερες τιμές του -0.9 Volt που σημαίνει ότι η προστασία βρίσκεται εντός των ορίων που έχει θέσει ο DNV-GL. Επίσης προκύπτει ότι με την χρήση επικάλυψης υπάρχει μια επιμήκυνση του προσδόκιμου ζωής της κατασκευής που φτάνει τα 25 χρόνια. Η απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης για την κατασκευή χωρίς επικάλυψη φτάνει έως και τα 0.44 mm ενώ με επικάλυψη τα 2.81 mm .

Συμπερασματικά

- Με την συγκεκριμένη προσομοίωση επιτεύχθηκε η εύρεση ενός συστήματος καθοδικής προστασίας που περιορίζει την διάβρωση της πλωτής υπεράκτιας ανεμογεννήτριας πολλαπλών χρήσεων σε επιτρεπτά επίπεδα, με τη χρήση του προγράμματος Comsol Multiphysics.
- Λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα ωμικά φαινόμενα τα σημεία που είναι πιο ευάλωτα βρίσκονται στους εσωτερικούς ανωστικούς κυλίνδρους ως συνέπεια της αδυναμίας τοποθέτησης ανόδων για να μην επηρεαστεί η υδροδυναμική μελέτη, καθώς και η αποδιδόμενη ισχύς των συσκευών OWC. Ολόκληρη η κατασκευή βρίσκεται εντός των ορίων προστασίας που τίθενται από τις προδιαγραφές.
- Η μελέτη της χρονικής εξέλιξης της προστασίας έδειξε ότι η κατανομή του δυναμικού πάνω στην επιφάνεια της κατασκευής είναι εντός των ορίων της προστασίας του χάλυβα για τα πρώτα 17 χρόνια της κατασκευής. Στη συνέχεια η υψηλή ζήτηση σε ρεύμα προστασίας στην περιοχή του ανωστικού κυλίνδρου, οδηγεί σε γρήγορη κατανάλωση των ανόδων με μεγαλύτερο ρυθμό από την περιοχή του χιτωνίου προς το κέντρο της κατασκευής επιτρέποντας την περαιτέρω αύξηση του δυναμικού.
- Ο συνδυασμός επίστρωσης στην επιφάνεια του ανωστικού κυλίνδρου και θυσιαζόμενων ανόδων παρέχει επαρκή προστασία στην κατασκευή στη διάρκεια του χρόνου. Η εσωτερική επιφάνεια του χιτωνίου παραμένει προστατευμένη για μεγαλύτερο διάστημα όπως και οι βραχίονες στήριξης και μόνο μετά το 240 έτος εμφανίζεται τιμή δυναμικού μικρότερη από $-0.8V$. Η προστασία βρίσκεται εντός των ορίων που έχει θέσει ο DNV-GL. Η χρήση επικάλυψης παρέχει επιμήκυνση του προσδόκιμου ζωής της κατασκευής έως 25 χρόνια.

Η προσομοίωση του φαινομένου καθ' όλη την διάρκεια ζωής της κατασκευής επιτρέπει τον εντοπισμό των κρίσιμων σημείων της επιφάνειας που είναι πιο επιρρεπή στη διάβρωση. Αυτό αποτελεί εύρημα ζωτικής σημασίας για την προγραμματισμένη επιθεώρηση της κατασκευής αφού περιορίζει τα σημεία που χρίζουν προσοχής και έτσι μειώνεται ο χρόνος και το κόστος της επιθεώρησης. Ένας εντοπισμένος έλεγχος της κατασκευής στις επιφάνειες που δέχονται υψηλές τάσεις και είναι ευάλωτες στο φαινόμενο της διάβρωσης αποδεικνύεται πολύ πιο αποτελεσματικός και χρονικά αποδοτικός σε σχέση με έναν ευρύτερο έλεγχο που δεν εστιάζει στα επικίνδυνα σημεία. Επίσης η συγκεκριμένη μελέτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρότυπο και για άλλες πλωτές κατασκευές που δεν έχουν την δυνατότητα τοποθέτησης θυσιαζόμενων ανόδων σε όλο το εμβαδόν της επιφάνειας τους. Όπως προέκυψε , οι κανονισμοί του DNV-GL δεν προβλέπουν την προστασία των κατασκευών που η τοποθέτηση ανόδων σε όλο το εύρος της βυθισμένης κατασκευής είναι αδύνατη και ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων μεθόδων προστασίας είναι απαραίτητος.

