

ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΕΣ/ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

I. Α. Αντωνόπουλος*, Α. Καραντώνης

Εργαστήριο Φυσικοχημείας και Εφαρμοσμένης Ηλεκτροχημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών,
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα
(*antonog@central.ntua.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μελέτη εξετάζονται οι ηλεκτροχημικές επιδράσεις από τη σύντομη ή μακροχρόνια διοχέτευση συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης στο περιβάλλον (έδαφος ή νερό). Συγκεκριμένα, εξετάζεται η αλλοίωση του φυσικού περιβάλλοντος από την ανάπτυξη πεδίου υψηλής έντασης και την έκλυση αερίων, καθώς και η διάβρωση υπόγειων ή υποθαλάσσιων μεταλλικών κατασκευών. Οι εξισώσεις που διέπουν το φυσικό πρόβλημα επιλύονται αξιοποιώντας υπολογιστικές μεθόδους, συγκεκριμένα τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Αρχικά ελέγχεται η επίδραση των χωρητικών χαρακτηριστικών της διεπιφάνειας μεταξύ του αγωγού και του περιβάλλοντός του στις ηλεκτροχημικές δράσεις, κατά τη σύντομη διαρροή του συστήματος από ρεύμα. Με τον τρόπο αυτό διαπιστώνεται αν η περίπτωση αυτή διαφέρει από εκείνη της μακροχρόνιας διαρροής του. Στη συνέχεια αναλύεται η περίπτωση μιας μεταλλικής κατασκευής προστατευμένης με οργανική επίστρωση που βρίσκεται κοντά στο ηλεκτρόδιο, ενώ περιγράφονται συνοπτικά οι περιπτώσεις κατασκευών που είναι ακάλυπτες ή προστατεύονται από συστήματα καθοδικής προστασίας. Αναλύεται τόσο ο ρυθμός διάλυσης του μετάλλου, δηλαδή διάβρωσης της μεταλλικής κατασκευής, όσο και ο ρυθμός ηλεκτρόλυσης του νερού, από τον οποίο είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η μεταβολή του pH του περιβάλλοντος και η έκλυση αερίων προϊόντων σε αυτό.

Από τη μελέτη διαπιστώνεται ότι για ρεαλιστικές τιμές των χαρακτηριστικών της διεπιφάνειας μεταξύ αγωγού και περιβάλλοντος δεν παρατηρείται ουσιαστική χωρητική επίδραση. Επιπλέον, προκύπτουν η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο περιβάλλον, οι επαγόμενες υπερτάσεις στις διεπιφάνειες και οι πυκνότητες ρεύματος των διάφορων δράσεων. Από αυτές εξάγονται άμεσα και οι ρυθμοί διάβρωσης της μεταλλικής κατασκευής, έκλυσης αερίων προϊόντων και τοπικής μεταβολής του pH.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σώμα μέσω του οποίου πραγματοποιείται η διοχέτευση του συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης στο περιβάλλον αναμένεται να συμπεριφέρεται ως ένα συμβατικό ηλεκτρόδιο συνεχούς ρεύματος. Το έδαφος ή το νερό που το περιβάλλει, μαζί με τους ηλεκτρολύτες και το αέριο οξυγόνο που είναι διαλυμένα σε αυτό, παίζουν το ρόλο του ηλεκτρολυτικού μέσου. Η μοντελοποίηση αυτού του συστήματος γίνεται θεωρώντας δευτεροταγή κατανομή ρεύματος, σύμφωνα με την οποία:

- Το ηλεκτρολυτικό μέσο έχει σταθερή αγωγιμότητα, ίδια σε κάθε σημείο του χώρου.
- Στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου συμβαίνουν ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, οι οποίες είναι είτε ημιαντιστρεπτές, είτε αναντίστρεπτες.
- Η διεπιφάνεια ηλεκτροδίου/ηλεκτρολυτικού μέσου έχει δομή ιδανικού πυκνωτή.

Λόγω της πρώτης συνθήκης, η διάχυση των χημικών ειδών στο μέσο μπορεί να αγνοηθεί, οπότε η κίνηση των ιόντων σε αυτό πραγματοποιείται αποκλειστικά μέσω ηλεκτρομεταφοράς. Συνεπώς, στο ηλεκτρολυτικό μέσο ισχύει ο νόμος του Ohm^[1],

$$\mathbf{i}(\mathbf{x}, t) = -\sigma \nabla \Phi(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

όπου \mathbf{i} το διάνυσμα της πυκνότητας ρεύματος στο σημείο του χώρου με διάνυσμα θέσης \mathbf{x} τη χρονική στιγμή t , Φ το ηλεκτρικό δυναμικό στο ίδιο σημείο και σ η αγωγιμότητα του μέσου.

