

## ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗΣ ΕΜΠΕΔΗΣΗΣ (EIS) ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΑΤΟΜΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ (AFM)

**Α. Μπαντή\***, Χ. Προχάσκα, Σ. Σωτηρόπουλος

Τμήμα Χημείας, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

(\*[ampantic@chem.auth.gr](mailto:ampantic@chem.auth.gr))

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ηλεκτροδιάλυση είναι μια ηλεκτροχημική μέθοδος διαχωρισμού των ιοντικών συστατικών του νερού με τη βοήθεια μεμβρανών και την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου. Όταν νερό με υψηλή συγκέντρωση ιόντων εκτεθεί σε ένα ηλεκτρικό πεδίο τότε παρατηρείται κίνηση των κατιόντων προς την κάθοδο και των ανιόντων προς την άνοδο. Μεταξύ των ηλεκτροδίων τοποθετούνται με παράλληλη εναλλαγή οι ειδικές μεμβράνες ηλεκτροδιάλυσης (από τις οποίες οι μισές είναι διαπερατές σε ανιόντα και οι υπόλοιπες σε κατιόντα). Οι μεμβράνες ηλεκτροδιάλυσης επιτρέπουν τη διέλευση των ιονιζόμενων ομάδων ή ορισμένου μόνο μεγέθους αυτών, υπό την επίδραση διαφοράς δυναμικού μεταξύ των διαλυμάτων που βρίσκονται σε επαφή με τις δύο πλευρές τους. Για την κατασκευή των μεμβρανών χρησιμοποιούνται συνήθως κατιονικές ή ανιονικές ρητίνες ιονανταλλαγής<sup>[1]</sup>.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η καθιέρωση κριτηρίων ελέγχου της ορθής λειτουργίας των μεμβρανών ηλεκτροδιάλυσης (ανιονικών και κατιονικών) της βιομηχανικής παραγωγής διαλυμάτων ρινικής έκπλυσης “Athomer”, τόσο σε μικροσκοπικό επίπεδο με τη βοήθεια της Μικροσκοπίας Ατομικών Δυνάμεων (Atomic Force Microscopy, AFM) όσο και μακροσκοπικά με τη Φασματοσκοπία Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS). Έτσι, μελετήθηκαν η τοπογραφία των νέου τύπου μεμβρανών ηλεκτροδιάλυσης (PCA, GmbH) συγκριτικά με τις ήδη χρησιμοποιημένες (Ralex, Mega a.s.) με τη μικροσκοπία AFM για τον καθορισμό των μορφολογικών χαρακτηριστικών τους και την εκτίμηση της επιφανειακής τραχύτητας. Επίσης, με σκοπό να επιτευχθεί χαρακτηρισμός της ιονικής αγωγιμότητας των μεμβρανών διεξήχθησαν μετρήσεις EIS εκτός διεργασίας (*ex situ*) σε κατάλληλη μικροκυψέλη. Παρατηρήθηκε ότι οι νέου τύπου μεμβράνες PCA στην πλήρη ενυδατωμένη κατάστασή τους έχουν τις ίδιες περίπου τιμές αντίστασης (ανιονική 2.74 Ω cm<sup>2</sup>, κατιονική 2.5 Ω cm<sup>2</sup>) με τις ονομαστικές τιμές της εταιρείας (ανιονική 2.5 Ω cm<sup>2</sup>, κατιονική 3.0 Ω cm<sup>2</sup>). Όσον αφορά τις μεμβράνες της Ralex που είχαν χρησιμοποιηθεί στη γραμμή παραγωγής για πάνω από ένα χρόνο βρέθηκαν τιμές αντίστασης μεγαλύτερες (ανιονική 12.57 Ω cm<sup>2</sup>, κατιονική 8.62 Ω cm<sup>2</sup>) από αυτές των ονομαστικών (ανιονική 7.5 Ω cm<sup>2</sup>, κατιονική 8.0 Ω cm<sup>2</sup>).