8.2 Μελλοντική Έρευνα & Πιθανές Προεκτάσεις

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η εφαρμογή της καθοδικής προστασία της κατασκευής από την διάβρωση με χρήση της μεθόδου θυσιαζόμενων ανόδων . Το πόρισμα της μελέτης είναι ότι θα μπορούσε να υπάρξει επαρκής προστασία από την διάβρωση για ολόκληρη την ζωή της κατασκευής με τον συνδυασμό θυσιαζόμενων ανόδων και επικαλύψεων. Παρόλα αυτά , μια ολοκληρωμένη μελέτη θα έπρεπε να συγκρίνει το παρόν σύστημα προστασίας με άλλα εν δυνάμει συστήματα όπως είναι:

- Η εφαρμογή επιβαλλόμενου ρεύματος (ICCP) ή /και
- Ο συνδυασμός ICCP και θυσιαζόμενων Ανόδων ή/και
- Εφαρμογή επιστρώσεων

Για την σύγκριση των συγκεκριμένων συστημάτων θα μπορούσε να ακολουθηθεί παρόμοια διαδικασία αφού το Comsol Multiphysics διαθέτει τα απαραίτητα εργαλεία και για την προσομοίωση της ICCP μεθόδου προστασίας.

Το σύστημα προστασίας όμως μπορεί να επικυρωθεί και με άλλες μεθόδους πέρα από την μοντελοποίηση του στο λογισμικό Comsol. Ο Νηογνώμονας DNV-GL σε συνεργασία με την εταιρεία Frazer-Nash Consultancy έχει προβεί στην ανάπτυξη ενός προγράμματος που κάνει προσομοίωση της καθοδικής προστασίας και ονομάζεται FNCorrosion. Επιπλέον θα μπορούσε να επιχειρηθεί η πειραματική επικύρωση (experimental validation) του μοντέλου η οποία χαρακτηρίζεται από υψηλή δυσκολία .

Τέλος μια διαφορετική προσέγγιση του προβλήματος θα ήταν η χρήση κινούμενου πλέγματος (dynamic mesh) στην γεωμετρία των θυσιαζόμενων ανόδων. Με αυτόν τον τρόπο θα γινόταν ο αναλυτικός υπολογισμός της απώλειας μάζας των ανόδων κατά την διάρκεια της προστασίας της κατασκευής.

Παράρτημα Ι : Διαδικασία Μοντελοποίησης

Primary Current Distribution – Stationary Study

Διαδικασία μελέτης του στατικού φαινομένου με χρήση της Θεωρίας Πρωτογενούς Πυκνότητας Ρεύματος .

NEW

1. Ανοίγουμε το πρόγραμμα
2. Πατάμε **NEW** → **Model Wizard**

Model Wizard

1. Στο παράθυρο **Model Wizard** , επιλέγουμε **3D**
2. Στις επιλογές **Select Physics** διαλέγουμε **Electrochemistry**→ **Primary and Secondary Current Distribution (cd)**→ **Primary Current Distribution**
3. Πατάμε **Add** →**Study**
4. Στο μενού επιλογών **Select Study** πατάμε **Preset Studies** → **Stationary**
5. Τελειώνουμε πατώντας **Done**

Global Definitions

1. Στην συνέχεια εισάγουμε τις παραμέτρους που θα χρησιμοποιήσουμε στο πρόγραμμα
2. Στο παράθυρο **Model Builder** κάτω από την επιλογή **Global Definitions** διαλέγουμε **Parameters**
3. Στις ρυθμίσεις **Settings Parameters** βρίσκουμε το κουτί εισαγωγής **Parameters**
4. Στο κουτί εισάγουμε τα παρακάτω στοιχεία

Name	Expression	Value	Description
sigma_sea	5[S/m]	5 S/m	ηλ. αγωγιμότητα θαλ. νερού
i_oxygen	-0.1[A/m^2]	-0.1 A/m ²	πυκνότητα ρεύματος χάλυβα
Eeq_AI	-1.05 [V]	-1.05 V	Δυναμικό Ανόδων

GEOMETRY I

Δημιουργούμε την γεωμετρία των ανόδων και της κατασκευής με τα εργαλεία **GEOMETRY TOOLBAR** που υπάρχουν στο πάνω μέρος της οθόνης