Εξαιτίας κάθε μίας από τις αντιδράσεις που συμβαίνουν, σύμφωνα με τη δεύτερη συνθήκη το ηλεκτρόδιο στη θέση x_s θα διαρρέεται, λόγω υπέρτασης η_k , από ρεύμα πυκνότητας i_k ,

$$i_k(x_s, t) = i_k^0 \left(10^{\frac{\eta_k(x_s, t)}{\beta_{a,k}}} - 10^{\frac{\eta_k(x_s, t)}{\beta_{c,k}}} \right) \quad (2)$$

όπου i_k^0 η πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής και $\beta_{a,k}$, $\beta_{c,k}$ ο ανοδικός και ο καθοδικός συντελεστής Tafel της αντίδρασης k , αντίστοιχα. Η υπέρταση με τη σειρά της δίνεται από τη σχέση

$$\eta_k(x_s, t) = E(x_s, t) - E_{eq,k} = \Phi_m(t) - \Phi(x_s, t) - E_{eq,k} \quad (3)$$

όπου $\Phi(x_s, t)$ το δυναμικό του ηλεκτρολυτικού μέσου σε ένα σημείο x_s στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, $\Phi_m(t)$ το δυναμικό του μετάλλου και $E_{eq,k}$ το δυναμικό ισορροπίας της αντίδρασης. Εφόσον η υπέρταση στην επιφάνεια της γείωσης είναι χρονικά μεταβαλλόμενη και η διεπιφάνεια ηλεκτροδίου/ηλεκτρολυτικού μέσου έχει δομή ιδανικού πυκνωτή, σύμφωνα με την τρίτη συνθήκη, αυτή θα διαρρέεται και από χωρητικό ρεύμα πυκνότητας i_c ,

$$i_c(x_s, t) = C_{dl} \frac{\partial \Delta \Phi_{dl}}{\partial t} \quad (4)$$

όπου $\Delta \Phi_{dl} = \Phi_m(t) - \Phi(x_s, t)$.

Στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου θα ισχύει η εξής συνθήκη:

$$\mathbf{i}(x_s, t) \cdot \mathbf{n} = i_c(x_s, t) + \sum_{k=1}^n i_k(x_s, t) \quad (5)$$

όπου \mathbf{n} το διάνυσμα που είναι κάθετο στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου με φορά προς το ηλεκτρολυτικό μέσο.

Σε μεγάλη απόσταση από το ηλεκτρόδιο, σε τυχαία θέση $x_L \rightarrow \infty$, το δυναμικό του ηλεκτρολυτικού μέσου θεωρείται μηδέν,

$$\Phi(x_L, t) = 0 \quad (6)$$

ενώ η διεπιφάνεια του ηλεκτρολυτικού μέσου με τον αέρα, σε τυχαία θέση x_g , θεωρείται μονωτής,

$$\mathbf{i}(x_g, t) \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (7)$$

Όσον αφορά μια μεταλλική κατασκευή, στην οποία εξετάζεται η επίδραση του συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης που διοχετεύεται στο περιβάλλον μέσω του ηλεκτροδίου, μπορεί να υποτεθεί ότι σε αυτήν συμβαίνουν οι εξής δύο αντιδράσεις: η οξειδωση του μετάλλου προς τα ιόντα του (ηλεκτροδιάλυση) και η αναγωγή του νερού προς αέριο υδρογόνο. Για τις αντιδράσεις αυτές υποθέτουμε κινητική τύπου Tafel,

$$i_1(x_p) = i_1^0 10^{\frac{\eta_1(x_p)}{\beta_1}} \quad (8)$$

$$i_2(x_p) = -i_2^0 10^{-\frac{\eta_2(x_p)}{\beta_2}} \quad (9)$$

όπου οι υπερτάσεις δίνονται από τις σχέσεις

$$\eta_1(x_p) = \Phi_p(x_p) - \Phi(x_p) - E_{eq,1} \quad (10)$$

$$\eta_2(x_p) = \Phi_p(x_p) - \Phi(x_p) - E_{eq,2} \quad (11)$$

Στην περίπτωση όπου η μεταλλική κατασκευή είναι προστατευμένη από κάποια οργανική επίστρωση, οι σχέσεις που δίνουν τις υπερτάσεις είναι, αντί των (10) και (11), οι

$$\eta_1(x_p) = \Phi_p(x_p) - \Delta \Phi_{film} - \Phi(x_p) - E_{eq,1} \quad (12)$$

$$\eta_2(x_p) = \Phi_p(x_p) - \Delta \Phi_{film} - \Phi(x_p) - E_{eq,2} \quad (13)$$