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλεκτροδιάλυση είναι μια τεχνική αφαλάτωσης ή/και συμπύκνωσης αλατούχων διαλυμάτων που χρησιμοποιείται είτε για τον καθαρισμό υφάλμυρου νερού ή απόνευρων είτε για παραγωγή-ανάκτηση αλάτων. Είναι εναλλακτική τεχνική της αντίστροφης ώσμωσης και της εξάτμισης, πλεονεκτώντας στο ότι είναι λιγότερο ενεργοβόρος, ρυθμίζεται εύκολα ανάλογα με το προς επεξεργασία νερό και τη σύσταση του επιθυμητού προϊόντος και (σε σχέση με την αντίστροφη ώσμωση) δεν απαιτεί συχνή αντικατάσταση μεμβρανών. Όταν νερό με υψηλή συγκέντρωση ιόντων εκτεθεί σε ένα ηλεκτρικό πεδίο, τότε παρατηρείται κίνηση των κατιόντων προς την κάθοδο και των ανιόντων προς την άνοδο. Μεταξύ των ηλεκτροδίων τοποθετούνται με παράλληλη εναλλαγή οι ειδικές μεμβράνες ηλεκτροδιάλυσης (από τις οποίες οι μισές είναι διαπερατές σε ανιόντα και οι υπόλοιπες σε κατιόντα). Σχεδόν όλες οι μεμβράνες που διατίθενται στο εμπόριο χρησιμοποιούν ως αρνητικά φορτισμένες ομάδες τις σουλφονικές. Με τον τρόπο που είναι κατασκευασμένες οι

μεμβράνες διέλευσης κατιόντων επιτρέπουν τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος υπό τη μορφή μετακίνησης μιας μάζας κατιόντων (ιοντικό ρεύμα), ενώ οι εγκατεστημένες αρνητικά φορτισμένες ομάδες απωθούν τα ομώνυμα φορτισμένα σωματίδια και τα ανιόντα. Οι μεμβράνες διέλευσης ανιόντων είναι παρόμοιες με αυτές της διέλευσης κατιόντων με τη διαφορά ότι οι πόροι στην περίπτωση αυτή φέρουν τα ηλεκτροθετικά φορτία και επομένως η ροή ηλεκτρικού ρεύματος συμβαίνει υπό τη μορφή κίνησης ανιόντων, ενώ τα ηλεκτροθετικά φορτία δεν επιτρέπουν τη διέλευση ομώνυμα φορτισμένων σωματιδίων και κατιόντων.

Στην παρούσα εργασία, με σκοπό να επιτευχθεί χαρακτηρισμός της ιονικής αγωγιμότητας χρησιμοποιηθέντων και νέου τύπου μεμβρανών ηλεκτροδιάλυσης (Ralex και PCA, αντίστοιχα) διεξήχθησαν πειράματα Φασματοσκοπίας Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης (EIS). Οι μετρήσεις της αγωγιμότητας/αντίστασης των ανιονικών και κατιονικών μεμβρανών πραγματοποιήθηκαν εκτός διεργασίας (*ex situ*) σε μια μικροκυψέλη αποτελούμενη από τη μεμβράνη, τα ηλεκτρόδια (φύλλα λευκοχρύσου, Pt) και δύο παραλληλεπίπεδα πλακάκια από τεφλόν. Οι μετρήσεις EIS διεξήχθησαν σε σύστημα δύο ηλεκτροδίων (2 probe set up) σε πλήρως ενυδατωμένες μεμβράνες. Τέλος, μελετήθηκε η τοπογραφία των μικροπορωδών μεμβρανών με AFM προκειμένου να γίνει εκτίμηση της τραχύτητας των χρησιμοποιούμενων και νέου τύπου μεμβρανών.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### **Μεμβράνες ηλεκτροδιάλυσης**

