

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΤΗ ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΑΠΟ ΝΑΝΟΑΝΘΡΑΚΕΣ ΚΑΙ ΑΓΩΓΙΜΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ – ΤΟ ΕΡΓΟ ΝΑΝΟΠΟΛ

Κ. Κυπαρισσίδης^{1,*}, Ο. Κοτρώτσιου¹, Β. Μπακόλα¹, Κ. Χαριτίδης², Α. Ντζιούνη², Α. Μπαλάσκας², Σ. Σούλης², Χ. Τράπαλης³, Ν. Πλακαντωνάκη³, Τ. Γιαννακοπούλου³, Ν. Τοντορόβα³, Δ. Δραγατογιάννης⁴, Δ. Νιάρχος⁵, Α. Καστανάκη⁶, Δ. Σωτηρόπουλος⁶

¹Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

²Εργαστήριο Προηγμένων και Συνθέτων Υλικών, Νανοϋλικών, Νανοδιεργασιών και Νανοτεχνολογίας Υλικών (R-NANO), Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα

³Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος» (ΕΚΕΦΕ Δ), Αθήνα, Ελλάδα

⁴ΔΕΛΤΑ Καινοτόμες Λύσεις στη Βιομηχανία τα Υλικά και τις Κατασκευές Ο.Ε., Λαύριο, Ελλάδα

⁵AMEN Technologies, Αθήνα, Ελλάδα

⁶Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού Α.Ε., Αθήνα, Ελλάδα

(*costas.kiparissides@cperi.certh.gr, Συντονιστής του Έργου)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αφαλάτωση του νερού αποτελεί μια ελκυστική επιλογή για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας που προκαλείται από την αύξηση του πληθυσμού, την κλιματική αλλαγή και τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Η εφαρμογή της προηγμένης ηλεκτροχημικής διεργασίας χωρητικού απιονισμού του νερού με χρήση κατάλληλων ηλεκτροδίων, έχει κεντρίσει πρόσφατα το ερευνητικό ενδιαφέρον λόγω της μικρής κατανάλωσης ενέργειας που απαιτείται σε σύγκριση με άλλες μεθόδους (π.χ., ηλεκτροδιαπίδωση). Το βασικό μειονέκτημα των συμβατικών συστημάτων χωρητικού απιονισμού σχετίζεται με την προσρόφηση των ιόντων στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων, η οποία προκαλεί άπωση των (συν) ιόντων οδηγώντας σε μείωση της απόδοσης. Λύση του προβλήματος, την οποία προτείνει το έργο ΝΑΝΟΠΟΛ, είναι η συνδυαστική χρήση ηλεκτροδίων με βάση τις νανοδομές άνθρακα και αγώγιμων πολυμερικών υλικών για την ανάπτυξη καινοτόμων ηλεκτροχημικών διεργασιών απιονισμού και επεξεργασίας του νερού. Με τον τρόπο αυτό η απόδοση του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί έως και 50% σε σχέση με ένα κοινό σύστημα χωρητικού απιονισμού.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο τομέας της βιομηχανίας έχει επενδύσει σημαντικά κεφάλαια για τη μείωση του κόστους της αφαλάτωσης δίνοντας έμφαση σε νέες τεχνολογίες με στόχο την ανάπτυξη καινοτόμων συστημάτων με μικρότερο επενδυτικό και λειτουργικό κόστος. Η παγκόσμια αγορά συστημάτων αφαλάτωσης νερού εκτιμάται ότι θα φθάσει τα 24 δισεκατομμύρια ευρώ μέχρι το 2025, με προβλεπόμενο Σύνθετο Ετήσιο Ρυθμό Ανάπτυξης (CAGR) 7,8%, γεγονός που δείχνει μεγάλη ζήτηση σε αστικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Συγκεκριμένα, η αφαλάτωση του θαλασσινού νερού αντιπροσωπεύει το 62,4% της αγοράς από πλευράς εισροών. Η αφαλάτωση των υφάλμυρων υδάτων αντιπροσωπεύει το 20%, ακολουθούμενη από αφαλάτωση του νερού των ποταμών στο 7,5%.