όπου η πτώση τάσης στην επίστρωση δίνεται από τη σχέση

$$\Delta \Phi_{film} = R_{film} \sum_{k=1}^2 i_k(x_p) \quad (14)$$

όπου R_{film} η αντίσταση της επίστρωσης σε μονάδες αντίστασης επί επιφάνεια.

Στη διεπιφάνεια μεταξύ μετάλλου και περιβάλλοντος ισχύει η οριακή συνθήκη

$$\mathbf{i}(x_p) \cdot \mathbf{n} = -\mathbf{i}_p(x_p) \cdot \mathbf{n} = \sum_k i_k(x_p) \quad (15)$$

Το εσωτερικό των μετάλλων έχει ειδική αγωγιμότητα $\sigma_M \gg \sigma$.

Για να εξεταστεί αν η περίπτωση της σύντομης διαρροής του ηλεκτροδίου από ρεύμα διαφέρει από εκείνη της μακροχρόνιας διαρροής του, η πρώτη εκ των δύο εξετάζεται θεωρώντας ότι το σύστημα διαρρέεται από έναν παλμό ρεύματος. Στην περίπτωση αυτή για το ρεύμα ισχύει ότι

$$I(t) = \begin{cases} 0, & \text{αν } 0 \leq t \leq t_{on} \\ I_{max}, & \text{αν } t_{on} \leq t \leq t_{off} \\ 0, & \text{αν } t_{off} \leq t \end{cases} \quad (16)$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί και στην εξής μορφή,

$$I(t) = I_{\max} H(t - t_{\text{on}}) H(t_{\text{off}} - t) \quad (17)$$

όπου $H(t)$ η συνάρτηση Heaviside. Η διάρκεια του παλμού είναι προφανώς $\Delta t = t_{\text{off}} - t_{\text{on}}$.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Καταρχάς εξετάζεται αν υπάρχει διαφορά μεταξύ της σύντομης και της μακροχρόνιας διαρροής του συστήματος από ρεύμα. Ο έλεγχος πραγματοποιείται για ηλεκτρόδιο ακτίνας 4.775 m και ύψους 0.04 m, το οποίο διαρρέεται από παλμό ρεύματος έντασης 12 kA και διάρκειας $\Delta t = 0.2$ s μεταξύ $t_{\text{on}} = 0.1$ s και $t_{\text{off}} = 0.3$, για δύο ενδεικτικές τιμές πυκνότητας ρεύματος ανταλλαγής, i_1^0 . Η χωρητικότητα της διεπιφάνειας τίθεται ίση με $100 \mu\text{F}/\text{cm}^2$, μια τιμή που θεωρείται τυπική για ηλεκτρόδιο που βρίσκεται σε επαφή με νερό.

Στο Σχ. 1 παρουσιάζεται η εξέλιξη της υπέρτασης του ηλεκτροδίου στο χρόνο. Παρατηρείται ότι η υπέρταση ακολουθεί ακαριαία τον παλμό ρεύματος κατά το χρόνο t_{on} , λαμβάνοντας αμέσως την μέγιστη τιμή της, η οποία είναι περίπου 0.3 V για μια γρήγορη αντίδραση και περίπου 0.37 V για μία συγκριτικά αργή. Μετά την αναίρεση του παλμού τη χρονική στιγμή t_{off} η υπέρταση μειώνεται εκθετικά και λαμβάνει μηδενική τιμή μετά από σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα, αφού πρώτα πέσει άμεσα στο 33% της μέγιστης τιμής της. Η χαλάρωση της υπέρτασης είναι πιο αργή στην περίπτωση της βραδύτερης αντίδρασης και πιο γρήγορη στην περίπτωση της ταχύτερης.