Χρησιμοποιήθηκαν δύο ετερογενείς ενισχυμένες ανιονικές ανταλλακτικές μεμβράνες (AEMs) και δύο ετερογενείς ενισχυμένες κατιονικές ανταλλακτικές μεμβράνες (CEMs) της Εταιρείας Mega a.s. και PCA. Οι μεμβράνες εμβαπτίσθηκαν, πριν μετρηθούν, σε διάλυμα 0.5 M NaCl για 24 h προκειμένου να απομακρυνθούν υπολείμματα ιχνών και/ή χημικοί παράγοντες και να αποκατασταθεί η ιονική αγωγιμότητά τους στις συγκεκριμένες συνθήκες. Μετά από αυτή τη διαδικασία η κάθε μελετούμενη μεμβράνη χαρακτηρίστηκε ως «πλήρως ενυδατωμένη». Στη συνέχεια, ακολούθησε η συναρμολόγηση της μικροκυψέλης μέτρησης αντίστασης και των συστατικών που την απαρτίζουν με ενεργή επιφάνεια μεμβράνης 2.4 cm<sup>2</sup>. Εκατέρωθεν της μελετούμενης μεμβράνης τοποθετήθηκαν φύλλα λευκοχρύσου (Pt), τα οποία συμπιέζονταν με δύο πλακάκια (blocks) από Teflon με τη βοήθεια βιδών, εφαρμόζοντας ροπή 0.6 Nm με τη χρήση δυναμοκατσάβιδου (Norbar).

### **Χαρακτηρισμός μεμβρανών με Μικροσκοπία Ατομικών Δυνάμεων (AFM)**

Ο προσδιορισμός της τοπογραφικής απεικόνισης των μεμβρανών σε 2D και 3D πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του μικροσκοπίου Solver Pro AFM/STM της εταιρείας NT-MDT σε θερμοκρασία δωματίου (~20°C). Το μικροσκόπιο είναι τοποθετημένο σε αντικραδασμική τράπεζα. Τα δείγματα (οι μελετούμενες κάθε φορά μεμβράνες) επικολλήθηκαν με ταινία διπλής όψευς επάνω σε πολυκρυσταλλικές αντικειμενοφόρες πλάκες. Οι σαρώσεις πραγματοποιήθηκαν σε περιβάλλον αέρα (medium air). Οι εικόνες ελήφθησαν υπό συνθήκες επαφής (dynamic contact mode) με κατασκευασμένο βραχίονα πυριτίου NT-MDT (CSG10 Series) (πάχους = 0.5-1.5 μm, μήκους = 220-230 μm, πλάτους = 25-35 μm, συχνότητα συντονισμού 8-39 kHz, σταθερά ελατηρίου = 0.01-0.5 N/m, ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας <10 nm). Ο ρυθμός σάρωσης, για την καταγραφή σημείων δεδομένων 256 × 256, ήταν 0.3-0.6 Hz. Το σημείο ρύθμισης απόσβεσης ήταν 50%. Οι εικόνες υπέστησαν επεξεργασία και ο θόρυβος αποσβέστηκε με τη χρήση του NT-MDT 1.1.0.1912 λογισμικού ανάλυσης εικόνας. Οι παράμετροι ανάλυσης της επιφανειακής τραχύτητας προέκυψαν από το ίδιο λογισμικό.

### **Φασματοσκοπία Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης (EIS)**

Οι μετρήσεις της αγωγιμότητας των μεμβρανών ηλεκτροδιάλυσης (ανιονικών & κατιονικών) πραγματοποιήθηκαν εκτός διεργασίας (*ex situ*) με την τεχνική της Φασματοσκοπίας Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) σε διάταξη δύο

ηλεκτροδίων (2 probe set up) στην ενυδατωμένη κατάσταση προκειμένου να προσδιοριστούν τιμές ανοχής για τη χρήση τους. Για τη λήψη των φασμάτων ηλεκτροχημικής εμπέδησης χρησιμοποιήθηκε ο ποτενσιοστάτης/γαλβανοστάτης (PGSTAT203N, Autolab), ο οποίος είναι εξοπλισμένος με αναλυτή απόκρισης συχνότητας (FRA, Autolab). Τα φάσματα ελήφθησαν σε εύρος συχνοτήτων 100 kHz – 100 mHz σε ανοιχτό κύκλωμα με πλάτος διαταραχής δυναμικού 10mV. Τα φάσματα EIS προσομοιώθηκαν με τη βοήθεια ισοδύναμων κυκλωμάτων (equivalent circuit), χρησιμοποιώντας το λογισμικό Nova 2.1 της Metrohm Autolab. Ο υπολογισμός της αντίστασης της μεμβράνης έγινε αρχικά βάσει της τετμημένης επί την αρχή της γραμμικής προσαρμογής των διαγραμμάτων Nyquist του φάσματος σε υψηλές συχνότητες και στη συνέχεια, με μεγαλύτερη ακρίβεια, με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Η ηλεκτρική αντίσταση [Ω] πολλαπλασιάστηκε επί την ενεργή επιφάνεια [cm<sup>2</sup>] για να προκύπτει η (επιφανειακή) αντίσταση (areal resistance) [Ω cm<sup>2</sup>]. Όλα τα πειράματα έχουν επαναληφθεί από τρεις φορές.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