1. **CYLINDER**: Με αυτή την επιλογή γίνεται η δημιουργία κυλινδρικών σχημάτων. Η κατασκευή αποτελείται από κυλίνδρους διαφορετικής ακτίνας , ύψους αλλά και προσανατολισμού ,
2. **ROTATE**: Τα μπρακέτα της κατασκευής έχουν διαφορετικό προσανατολισμό σε σχέση με τον κύριο πυλώνα στήριξης και τους ανωστικούς κυλίνδρους, με αυτή την επιλογή εξασφαλίζεται η σωστή γωνία

3. **MIRROR**: Μέρη της γεωμετρίας που παρουσιάζουν συμμετρία, μπορούν να κατασκευαστούν βάσει κάποιου επιπέδου ή διανύσματος
4. **ARRAY**: Αυτή η επιλογή χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των ανόδων. Δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να δημιουργήσει N φορές ένα στοιχείο και να το διατάξει με συγκεκριμένη απόσταση στο χώρο .

Για την δημιουργία του χώρου του ηλεκτρολύτη κατασκευάστηκαν δύο κύλινδροι .

CYLINDER 1 (cyl1)

1. Επιλέγουμε ακτίνα **Radius** :40m
2. Επιλέγουμε ύψος **Height**: 32m
3. Πατάμε **Build selected** για να δημιουργηθεί ο κύλινδρος στο γραφικό περιβάλλον του προγράμματος.

CYLINDER 2 (cyl2)

1. Επιλέγουμε ακτίνα **Radius** : 50m
2. Επιλέγουμε ύψος **Height**: 32m
3. Πατάμε **Build selected**

Difference I

1. Στην εργαλειοθήκη **Geometry** επιλέγουμε **Booleans and Partitions**→**Difference**.
2. Επιλέγουμε τις γεωμετρίες των κυλίνδρων **cyl1 cyl2**.
3. Στο παράθυρο των ρυθμίσεων (**Settings**) **Difference** εντοπίζουμε το **Difference section**.
4. Στο σημείο **Objects to subtract** πατάμε **Active**.
5. Στο **Select box** κάνουμε εισαγωγή της κατασκευής με την επιλογή **imported geometry**.
6. Στην συνέχεια επιλέγουμε το **Difference 1**→ **Build Selected**.

Definitions

Τώρα θα θέσουμε τον εξωτερικό κύλινδρο του ηλεκτρολύτη ως στοιχείου απείρου μεγέθους . Κάνοντας αυτή την ενέργεια οι εξισώσεις σε αυτά τα σημεία θα περιγράφουν την κατάστασή που θα υπάρχει σε ακτίνα έως και 1000 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του κυλίνδρου .

Infinite Element Domain I

1. Στο μενού επιλογών διαλέγουμε **Definition**→ **Infinite Element Domain**.
2. Επιλέγουμε **Domain 1** μόνο.
3. Στις επιλογές **Infinite Element Domain** →**Geometry**.
4. Από την λίστα **Type** →**Cylindrical**.

Difference 1

1. Στις επιλογές **Definition** →**Difference**.
2. Εντοπίζουμε το μενού και πατάμε **Settings Difference**→ **Geometric Entity Level** .

3. Στην λίστα **Level list** βρίσκουμε την επιλογή **Boundary**.
4. Εντοπίζουμε το σημείο **Input Entities Selections to add** πατάμε **Add**.
5. Στο κουτί **Add** πατάμε **Import Selection to Add**.
6. Πατάμε **OK**.
7. Στις επιλογές του **Settings Difference** εντοπίζουμε **Input Entities Selections to add** πατάμε **Add**.
8. Στο κουτί **Add** πατάμε **Import Selection to Subtract**.
9. Πατάμε **OK**.
10. Κάνουμε δεξί κλικ στην επιλογή **Difference 1** και πατάμε **Rename** .
11. **Rename Difference** → **New Label** και πληκτρολογούμε **Anodes**.
12. Πατάμε **Ok**.

Materials

Ορίζουμε την ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη , δηλαδή του θαλασσινού νερού.