Στο Σχ. 2 παρουσιάζονται αντίστοιχα η εξέλιξη της φαρανταϊκής και της χωρητικής πυκνότητας ρεύματος στο χρόνο. Η χωρητική απόκριση αντιστοιχεί σε ένα παλμό θετικού ρεύματος κατά το χρόνο t_{on} και ένα παλμό αρνητικού ρεύματος κατά το χρόνο t_{off} . Αυτό ισχύει για την περίπτωση που ο εφαρμοζόμενος παλμός είναι θετικός, ενώ ο αντίθετος συνδυασμός προκύπτει για αρνητικό εφαρμοζόμενο παλμό. Η φαρανταϊκή απόκριση ακολουθεί τον ασκούμενο παλμό ρεύματος και λαμβάνει την τιμή $1 \text{ A}/\text{cm}^2$ στη μόνιμη κατάσταση. Η συμπεριφορά αυτή δεν εξαρτάται με εμφανή τρόπο από την πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής.

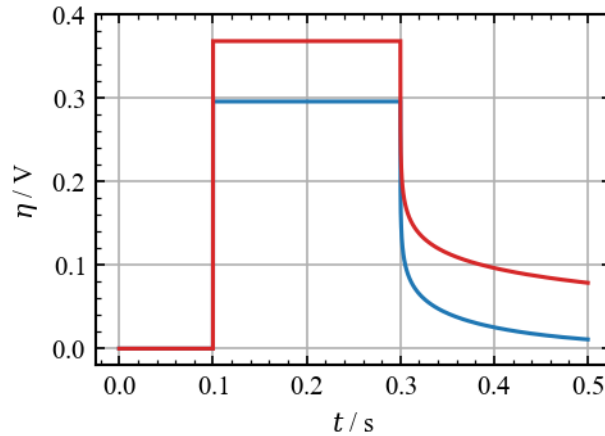
Τα τμήματα των καμπυλών του Σχ. 2 που αφορούν σε χρόνους κοντά στο t_{on} και t_{off} παρουσιάζονται στο Σχ. 3. Παρατηρείται ότι κατά την επιβολή του παλμού το χωρητικό ρεύμα λαμβάνει άμεσα τη μέγιστη τιμή του και στη συνέχεια βαίνει μειούμενο, σε αντίθεση με το φαρανταϊκό που αυξάνεται σταδιακά και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του όταν το χωρητικό έχει πλέον μηδενιστεί. Όλη αυτή η διαδικασία ολοκληρώνεται σε περίπου 40 μs , δηλαδή σε χρόνο αμελητέο μπροστά στην διάρκεια του παλμού (0.2 s). Η συμπεριφορά αυτή είναι ίδια ανεξαρτήτως της τιμής της πυκνότητας ρεύματος ανταλλαγής. Κατά την αναίρεση του παλμού, το φαρανταϊκό ρεύμα τείνει γρήγορα στο μηδέν, ενώ το χωρητικό λαμβάνει μια μεγάλη αρνητική τιμή πριν μειωθεί κι αυτό αντίστοιχα με το φαρανταϊκό.

Από όλα τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι το ρεύμα του ηλεκτροδίου βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση πρακτικά από τη στιγμή επιβολής του παλμού, ενώ μηδενίζεται αμέσως όταν αυτός ανααιρεθεί. Συνεπώς, η επίδραση των χωρητικών χαρακτηριστικών της διεπιφάνειας είναι αμελητέα και μπορεί να θεωρηθεί ότι ακόμα και στη σύντομη διαρροή από ρεύμα το ηλεκτρόδιο συμπεριφέρεται σαν να βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση.