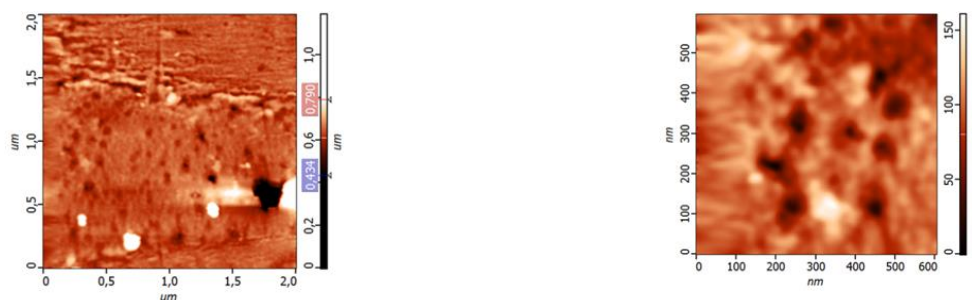
### Μικροσκοπία Ατομικών Δυνάμεων (AFM)

Μελετήθηκε η μικροδομή της επιφάνειας μεμβρανών ηλεκτροδιάλυσης στον αέρα τόσο των ανιονικών όσο και των κατιονικών τύπων της Ralex και PCA με τη βοήθεια της μικροσκοπίας ατομικών δυνάμεων. Στο **Σχήμα 1** (αριστερά) παρουσιάζεται η μικρογραφία της ανιονικής μεμβράνης PCA σε μεγάλη περιοχή σάρωσης για την αποτίμηση της τραχύτητας της επιφάνειας (Average Roughness, Sa = 33.6303 nm, Root mean square, Sq = 57.0831 nm). Στο ίδιο σχήμα (**Σχήμα 1**, δεξιά) δίνεται η μικρογραφία AFM μικρής περιοχής για την αποτίμηση των κρατήρων (διαστάσεων 10 – 100 nm).



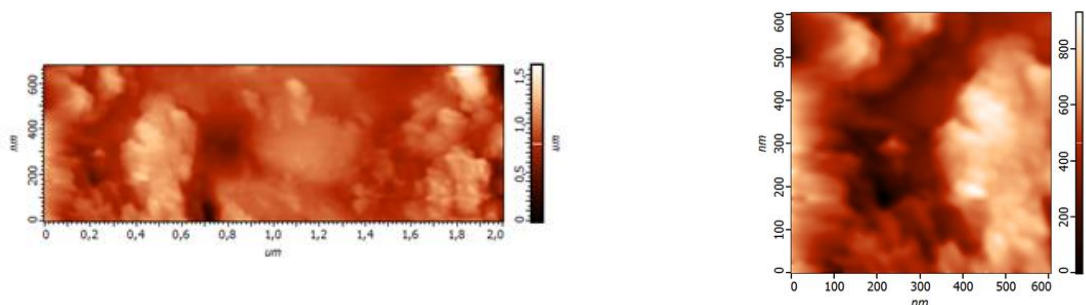
**Σχήμα 1.** Τοπογραφική απεικόνιση AFM της ανιονικής PCA μεγάλης περιοχής σάρωσης (αριστερά) και μικρής περιοχής (δεξιά).