Material 1

1. Στο παράθυρο **Model Builder** κάτω από το **Component 1 (comp 1)** επιλέγουμε **Materials** κάνουμε δεξί κλικ και διαλέγουμε **Blank Material**.
2. Στις ρυθμίσεις του υλικού **Settings Material** κάνουμε κλικ στο **Material Properties**.
3. Από εκεί πατάμε **Material properties** → **Material Contents**.
4. Στην επιλογή **Electrolyte Conductivity** πληκτρολογούμε **sigma_sea**.

PRIMARY CURRENT DISTRIBUTION (CD)

Έρθε η ώρα να γίνει η εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών του προβλήματος για τις ανόδους και για την μεταλλική κατασκευή .

Electrode Surface I

1. Από το μενού επιλογών **Physics Boundaries** διαλέγουμε **Electrode Surface**.
2. Στο παράθυρο **Settings** του **Electrode Surface** πληκτρολογούμε **Electrode Surface-Anodes** στο σημείο **Label**.
3. Εντοπίζουμε το **Boundary Selection** και στο **Selection** πληκτρολογούμε **Anodes**.

Electrode Reaction I

1. Στο παράθυρο **Model Builder** επιλέγουμε **Component 1 (comp 1)** → **Primary Current Distribution (cd)** → **Electrode Surface - Anodes Electrode Reaction I**.
2. Στις ρυθμίσεις **Settings** για το **Electrode Reaction** εντοπίζουμε το **Equilibrium Potential**.
3. Στο σημείο του E_{eq} πληκτρολογούμε **Eeq_Al**.

Electrode Current Density I

1. Στις επιλογές **Physics** πατάμε **Boundaries** → **Electrolyte Current Density**.
2. Στις επιλογές **Settings** για **Electrolyte Current Density** πληκτρολογούμε **Electrolyte Current Density- Steel**.

3. Εντοπίζουμε το **Boundary Selection** και στην επιλογή **Selection** εισάγουμε την γεωμετρία της κατασκευής **uni(1)**.
4. Στο σημείο **Electrolyte Current Density** διπλά από το **i_{n,1}** πληκτρολογούμε **i_oxygen**.

MESH I

Δημιουργία Πλέγματος

1. Στο παράθυρο επιλογών **Model Builder** επιλέγουμε **Component I → Mesh I**.
2. Εντοπίζουμε τις επιλογές **Mesh Settings**.
3. Από την λίστα **Sequence Type** επιλέγουμε **Predefined → Extra Fine**.

STUDY I

Διαδικασία για τον υπολογισμό του φαινομένου .

1. Στο παράθυρο για το **Study** επιλέγουμε **Study Settings**.
2. Βρίσκουμε το κουτί **Generate default plots** και πατάμε πάνω του ώστε να γίνει τσεκ .
3. Πηγαίνουμε στις επιλογές **Home → Compute**.

Secondary Current Distribution – Time Dependent

Διαδικασία μελέτης του χρονικά μεταβαλλόμενου φαινομένου με χρήση της Θεωρίας Δευτερογενούς Πυκνότητας Ρεύματος .

NEW

1. Ανοίγουμε το πρόγραμμα
2. Πατάμε **NEW → Model Wizard**

Model Wizard

1. Στο παράθυρο **Model Wizard** , επιλέγουμε **3D**
2. Στις επιλογές **Select Physics** διαλέγουμε **Electrochemistry → Primary and Secondary Current Distribution (cd) → Secondary Current Distribution**
3. Πατάμε **Add → Study**
4. Στο μενού επιλογών **Select Study** πατάμε **Preset Studies → Time Dendent**
5. Τελειώνουμε πατώντας **Done**

Global Definitions

1. Στην συνέχεια εισάγουμε τις παραμέτρους που θα χρησιμοποιήσουμε στο πρόγραμμα
2. Στο παράθυρο **Model Builder** κάτω από την επιλογή **Global Definitions** διαλέγουμε **Parameters**
3. Στις ρυθμίσεις **Settings Parameters** βρίσκουμε το κουτί εισαγωγής **Parameters**
4. Στο κουτί εισάγουμε τα παρακάτω στοιχεία