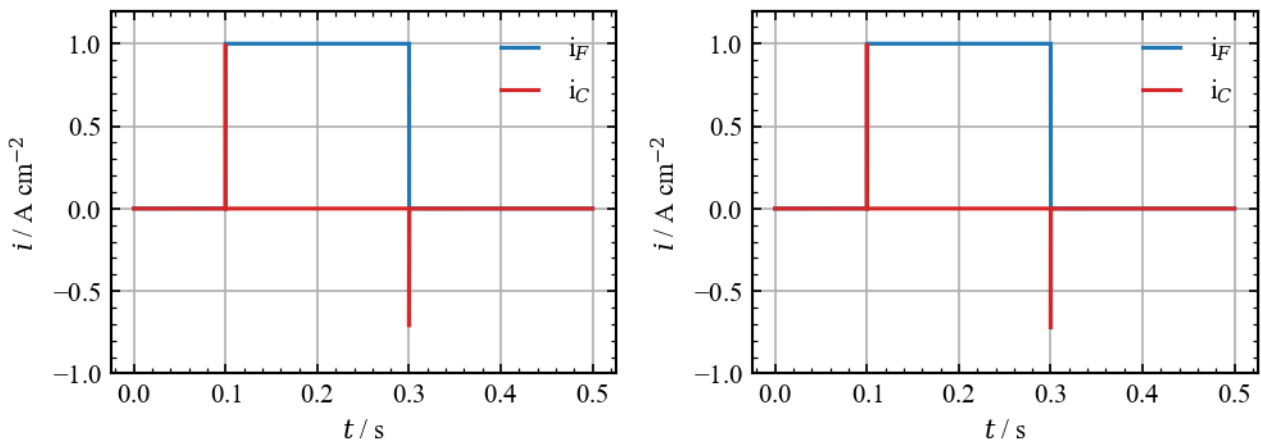
Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση επί κοντινών μεταλλικών κατασκευών, με το παράδειγμα που παρουσιάζεται να είναι ένας μεταλλικός σωλήνας προστατευμένος με οργανική επίστρωση, ο οποίος περνά από το έδαφος κοντά στο ηλεκτρόδιο. Οι περιπτώσεις του ακάλυπτου σωλήνα και του προστατευμένου με καθοδική προστασία παραλείπονται για οικονομία χώρου, τα αντίστοιχα αποτελέσματα όμως αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω.

Οι καμπύλες που παρουσιάζονται αντιστοιχούν στις εξής τιμές παραμέτρων: πυκνότητα ρεύματος στο ηλεκτρόδιο: $-10616 \text{ A}/\text{m}^2$ (κάθοδος), αγωγιμότητα εδάφους: $0.01 \text{ S}/\text{m}$, αγωγιμότητα μετάλλων: $10^7 \text{ S}/\text{m}$, πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής στο ηλεκτρόδιο: $10^{-4} \text{ mA}/\text{cm}^2$, ανοδικός συντελεστής Tafel ηλεκτροδίου: 118 mV, καθοδικός συντελεστής Tafel ηλεκτροδίου: -118 mV, δυναμικό ισορροπίας στο ηλεκτρόδιο: -0.2 V. Για την οξείδωση και την αναγωγή στο μεταλλικό σωλήνα οι

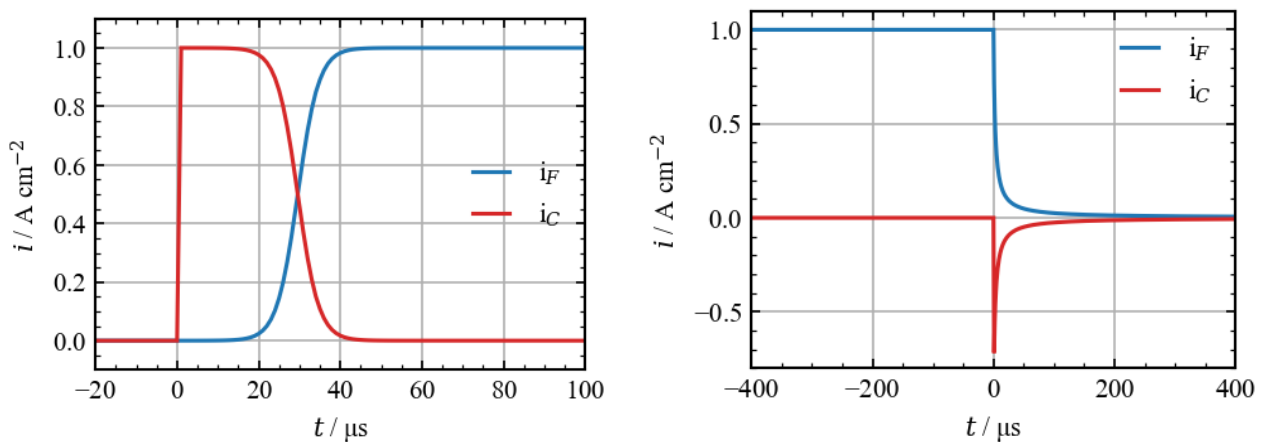
αντίστοιχες τιμές είναι οι εξής: $i_0^1 = 10^{-3} \text{ mA/cm}^2$, $i_0^2 = 10^{-4} \text{ mA/cm}^2$, $\beta_1 = 80 \text{ mV}$, $\beta_2 = -118 \text{ mV}$, $E_{\text{eq},1} = -0.5 \text{ V}$, $E_{\text{eq},2} = -0.3 \text{ V}$.