Στο **Σχήμα 2** (αριστερά) παρουσιάζεται η τοπογραφική απεικόνιση της κατιονικής μεμβράνης PCA σε μεγάλη περιοχή σάρωσης για την αποτίμηση της τραχύτητας της επιφάνειας (Sa = 25.0529 nm, Sq = 53.7348 nm). Στο ίδιο σχήμα (**Σχήμα 2**, δεξιά) δίνεται εικόνα AFM και σε μικρότερη περιοχή, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ύπαρξη κρατήρων (διαστάσεων 10 – 100 nm).

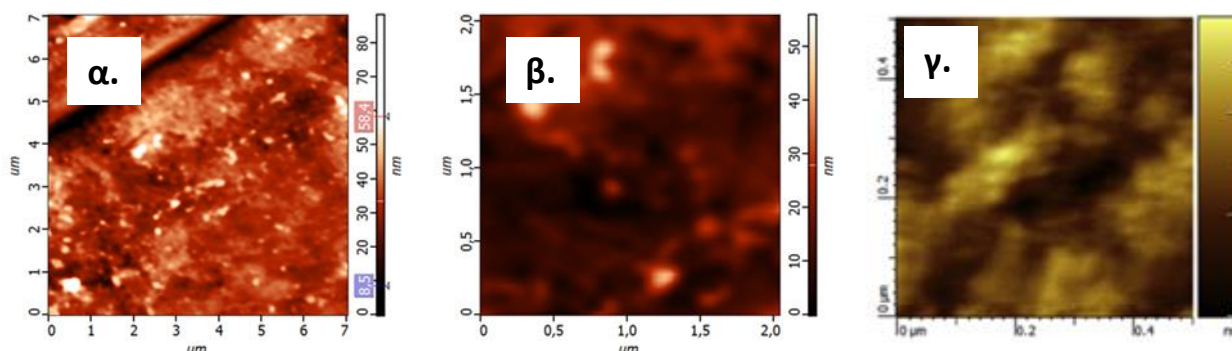


**Σχήμα 2.** Τοπογραφική απεικόνιση AFM της κατιονικής PCA μεγάλης περιοχής σάρωσης (αριστερά) και μικρής περιοχής (δεξιά).

Τέλος, μελετήθηκε και η μικροδομή της ανιονικής μεμβράνης RALEX με τη βοήθεια της AFM, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3**. Κατά την ίδια λογική ελήφθησαν μικρογραφίες σε μεγάλη περιοχή σάρωσης, όπου παρατηρείται η επιφανειακή τραχύτητα να έχει τιμή ίση με 122.51 nm ( $S_q = 158.286$  nm). Ενώ, για μικρή περιοχή οι μικρογραφίες AFM δήλωσαν την ύπαρξη κρατήρων διαστάσεων 100 - 200 nm. Στο **Σχήμα 4** δίνονται οι μικρογραφίες AFM της ομοιογενούς ιονανταλλακτικής μεμβράνης NAFION 117 (ευρέως μελετημένης μεμβράνης), οι οποίες αποτελούν πρότυπο απεικόνιση αυτής της κατηγορίας μεμβρανών και χρησιμοποιήθηκαν για σύγκριση με τις επίσης ιονανταλλακτικές μεμβράνες RALEX και PCA.



**Σχήμα 3.** Τοπογραφική απεικόνιση AFM της ανιονικής μεμβράνης RALEX μεγάλης περιοχής σάρωσης (αριστερά) και μικρής περιοχής (δεξιά).



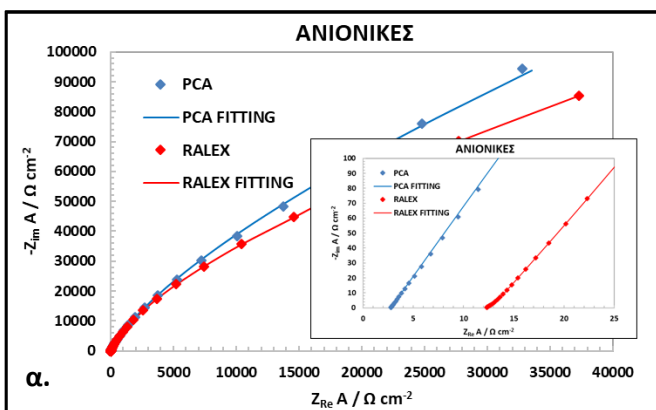
**Σχήμα 4.** Τοπογραφική απεικόνιση AFM της ιονανταλλακτικής μεμβράνης NAFION 117 α. μικρής περιοχής σάρωσης, β. μεγάλης περιοχής και γ. μικρής περιοχής (σύμφωνα με τη βιβλιογραφία)<sup>[4]</sup>.