Η εφαρμογή ηλεκτροχημικών διεργασιών για τον απιονισμό του νερού με τη χρήση ηλεκτροδίων (χωρητικός απιονισμός - capacitive deionization, CDI), έχει κεντρίσει πρόσφατα το ερευνητικό ενδιαφέρον λόγω της μικρής κατανάλωσης ενέργειας που απαιτείται σε σύγκριση με άλλες μεθόδους. Ενδεικτικά, για την αφαλάτωση υφάλμυρου νερού με περιεκτικότητα ολικών διαλυμένων στερεών (total dissolved solids, TDS) 1500 - 2000 mg/l, ο χωρητικός απιονισμός απαιτεί 0,50 - 1,01 kJ/l, ενώ η ηλεκτροδιαπίδωση 5,5 - 6,5 kJ/l και η εξάτμιση 29 - 30 kJ/l νερού. Ο χωρητικός απιονισμός βασίζεται στην προσρόφηση των ιόντων στη διεπιφάνεια διαλύματος/ηλεκτροδίου με την εφαρμογή χαμηλής διαφοράς δυναμικού (συνήθως κάτω από 2 V)^[1]. Για το λόγο αυτό απαιτείται η χρήση πορωδών ηλεκτροδίων με μεγάλη αγωγιμότητα και όσο το δυνατό μεγαλύτερη

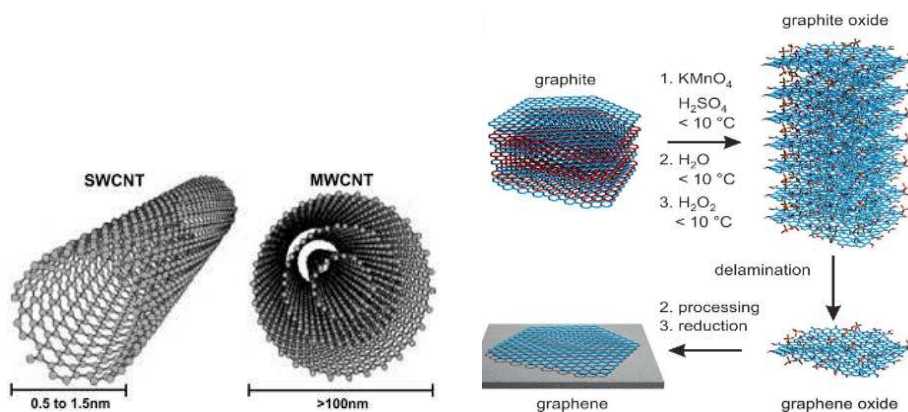
ειδική επιφάνεια. Το υλικό των ηλεκτροδίων μπορεί να έχει ως βάση τον ενεργό άνθρακα ή άλλα νανο-δομημένα υλικά (γραφένια, κτλ.). Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι πολλά υποσχόμενη καθώς είναι εξαιρετικά συμφέρουσα ενεργειακά. Ωστόσο, υπάρχουν μεγάλα περιθώρια βελτίωσης της απόδοσης για την άμεση εφαρμογή της μεθόδου σε μεγάλη κλίμακα.

ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στόχος του ερευνητικού έργου NANOΠΟΛ είναι η επιλογή των κατάλληλων νανοϋλικών με βάση τον άνθρακα και (αγωγή) πολυμερικά υλικά καθώς και η αποτελεσματική ενσωμάτωση των υβριδικών υλικών στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Η σύσταση του τελικού υλικού καθώς και οι συνθήκες κατά την ανάπτυξή του είναι βασικές παράμετροι βελτιστοποίησης ώστε να αναπτυχθούν ηλεκτρόδια με την επιθυμητή συνοχή, την κατάλληλη μορφολογία (επίπεδη ή κυλινδρική), τον ενισχυμένο υδρόφιλο χαρακτήρα (με την κατάλληλη τροποποίηση), την υψηλή αγωγιμότητα και κατά συνέπεια την υψηλή απόδοση ιοντοεναλλαγής. Προτεινόμενα υλικά είναι το γραφένιο, οι νανο-σωλήνες άνθρακα, οι νανο-ίνες άνθρακα και άλλα 2-διάστατα υλικά. Η επιλογή των αγωγίμων πολυμερικών υλικών αποτελεί εξίσου σημαντικό παράγοντα. Η πολυπυρρόλη και η πολυανιλίνη καθώς και οι νανოსύνθετες δομές αυτών με τροποποιημένα νανοϋλικά άνθρακα για ενίσχυση της συμβατότητας είναι τα προτεινόμενα πολυμερικά υλικά. Άλλα πολυμερή προτείνονται επίσης ως εναλλακτική επιλογή ενίσχυσης του ανιονικού ή κατιονικού χαρακτήρα των μεμβρανών^[2]. Για την ανακλιμάκωση της διεργασίας και την εφαρμογή της σε μεγαλύτερη κλίμακα και πραγματικές συνθήκες λειτουργίας πραγματοποιείται μελέτη προσομοίωσης ώστε να εκτιμηθεί η απόδοση του συστήματος. Αυτό συμβάλλει στη βέλτιστη επιλογή των υλικών και τον ιδανικό σχεδιασμό των τεχνικών χαρακτηριστικών (γεωμετρία, διαστάσεις, κτλ.) των ηλεκτροδίων προτού το σύστημα μεταφερθεί από την εργαστηριακή κλίμακα στη βιομηχανική.