Name	Expression	Value	Description
A_Fe	100[mV]	0.1 V	Συντελεστής κλίσης εξίσωσης Tafel, οξείδωση σιδήρου
A_O2	-100[mV]	-0.1 V	Συντελεστής κλίσης εξίσωσης Tafel, αναγωγή οξυγόνου
AnodeCap	2.8e5[A*h/m]	1.008E9 C/m	Χωρητικότητα Ανόδων ανα μονάδα μήκους
Eeq_AlZn	-1.05[V]	-1.05 V	Δυναμικό Ανιόδου
Eeq_Fe	-0.44[V]+R_const*T/(2*F_const...	-0.69282 V	Δυναμικό οξείδωσης σιδήρου
Eeq_O2	1.23[V]+R_const*T/(4*F_const)...	1.1176 V	Δυναμικό Αναγωγής οξυγόνου
i0_Fe	1e-3[A/m^2]	0.001 A/m ²	Πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής σιδήρου
i0_Fe_coated	i0_Fe*0	0 A/m ²	Πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής σιδήρου με επικάλυψη
i0_O2	1e-9[A/m^2]	1E-9 A/m ²	Πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής, αναγωγής οξυγόνου
i0_O2_coated	i0_O2*0	0 A/m ²	Πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής, αναγωγής οξυγόνου σε επικάλυψη
ilim_O2	-0.1[A/m^2]	-0.1 A/m ²	Όριο πυκνότητας ρεύματος αναγωγής οξυγόνου
R0	0.168[m]	0.168 m	Αρχική Ακτίνα Ανοδου
Rf	0.09[m]	0.09 m	Τελική Ακτίνα Ανοδου

GEOMETRY I

Η δημιουργία της γεωμετρίας περιγράφεται στην προηγούμενη διαδικασία . Η μόνη διαφορά είναι ότι στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιείται μόνο το 1/3 της γεωμετρίας της κατασκευής για εξοικονόμηση υπολογιστικής ισχύος .

1. Από την εργαλειοθήκη **Geometry toolbar** επιλέγουμε **Import Geometry** και κάνουμε εισαγωγή της γεωμετρίας που έχουμε φτιάξει
2. Πατάμε **Build All**

CYLINDER I

Φτιάχνουμε τον κύλινδρο που περιέχει τον ηλεκτρολύτη

1. Επιλέγουμε ακτίνα **Radius** :40m
2. Επιλέγουμε ύψος **Height**: 32m
3. Πατάμε **Build selected** για να δημιουργηθεί ο κύλινδρος στο γραφικό περιβάλλον του προγράμματος.

Materials

Ορίζουμε την ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη , δηλαδή του θαλασσινού νερού.

Material 1

1. Στο παράθυρο **Model Builder** κάτω από το **Component 1 (comp I)** επιλέγουμε **Materials** κάνουμε δεξί κλικ και διαλέγουμε **Blank Material**.
2. Στις ρυθμίσεις του υλικού **Settings Material** κάνουμε κλικ στο **Material Properties**.
3. Από εκεί πατάμε **Material properties** →**Material Contents**.
4. Στην επιλογή **Electrolyte Conductivity** πληκτρολογούμε 5 S/m

SECONDARY CURRENT DISTRIBUTION (SIEC)

Επιλογή Περιοχή Ηλεκτρολύτη

1. Από το μενού **Model Builder** κάτω από το **Component I (compI)** επιλέγουμε **Secondary Current Distribution (siec)**
2. Στο μενού **Settings** που θα εμφανιστεί πατάμε **Secondary Current Distribution** και εντοπίζουμε το σημείο **Domain Selection**
3. Επιλέγουμε **Domain 1**

Electrode Surface I

Επιλογή Επιφάνειας Χάλυβα

1. Κάνουμε δεξί κλικ στο **Component I(compI)→Secondary Current Distribution (siec)** και επιλέγουμε **Electrode Surface**
2. Στις επιλογές **Settings** του **Electrode Surface** πληκτρολογούμε **Electrode Surface 1- Steel** στην περιοχή του **Label**
3. Εντοπίζουμε το **Boundary** και πατάμε **Selection** στο σημείο αυτό επιλέγουμε τις επιφάνειες της υπό προστασίας κατασκευής
- 4.