Σχήμα 1. Εξέλιξη της υπέρτασης του ηλεκτροδίου, η , στο χρόνο κατά την επιβολή παλμού μικρής διάρκειας, για δύο ενδεικτικές τιμές πυκνότητας ρεύματος ανταλλαγής i_1^0 . Μπλε καμπύλη: $i_1^0 = 10^{-5} \text{ A/cm}^2$, κόκκινη καμπύλη: $i_1^0 = 6 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$.



Σχήμα 2. Εξέλιξη της φαρανταϊκής και της χωρητικής πυκνότητας ρεύματος του ηλεκτροδίου, i_F και i_C αντίστοιχα, στο χρόνο κατά την επιβολή παλμού μικρής διάρκειας, για δύο ενδεικτικές τιμές πυκνότητας ρεύματος ανταλλαγής i_1^0 . Αριστερά: $i_1^0 = 10^{-5} \text{ A/cm}^2$, δεξιά: $i_1^0 = 6 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$.



Σχήμα 3. Εξέλιξη της φαρανταϊκής και της χωρητικής πυκνότητας ρεύματος του ηλεκτροδίου, i_F και i_C αντίστοιχα, κοντά στο χρόνο t_{on} (αριστερά) και στο χρόνο t_{off} (δεξιά), για τιμή πυκνότητας ρεύματος ανταλλαγής $i_1^0 = 10^{-5} \text{ A/cm}^2$.

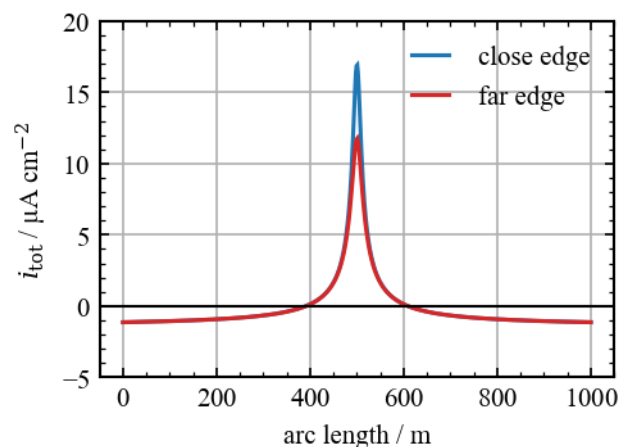
Στο Σχ. 4 παρουσιάζεται η κατανομή της ολικής πυκνότητας ρεύματος κατά μήκος του σωλήνα, τόσο για την περιοχή που βρίσκεται πλησιέστερα στο ηλεκτρόδιο, όσο και για εκείνη που βρίσκεται πιο μακριά από αυτό. Το ηλεκτρόδιο βρίσκεται σε απόσταση 10 m από το σωλήνα στη θέση $x = 500$ m. Παρατηρείται ότι ο σωλήνας διαρρέεται από θετικό ρεύμα για 100 m εκατέρωθεν του σημείου που βρίσκεται απέναντι από το ηλεκτρόδιο, άρα λειτουργεί κυρίως ως άνοδος και αναμένεται ηλεκτροδιάλυσή του με κάποιο ρυθμό. Πέρα από τα 100 m, ο σωλήνας διαρρέεται από αρνητικό ρεύμα, δηλαδή λειτουργεί κυρίως ως κάθοδος και εκεί αναμένεται αναγωγή του νερού, δηλαδή έκλυση αερίου υδρογόνου.

Στο Σχ. 5 παρουσιάζονται οι πυκνότητες ρεύματος που αντιστοιχούν στην οξειδωτική και την αναγωγική αντίδραση που μπορούν να συμβούν στο μεταλλικό σωλήνα, πλησιέστερα ή μακριά από το ηλεκτρόδιο. Παρατηρείται ότι κατά μήκος του σωλήνα συνυπάρχουν ρεύμα οξείδωσης και ρεύμα αναγωγής, ενώ όποιο εκ των δύο πλεονεκτεί σε κάθε περιοχή καθορίζει και τη φύση του συνολικού ρεύματος του προηγούμενου σχήματος. Αυτό σημαίνει πως τόσο η ηλεκτροδιάλυση του μετάλλου όσο και η έκλυση αερίου υδρογόνου πραγματοποιούνται σε όλο το μήκος του σωλήνα, απλά με διαφορετικό ρυθμό ανά περιοχή.