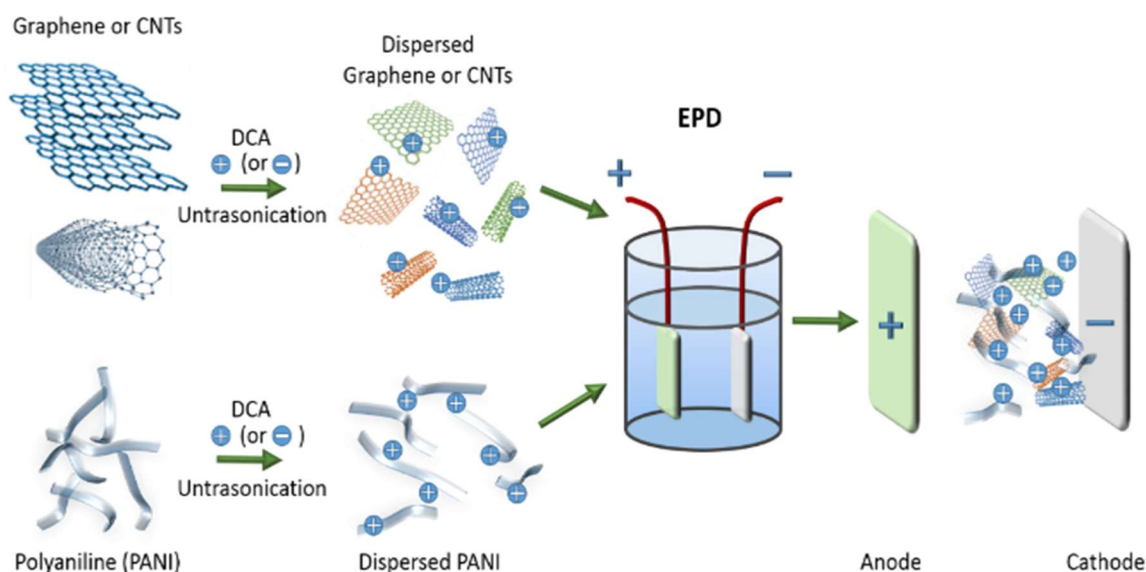
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Αρχικά, πραγματοποιείται σύνθεση και τροποποίηση κατάλληλων νανοδομών άνθρακα. Δισδιάστατα φύλλα γραφενίου (GnPs) παρασκευάζονται από απαρχιτή καθαρό γραφίτη με υγρές χημικές μεθόδους. Επίσης, συντίθενται άλλα νανοϋλικά άνθρακα, όπως συστοιχίες νανოსωλήνων άνθρακα / CNT forests, νανοϊνών άνθρακα, μέσω Χημικής Εναπόθεσης Ατμού (ΧΕΑ) ή άλλων κατάλληλων διεργασιών. Συγκεκριμένα, επιλέγονται οι συνθήκες προκειμένου να συντεθούν νανοδομές που διευκολύνουν την ιοντοεναλλαγή. Οι νανοςωλήνες (CNTs) και νανο-ίνες άνθρακα που παρασκευάζονται συγκρίνονται με αντίστοιχα εμπορικά υλικά για την εφαρμογή τους στην επεξεργασία νερού αφού πρώτα έχουν υποστεί επιφανειακή τροποποίηση.