Electrode Reaction I

Περιγραφή Οξειδωσης Σιδήρου

1. Από το μενού **Model Builder** κάνουμε δεξί κλικ στο **Component I(compI)→Secondary Current Distribution (siec)→Electrode Surface I-Steel** και από εκεί επιλέγουμε **Electrode Reaction I**
2. Στις ρυθμίσεις **Settings** για την **Electrode Reaction** πληκτρολογούμε **Electrode Reaction I – Steel Oxidation** στην περιοχή του **Label**
3. Εντοπίζουμε το σημείο που αναφέρεται το **Equilibrium Potential** και στο **Eeq** πληκτρολογούμε **Eeq_Fe**
4. Εντοπίζουμε το **Electrode Kinetics** και από την λίστα **Kinetics Expression Type** επιλέγουμε **Anodic Tafel Equation**
5. Στο σημείο για την επιλογή του **I_o** πληκτρολογούμε **io_Fe**
6. Στο σημείο για την επιλογή **A_a** πληκτρολογούμε **A_Fe**

Electrode Reaction 2

Περιγραφή Αναγωγής Οξυγόνου

1. Στο μενού **Model Builder** επιλέγουμε **Component I(compI)→ Secondary Current Distribution (siec)** και επιλέγουμε **Electrode Surface 1 -Steel Electrode Reaction**
2. Στις επιλογές **Settings** για το **Electrode Reaction** πληκτρολογούμε **Electrode Reaction 2 – Oxygen Reduction** στην περιοχή του **Label**
3. Εντοπίζουμε το σημείο **Equilibrium Potential** και στο **Eeq** πληκτρολογούμε **Eeq_o2**
4. Εντοπίζουμε το **Electrode Kinetics** και από την λίστα **Kinetics expression type** επιλέγουμε **Cathodic Tafel Equation**
5. Στο σημείο για **I_o** πληκτρολογούμε **io_O2**
6. Στο σημείο για **A_c** πληκτρολογούμε **A_O2**
7. Επιλέγουμε το κουτί **Limiting current density**
8. Στο σημείο **I_{lim}** πληκτρολογούμε **ilim_o2**

Sacrificial Edge Anode I

1. Στο μενού **Model Builder** επιλέγουμε **Secondary Current Distribution (siec) Edges**→ **Sacrificial Edge Anode**
2. Στις ρυθμίσεις **Settings** για το **Sacrificial Edge Anode** εντοπίζουμε το **Edge Selection**
3. Από το **Selection list** επιλέγουμε τις ανόδους που έχουμε στην κατασκευή
4. Εντοπίζουμε το **Sacrificial Anode Properties** και στο σημείο **Qo** πληκτρολογούμε **AnodeCap**
5. Στο σημείο για την αρχική ακτίνα ανόδου r_0 πληκτρολογούμε **R0**
6. Στο σημείο για την τελική ακτίνα ανόδου r_{end} πληκτρολογούμε **Rf**

Electrode Reaction I

1. Στο μενού **Model Builder** επιλέγουμε **Sacrificial Anode I** → **Electrode Reaction I**
2. Στις ρυθμίσεις **Settings** για το **Electrode Reaction Equilibrium Potential** βρίσκουμε το **E_{eq}** και πληκτρολογούμε **Eeq_AlZn**

Initial Values I

Ορίζουμε τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος έτσι ώστε να συγκλίνει πιο γρήγορα στην λύση

1. Στο μενού **Model Builder** επιλέγουμε **Component I (compI)**→**Secondary Current Distribution (siec)** →**Initial Values**
2. Στις ρυθμίσεις **Settings** του **Initial Values** εντοπίζουμε την περιοχή **Initial Values**
3. Στο σημείο **Phi** πληκτρολογούμε **-Eeq_AlZn**

MESH I

Δημιουργία Πλέγματος

1. Στο παράθυρο επιλογών **Model Builder** επιλέγουμε **Component I** → **Mesh I**.
2. Εντοπίζουμε τις επιλογές **Mesh Settings**.
3. Από την λίστα **Sequence Type** επιλέγουμε **Predefined** → **Fine**.

STUDY I

1. Στις ρυθμίσεις **Settings** του **Time Dependent** βρίσκουμε τις επιλογές **Study Settings**
2. Στον ορισμό του χρόνου **Time** επιλέγουμε ως μονάδα **Unit** τα χρόνια επιλέγοντας **a**
3. Στο εύρος χρόνου που θα πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός πληκτρολογούμε **range(0,1,20)**
4. Στο μενού **Model Builder** επιλέγουμε **Study I**
5. Βρίσκουμε στις ρυθμίσεις **Settings Study** τις επιλογές **Study Settings**
6. Επιλέγουμε **Generate default plots**
7. Και στην συνέχεια πατάμε **Home** → **Compute**