Σύμφωνα, με τις μικρογραφίες AFM που ελήφθησαν σε διάφορες περιοχές, τόσο στην περίπτωση των ανιονικών όσο και στην περίπτωση των κατιονικών νέου τύπου μεμβρανών της PCA, μετρήθηκε σχετικά μικρή επιφανειακή τραχύτητα και καταγράφηκε η παρουσία πυκνών και επαναλαμβανόμενων κρατήρων. Αντιθέτως, στην περίπτωση των χρησιμοποιηθέντων μεμβρανών RALEX η τραχύτητα είναι αρκετά υψηλή, γεγονός που δυσκολεύει την τοπογραφική μελέτη (σε συνδυασμό και με την έντονη παρουσία στατικού ηλεκτρισμού), ενώ και η ύπαρξη κρατήρων είναι μικρότερης πυκνότητας. Τα αποτελέσματά μας για τη Nafion είναι συγκρίσιμα με αυτά της βιβλιογραφίας<sup>[4]</sup>, πιστοποιώντας την ορθή απεικονιστική ικανότητα του AFM του εργαστηρίου μας.

#### Φασματοσκοπία Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης (EIS)

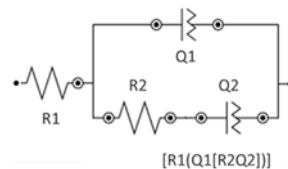
Μελετήθηκε η αντίσταση των ανιονικών μεμβρανών RALEX και PCA στην πλήρη ενυδατωμένη κατάσταση. Σύμφωνα με το **Σχήμα 5**, παρουσιάζεται η σύγκριση των δύο μελετούμενων μεμβρανών όπως προέκυψαν οι μετρήσεις μέσω του ποτενσιοστάτη/γαλβανοστάτη της Autolab Metrohm, Nova 1.11 (σημεία), καθώς και οι καμπύλες (συνεχείς γραμμές) όπως προέκυψαν με προσομοίωση των πειραματικών δεδομένων με ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα  $[R1(Q1[R2Q2])]$ <sup>[5]</sup>, όπου R1: η αντίσταση της μεμβράνης, Q1: η χωρητικότητα της διεπιφάνειας μεμβράνης/ηλεκτροδίου, R2: η αντίσταση της φαρανταϊκής δράσης υποβάθρου του ηλεκτροδίου,

Q2: η χωρητικότητα της φαρανταϊκής δράσης υποβάθρου του ηλεκτροδίου. Οι τιμές της επιφανειακής αντίστασης των ανιονικών μεμβρανών RALEX και PCA είναι 12.57 και 2.74 Ω cm<sup>2</sup>, ενώ σύμφωνα με τις εταιρείες παραγωγής τους οι ονομαστικές τιμές για νέες, αχρησιμοποίητες μεμβράνες είναι 7.5 και 2.5 Ω cm<sup>2</sup>, αντίστοιχα. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η μεμβράνη στην πλήρη ενυδατωμένη κατάστασή της και για 60 min στη μικροκυψέλη από τη στιγμή που θα μελετηθεί εξακολουθεί να έχει την ίδια τιμή αντίστασης με την αρχική (ενώ στη συνέχεια, λόγω ξήρανσης, η αντίστασή της αρχίζει να ανέρχεται). Την ίδια τάση παρουσιάζουν όλες οι επαναληπτικές μετρήσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν για επιβεβαίωση των τιμών αυτών. Όσον αφορά τα ίχνη φαρανταϊκής δράσης στα ηλεκτρόδια Pt, ακόμα και με τη μικρή υπέρταση της διαταραχής των 10 mV από το δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος (OCP), οφείλονται πιθανά σε ηλεκτρολυτικά φαινόμενα.