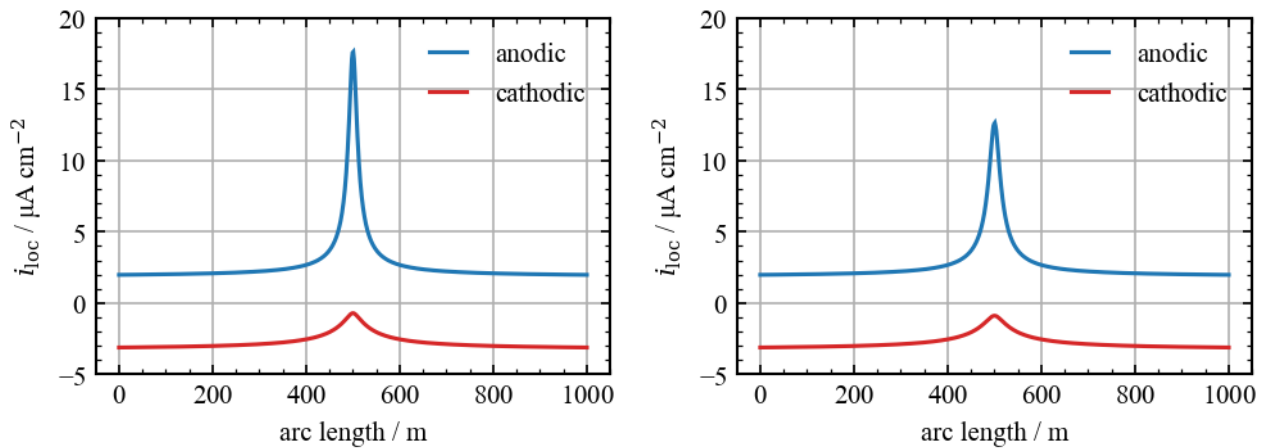
Στο Σχ. 6 παρουσιάζεται ο ρυθμός διάλυσης του μετάλλου του σωλήνα ανά παλμό διάρκειας 0.2 s, εκφρασμένος με δύο διαφορετικούς τρόπους. Συγκεκριμένα, αριστερά φαίνεται ο ρυθμός απώλειας μάζας ανά μονάδα επιφάνειας ενώ δεξιά ο ρυθμός διείδυσης. Και τα δύο μεγέθη προκύπτουν από το νόμο του Faraday για τα ανοδικά ρεύματα που αντιστοιχούν στην αντίδραση ηλεκτροδιάλυσης του μετάλλου, το οποίο για αυτές τις καμπύλες έχει θεωρηθεί ότι είναι σίδηρος. Με τον ίδιο τρόπο μπορούν να υπολογιστούν οι ποσότητες εκλυόμενων αερίων προϊόντων και η τοπική μεταβολή του pH του περιβάλλοντος.

Η πτώση τάσης στην επίστρωση, η οποία δεν παρουσιάζεται για οικονομία χώρου, φτάνει τα 170 kV στην πλευρά πλησιέστερα της γείωσης και τα 140 kV στην άλλη πλευρά ακριβώς απέναντι από το ηλεκτρόδιο, ενώ πέφτει στα -10 kV σε απόσταση 500 m από το μέσο του σωλήνα. Το μέγεθος αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη για να επιλεγεί κατάλληλο υλικό επίστρωσης.