Σχήμα 1. Νανοδομές άνθρακα

Επίσης, διερευνώνται άλλα δισδιάστατα (2D) υλικά τα οποία μπορούν να συνδυαστούν με το γραφένιο και τους νανοσωλήνες άνθρακα. Η χημική τροποποίηση (functionalization) των νανοανθράκων επιτρέπει τη μέγιστη διασπορά σε υδατικό μέσο, με παράλληλη διατήρηση της αγωγιμότητας και της μεγάλης ειδικής επιφάνειας. Επιπλέον τροποποίηση του γραφένιου και των νανοσωλήνων άνθρακα με ανιονικά ή κατιονικά οργανικά πρόσθετα που προσδένονται στους νανοάνθρακες μέσω π-π δεσμών προσδίδουν στην επιφάνεια τους αρνητικό ή θετικό φορτίο. Οι φυσικοχημικές ιδιότητες και η μορφολογία των παραγόμενων νανοδομών άνθρακα, μελετώνται με κατάλληλες μικροσκοπικές (π.χ. μικροτόμο) και φασματοσκοπικές μεθόδους (π.χ. Φασματοσκοπία Raman). Επίσης, για την ανάλυση της δομής χρησιμοποιείται η Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Διελεύσεως (TEM) και η Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD), ενώ το πορώδες των παραγόμενων υλικών προσδιορίζεται με την Ποροσιμετρία Αζώτου (BET). Η ειδική χωρητικότητα των υλικών μελετάται με κυκλική βολταμετρία και ηλεκτροχημική φασματοσκοπία εμπέδησης.

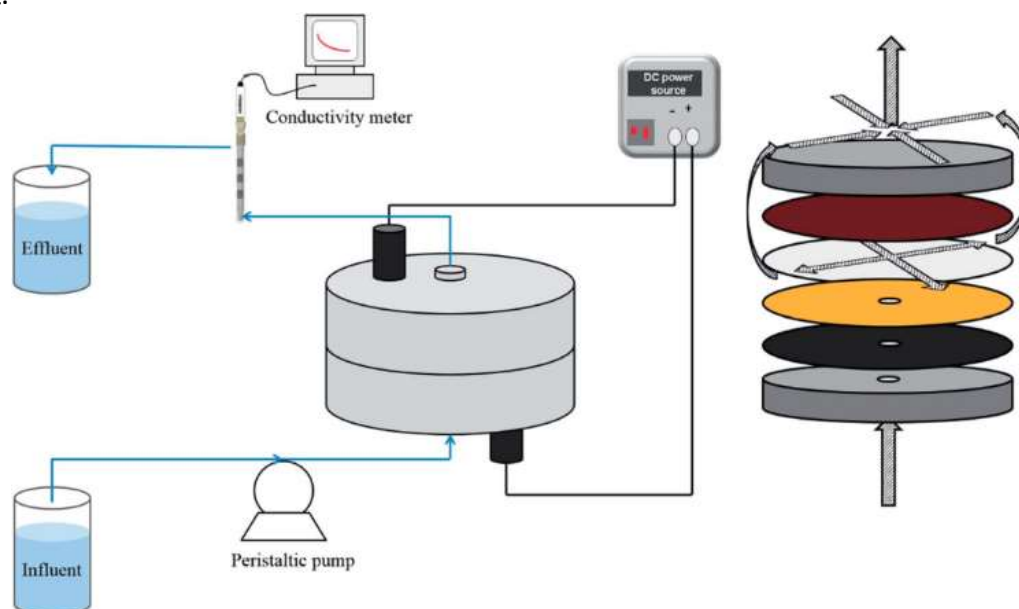


Σχήμα 2. Τροποποίηση των νανοδομών άνθρακα προς βελτίωση των ιδιοτήτων ιοντοεναλλαγής με χρήση παραγόντων διασποράς και φορτίου (dispersing and charging agents - DCA) σε συνδυασμό με διαφορετικά πολυμερή.