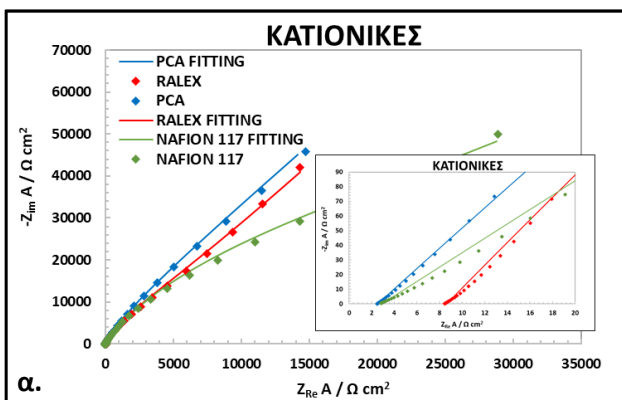
b.

Τύπος Μεμβράνης	R1 (Ω cm <sup>2</sup> )	
	LINEAR EXTRAPOL.	FITTING
PCA	2.9	2.74
RALEX	13.0	12.57



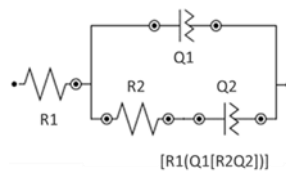
Σχήμα 5. α. Φάσμα ηλεκτροχημικής εμπέδησης (σημεία) και προσομοίωσή του μέσω ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος [R1(Q1[R2Q2])]<sup>[5]</sup> (συνεχής γραμμή) των ανιονικών μεμβρανών RALEX και PCA, b. πίνακας τιμών αντίστασης των μεμβρανών και c. το ισοδύναμο κύκλωμα<sup>[5]</sup>.

Στο Σχήμα 6, απεικονίζεται η σύγκριση των δύο μελετούμενων κατιονικών μεμβρανών (RALEX και PCA), όπως προέκυψε από τα πειραματικά δεδομένα μετρήσεων μέσω του ποτενσιοστάτη/γαλβανοστάτη και από την προσομοίωσή τους με ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα. Οι τιμές της αντίστασης της κατιονικής μεμβράνης RALEX και PCA είναι 8.62 και 2.50 Ω cm<sup>2</sup>, αντίστοιχα, ενώ σύμφωνα με τις εταιρείες παραγωγής τους οι ονομαστικές τιμές για νέες, αχρησιμοποίητες μεμβράνες είναι 8.0 και 3.0 Ω cm<sup>2</sup>, αντίστοιχα.



b.

Τύπος Μεμβράνης	R1 (Ω cm <sup>2</sup> )	
	LINEAR EXTRAPOL.	FITTING
PCA	2.5	2.50
RALEX	10.0	8.62
NAFION 117	3.0	2.88



Σχήμα 6. α. Φάσμα ηλεκτροχημικής εμπέδησης (σημεία) και προσομοίωσή του μέσω ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος [R1(Q1[R2Q2])]<sup>[5]</sup> (συνεχής γραμμή) των κατιονικών μεμβρανών RALEX, PCA και NAFION 117, b. πίνακας τιμών αντίστασης των μεμβρανών και c. το ισοδύναμο κύκλωμα<sup>[5]</sup>.

Έτσι, όσον αφορά τις νέου τύπου, αχρησιμοποίητες μεμβράνες PCA (ανιονικές, κατιονικές) παρατηρήθηκαν τιμές αντίστασης παραπλήσιες με αυτές των ονομαστικών τιμών της εταιρείας.