Βιβλιογραφία

1. Volkan, Cicek. *Corrosion Engineering and Cathodic Protection Handbook with extensive question and answer section*. Beverly : John Wiley & Sons Inc., 2017.
2. Heidersbach, Robert. *Metallurgy and Corrosion Control in Oil and Gas Production*. Singapore : John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2011.
3. Bardal, Einar. *Engineering Materials and Processes*. s.l. : Springer, 2003.
4. Εικόνα 1.6 ανακτήθηκε από <http://wordpress.mrreid.org> (5/2018).
5. L.L.Sheir, R.A. Jarman. *Corrosion Volume 2 : Corrosion Control*. 3rd. Boston : Butterwoth Heinmann, 1994.
6. Singh, Ramesh. *Corrosion Control for Offshore Structures : Cathodic Protection and High-Efficiency Coating*. 1st. Oxford : Elsevier, 2015.
7. Δ.Ι. Παντελής, Δ. Τσιούβρα. *Διάβρωση και Προστασία Ναυπηγικών και Μηχανολογικών Κατασκευών*. Αθηνά : ΕΜΠ, 2012.
8. Εικόνα 1.5 & 1.7 ανακτήθηκε απο <http://www.cathwell.com> (05/2018).
9. Εικόνα 1.9 ανακτήθηκε από <https://www.offshore-technology.com> (05/2018).
10. *Cathodic Corrosion Protection in the Context of Lifetime Extension of Monopile-based Offshore Wind Turbines*. Stutzmann, Jutta. s.l. : University of Stuttgart, 2017.
11. Andreas W. Momber, Muehlhan AG. *Investigating Corrosion Protection of Offshore Wind Towers*. Bremen : Fraunhofer Institute for Manufacturing, 2008.
12. *DNVGL-RP-0416: Corrosion protection for wind turbines*. s.l. : DNVGL, 2016.
13. Hywind Scotland, World's First Floating Wind Farm, Performing Better Than Expected. *Clean Technica*. ανακτήθηκε από <https://cleantechnica.com> (09/2018).
14. *The current state of offshore wind energy technology development*. Xiaojing Sun, Diangui Huang , Guoqing Wu. s.l. : Renewable Energy, 2008.
15. *Modelling of an Offshore Multi – Purpose Floating Structure Supporting a Wind Turbine Including Second – Order Wave Loads*. T.P. Mazarakos, D.N. Konispoliatis. s.l. : National Technical University of Athens, 2015.
16. *DNVGL-RP-B401: Cathodic Protection Design*. s.l. : DNV-GL, 2017.
17. DeepWater Corrosion Services Inc ανατήθηκε από <https://stoprust.com/> (09/2018).
18. *Corrosion Protection of Multiple Oil Platforms*. s.l. : Comsol Multiphysics 5.3a, 2018.
19. *Corrosion Protection of an Oil Platform Using Sacrificial Anodes*. s.l. : COMSOL Multiphysics 5.3a, 2018.
20. *Effect of mechanical loading on the galvanic corrosion behavior of a magnesium-steel structural joint*. I. Adlakha, B. Gholami Bazehhoura, N.C. Muthegowda ,K.N. Solanki. *Corrosion Science*, 2018.

21. Καραντώνης, Αντώνης. *Βασικές Αρχές Ηλεκτροχημείας*. Αθήνα : ΕΜΠ, 2014.
22. R. Winston Revie, Herbert H. Uhlig. *Corrosion and Corrosion Control :An Introduction to Corrosion Science and Engineering*. Hoboken New Jersey : A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2008.
23. *Monopile with Dissolving Sacrificial Anodes*. s.l. : COMSOL Multiphysics 5.3a, 2018.
24. Υφαντής, Δ.Κ. *Υλικά, Διάβρωση και Προστασία*. Αθήνα : s.n., 1995.
25. Holiday in Corrosion. *Corrosionpedia ανακτήθηκε από* <https://www.corrosionpedia.com>. (05/2018).
26. DNV-RP-C203: Fatigue Design of Offshore Steel Structures. 2010.
27. *The use of coatings for corrosion control on offshore oil structures*. P., Ault. Protect. Coatings Europe, 2006, Τόμ. Vol. 11.
28. *Sensitivity analysis of floating offshore wind farms*. Laura Castro-Santos, Vicente Diaz-Casas. Energy Conversion and Management, 2015.