Σε δεύτερο στάδιο αναπτύσσονται νανοςύνθετες μεμβράνες ιοντοεναλλαγής. Τα πολυμερικά υλικά, μελετώνται για τη σύνθεση μεμβρανών ιοντοεναλλαγής χρησιμοποιώντας αρνητικά φορτισμένες ομάδες (όπως $-\text{SO}_3^-$, $-\text{COO}^-$, $-\text{PO}_2^{3-}$, $-\text{PO}_3\text{H}^-$, $-\text{C}_6\text{H}_4\text{O}^-$) ή θετικά φορτισμένες ομάδες (όπως $-\text{NH}_3^+$, $-\text{NRH}_2^+$, $-\text{NR}_2\text{H}^+$, $-\text{NR}_3^+$, $-\text{PR}_3^+$, $-\text{SR}_2^+$ κ.λπ.)^[3, 4]. Οι μεμβράνες αυτές επιτρέπουν τη διέλευση μόνο των ανιόντων ή των κατιόντων ενώ είναι αδιαπέραστες στο νερό. Στόχος της εναπόθεσης των μεμβρανών ιοντοεναλλαγής στα ηλεκτρόδια είναι να ενισχυθεί ο χωρητικός απιονισμός και να αντιμετωπιστεί το βασικό μειονέκτημα των παρόντων-συμβατικών συστημάτων που σχετίζεται με την προσρόφηση των ιόντων στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων η οποία προκαλεί άπωση των (συν) ιόντων, από ένα σημείο της διεργασίας και έπειτα, οδηγώντας σε μείωση της απόδοσης, καθώς απαιτείται μεγαλύτερη ενέργεια για να αντισταθμιστεί το φαινόμενο της άπωσης που προκαλείται από τη συγκέντρωση των ιόντων στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Τα πολυμερικά υλικά αναμιγνύονται με κατάλληλους τροποποιημένους νανοάνθρακες σε διαφορετικές αναλογίες και συνθήκες (μέσο διασποράς, θερμοκρασία, κτλ) και χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη μεμβρανών ιοντοεναλλαγής με την τεχνική της αντιστροφής φάσεων (phase inversion) της ηλεκτροεναπόθεσης, κτλ^[5,6]. Λόγω του καινοτόμου χαρακτήρα των αναπτυσσόμενων νανοςύνθετων μεμβρανών ιοντοεναλλαγής, λαμβάνεται υπόψη η ανάδραση από τη μελέτη των

λειτουργικών χαρακτηριστικών και την πρακτική εφαρμογή των μεμβρανών ιοντοεναλλαγής, προκειμένου να αξιοποιηθούν στο έπακρο οι ιδιότητες των αναπτυσσόμενων υλικών^[7].

Σε τρίτο στάδιο αναπτύσσεται η ηλεκτροχημική διεργασία επεξεργασίας νερού σε εργαστηριακή κλίμακα. Μικρές ποσότητες τροποποιημένων νανοανθράκων και αγώγιμων πολυμερών, που φέρουν αντίστοιχα θετικά ή αρνητικά φορτία για κατιονικές ή ανιονικές μεμβράνες, χρησιμοποιούνται κατά την προετοιμασία των μεμβρανών ιοντοεναλλαγής ώστε να ενισχυθεί η συμβατότητα μεμβράνης/ηλεκτροδίου. Κατάλληλα spacers τοποθετούνται ανάμεσα από τα ηλεκτρόδια για τη σταθεροποίηση του συστήματος των μεμβρανών και τη διασφάλιση της ομοιόμορφης διέλευσης του νερού ανάμεσά τους. Τροποποιημένοι με ανιονικά ή κατιονικά οργανικά πρόσθετα νανοάνθρακες (CNTs, GnP, κ.α.) και αγώγιμα πολυμερή που φέρουν επιφανειακό αρνητικό ή θετικό φορτίο σε υδατικές διασπορές, μεταφέρονται σε μεταλλικά ηλεκτρόδια με διεργασίες ηλεκτροχημικής εναπόθεσης και άλλες φυσικοχημικές μεθόδους^[8]. Κατά την ηλεκτροχημική διεργασία, στο πρώτο στάδιο, το νερό περνάει ανάμεσα από τη διάταξη και απιονίζεται καθώς τα ιόντα (άλατα, μέταλλα) έλκονται από τα αντίθετα φορτισμένα ηλεκτρόδια. Όταν τα ηλεκτρόδια κορεστούν σε συγκέντρωση αλάτων ή μετάλλων το σύστημα αναγεννάται εφαρμόζοντας αντίστροφη διαφορά δυναμικού (το (+) γίνεται (-) και το αντίστροφο). Το φρέσκο νερό που περνάει τότε από το σύστημα συμπαρασύρει τα ιόντα υπό μορφή συμπυκνώματος. Κατόπιν, αναστρέφεται εκ νέου η διαφορά δυναμικού ώστε το σύστημα να λειτουργήσει σε νέο κύκλο επεξεργασίας του νερού. Συγκεκριμένα, η επιφάνεια των ηλεκτροδίων κατάλληλη για εργαστηριακή κλίμακα προτείνεται σε διαστάσεις 10x10cm έως 25x25cm, ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία του νερού με αντίστοιχη ροή από 0.01m³/d έως 0.1m³/d (αντιστοιχεί σε 5-40ml/min περίπου). Η συγκέντρωση των ιόντων αλάτων/μετάλλων μπορεί να κυμαίνεται από 500-1500 ppm (total dissolved solids, TDS) δίνοντας τιμή αγωγιμότητας της τάξης των 1000 μS/cm. Βάσει των πειραματικών δοκιμών εργαστηριακής κλίμακας και της εφαρμογής σε κλίμακα επίδειξης τεχνολογίας, καθορίζονται οι συνθήκες βέλτιστης λειτουργίας της διεργασίας όπως είναι τα μέγιστα όρια συγκέντρωσης ιόντων, ο μέγιστος ρυθμός τροφοδοσίας, η ελάχιστη εφαρμοζόμενη τάση, κτλ.