Αντίθετα, οι τιμές αντίστασης των χρησιμοποιημένων μεμβρανών RALEX (ανιονικών, κατιονικών) είναι διπλάσιες στην περίπτωση των ανιονικών και λίγο υψηλότερες στην περίπτωση των κατιονικών, σε σύγκριση με τις ονομαστικές τιμές της εταιρείας. Οι μεγαλύτερες τιμές πιθανά να οφείλονται σε αλλοιώσεις των μεμβρανών, ενώ οι υψηλότερες τιμές των RALEX από τις PCA που προκύπτουν από τη σύγκριση των ονομαστικών τιμών οφείλεται και στη διαφορά πάχους τους (550 και 130  $\mu\text{m}$ , αντίστοιχα) και ενδεχομένως και στον τύπο των ενισχυμένων ινών που περιέχονται στη δομή τους (ίνες πολυεστέρα και ίνες πολυπροπυλενίου, αντίστοιχα).

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, προκύπτει ότι:

- Οι νέου τύπου μεμβράνες ηλεκτροδιάλυσης PCA χαρακτηρίζονται σε μικροσκοπικό επίπεδο από μικρή επιφανειακή τραχύτητα για την ανιονική ( $S_a = 33.6303 \text{ nm}$  και  $S_q = 57.0831 \text{ nm}$ ) και κατιονική ( $S_a: 25.0529 \text{ nm}$ ,  $S_q: 53.7348 \text{ nm}$ ) τους μορφή και από την παρουσία ομοιόμορφων και πυκνών κρατήρων μεγέθους 10-100 nm.
- Οι χρησιμοποιηθείσες μεμβράνες RALEX χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές επιφανειακής τραχύτητας ( $S_a = 122.51 \text{ nm}$  και  $S_q = 158.286 \text{ nm}$ ) και από την παρουσία μεγαλύτερων κρατήρων μικρότερης πυκνότητας και διαστάσεων 100-200 nm.
- Οι μεμβράνες PCA στην πλήρη ενυδατωμένη κατάστασή τους έχουν τις ίδιες περίπου τιμές επιφανειακής αντίστασης (ανιονική  $2.74 \Omega \text{ cm}^2$ , κατιονική  $2.5 \Omega \text{ cm}^2$ ) με τις ονομαστικές τιμές της εταιρείας (ανιονική  $2.5 \Omega \text{ cm}^2$ , κατιονική  $3.0 \Omega \text{ cm}^2$ ).
- Οι μεμβράνες Ralex που είχαν χρησιμοποιηθεί στη γραμμή παραγωγής για πάνω από ένα χρόνο βρέθηκαν να έχουν τιμές επιφανειακής αντίστασης μεγαλύτερες (ανιονική  $12.57 \Omega \text{ cm}^2$ , κατιονική  $8.62 \Omega \text{ cm}^2$ ) από αυτές των ονομαστικών (ανιονική  $7.5 \Omega \text{ cm}^2$ , κατιονική  $8.0 \Omega \text{ cm}^2$ ).
- Τα παραπάνω δεδομένα εντάσσονται σε πρόγραμμα δημιουργίας μιας βάσης δεδομένων για τον χαρακτηρισμό και έλεγχο των συγκεκριμένων μεμβρανών ηλεκτροδιάλυσης.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «Βελτιστοποίηση Ηλεκτροδιάλυσης Θαλασσινού Νερού για Παρασκευή Διαλύματος Ρινικής Έκπλυσης “Athomer” - [OPTATHOMER]», και συγχρηματοδοτήθηκε από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης (ΕΤΠΑ) της Ευρωπαϊκής Ένωσης και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνεΚ 2014-2020), Δράση ΕΡΕΥΝΩ-ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ-ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ (κωδικός έργου: Τ1ΕΔΚ-00461). Οι συγγραφείς εκφράζουν θερμές ευχαριστίες προς το Εργαστήριο Φυσικής Χημείας της Σχολής Θετικών Επιστημών του ΑΠΘ για τη διεξαγωγή των μετρήσεων.



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] C. Vogel and J. Meier-Haack, *Desalination*, 342 (2014) 156–174.
- [2] E. Fontananova et al., *J. Memb. Sci.*, 459 (2014) 177–189.
- [3] Y. Xu, M. Wang, Z. Ma, and C. Gao, *Desalination*, 271 (2011) 29–33.
- [4] B. Matos et al., *Journal of Power Sources*, 293 (2015) 859-867.
- [5] F. Muler et al., *The journal of physical chemistry*, 118 (2014) 1102-1112.