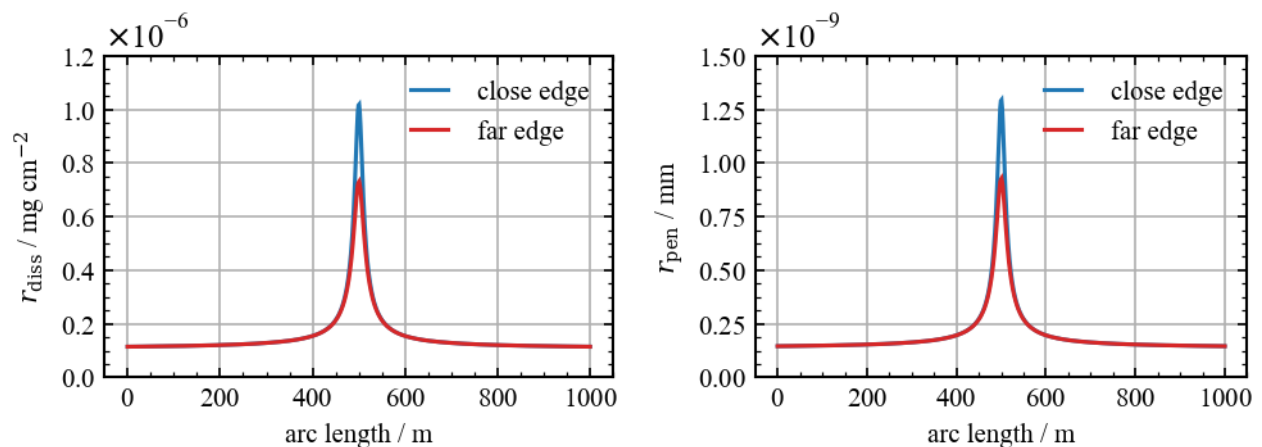
Σημειώνεται πως στην περίπτωση που το ηλεκτρόδιο λειτουργεί ως άνοδος τα αποτελέσματα είναι αντίστοιχα, αλλά οι οξειδώσεις γίνονται αναγωγές και αντίστροφα, με ότι αυτό συνεπάγεται. Αν ο μεταλλικός σωλήνας είναι ακάλυπτος ο ρυθμός διάλυσης του είναι προφανώς μεγαλύτερος κατά αρκετές τάξεις μεγέθους, γενικά όμως η περίπτωση αυτή δεν εφαρμόζεται στην πράξη. Οι υπερτάσεις που υπολογίζονται κατά μήκος του προστατευμένου σωλήνα δεν είναι σημαντικές, συγκεκριμένα είναι κάτω των 200 mV και δεν αναμένεται να επηρεάζουν τη λειτουργία ενός συστήματος καθοδικής προστασίας που ενδεχομένως να συνδυάζεται με την οργανική επίστρωση.



Σχήμα 4. Ολική πυκνότητα ρεύματος κατά μήκος του σωλήνα, για ηλεκτρόδιο που λειτουργεί ως κάθοδος και βρίσκεται στη θέση $x = 500$ m σε απόσταση περίπου 10 m από το σωλήνα.



Σχήμα 5. Πυκνότητες ρεύματος των επιμέρους δράσεων κατά μήκος του σωλήνα, για ηλεκτρόδιο που λειτουργεί ως κάθοδος και βρίσκεται στη θέση $x = 500$ m σε απόσταση περίπου 10 m από το σωλήνα. Αριστερά: πλησιέστερα στο ηλεκτρόδιο, δεξιά: μακριά από το ηλεκτρόδιο.



Σχήμα 6. Ρυθμός διάλυσης του μετάλλου του σωλήνα, για ηλεκτρόδιο που λειτουργεί ως κάθοδος και βρίσκεται στη θέση $x = 500$ m σε απόσταση περίπου 10 m από το σωλήνα. Αριστερά: εκφρασμένος σε μονάδες μάζας ανά μονάδα επιφάνειας, δεξιά: εκφρασμένος ως ρυθμός διείσδυσης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ανακεφαλαιώνοντας, από την παραπάνω μελέτη προκύπτει ότι η συμπεριφορά ενός συστήματος διοχέτευσης συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης στο έδαφος ή στη θάλασσα παραμένει σε μόνιμη κατάσταση ανεξαρτήτως της διάρκειας διαρροής του ρεύματος. Όσον αφορά μια κοντινή μεταλλική κατασκευή, υπάρχουν διαφορετικές περιοχές που διαρρέονται από αρνητικό ή θετικό ρεύμα, όμως στο σύνολο της κατασκευής πραγματοποιούνται τόσο οξειδώσεις όσο και αναγωγές. Από τον υπολογισμό των ανοδικών και των καθοδικών πυκνοτήτων ρεύματος προκύπτουν οι ρυθμοί των δράσεων που πραγματοποιούνται, συγκεκριμένα της ηλεκτροδιάλυσης του μετάλλου της κατασκευής και της έκλυσης αερίων προϊόντων σε κάθε σημείο της κατασκευής. Οι ρυθμοί αυτοί προφανώς είναι μεγαλύτεροι αν η κατασκευή δεν προστατεύεται από οργανική επίστρωση. Στην περίπτωση που μαζί με την οργανική επίστρωση αξιοποιείται και κάποιο σύστημα καθοδικής προστασίας, οι επαγόμενες υπερτάσεις δεν είναι αρκετά υψηλές ώστε να επηρεάσουν την ομαλή λειτουργία του. Τέλος, από τον προσδιορισμό της πτώσης τάσης στην επίστρωση μπορεί να γίνει κατάλληλη επιλογή του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί γι' αυτήν.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Zamani NG (2009). In *Modern Aspects of Electrochemistry*, 44: 1-51.