Σχήμα 3. Διάταξη του ηλεκτροχημικού κελιού.

Σε επόμενο στάδιο πραγματοποιείται μελέτη προσομοίωσης της διεργασίας και σχεδιασμός ανακλιμάκωσης βασισμένη σε μαθηματική μοντελοποίηση, προκειμένου να διακριβωθούν οι μηχανισμοί λειτουργίας των νανοςύνθετων μεμβρανών ιοντοεναλλαγής. Για το σχεδιασμό χρησιμοποιούνται μέθοδοι σχεδιασμού CAD για τη βέλτιστη επιλογή των κατάλληλων χαρακτηριστικών του τελικού συστήματος^[9, 10, 11].

Τέλος, πραγματοποιείται ανακλιμάκωση της διεργασίας και αποτίμηση της λειτουργίας της πιλοτικής μονάδας. Σε αυτό το στάδιο γίνεται η μετάβαση της αναπτυσσόμενης μεθοδολογίας σε κλίμακα επίδειξης τεχνολογίας-πιλοτική μονάδα. Συγκεκριμένα, με βάση τα αποτελέσματα της εφαρμογής σε εργαστηριακή κλίμακα, θα σχεδιαστεί και θα κατασκευαστεί πιλοτική μονάδα με δυναμικότητα 1-10m³/d. Η διάταξη θα τροποποιηθεί κατάλληλα και η γεωμετρία των ηλεκτροδίων θα προσαρμοστεί (π.χ., από επίπεδη σε κυλινδρική) για την καλύτερη λειτουργικότητα του συστήματος. Με την ανακλιμάκωση της διεργασίας, θα γίνει αξιολόγηση των νανοϋλικών καθώς και όλης της διεργασίας. Η απόδοση του συστήματος θα μελετηθεί και θα γίνει εγκατάσταση του συστήματος σε υπάρχουσες γεωτρήσεις για την αξιολόγηση και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με υπάρχουσες τεχνολογίες. Τέλος, λόγω του ότι ο χωρητικός απιονισμός απαιτεί την εφαρμογή χαμηλής διαφοράς δυναμικού, συνήθως κάτω από 2 V, θα διερευνηθεί η χρήση της ηλιακής ενέργειας ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών της μονάδας. Συγκεκριμένα, θα μελετηθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις της μονάδας με ακρίβεια ώστε να επιλεχθεί το αντίστοιχο σύστημα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας (ενεργειακή απόδοση, δυναμικότητα, κτλ.).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Αναμένεται ότι στα πλαίσια του έργου NANOΠΟΛ, η μελέτη για την ανάπτυξη νέων και αποτελεσματικών ηλεκτροχημικών διεργασιών θα αντιμετωπίσει με επιτυχία ζητήματα που αφορούν στην εφαρμογή καλύτερων και πιο αποτελεσματικών συστημάτων επεξεργασίας του νερού με μικρότερο ενεργειακό κόστος και με τη χρήση εναλλακτικών μορφών ενέργειας (π.χ. ηλιακή), συμβάλλοντας στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης δράσης έχουν εν δυνάμει άμεση εφαρμογή στην επίλυση φλεγόντων προβλημάτων της νησιωτικής κυρίως Ελλάδος (όπου η διαθεσιμότητα και ποιότητα των πόσιμων και αρδευτικών υδάτων δεν είναι εξασφαλισμένες), ενώ ταυτόχρονα συμβάλλουν στην αντιμετώπιση του προβλήματος σε ευρωπαϊκό επίπεδο, μέσα από τη βιώσιμη διαχείριση του νερού και τη χρησιμοποίηση καινοτόμων συστημάτων αφαλάτωσης. Με αυτή την έννοια, τα αποτελέσματα του παρόντος έργου προβλέπεται να αξιοποιηθούν σε ευρωπαϊκό επίπεδο και ιδιαίτερα στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης της Μεσογείου, συμβάλλοντας τόσο σε περιβαλλοντικά θέματα όσο και σε θέματα υγείας. Η επιτυχής συνεργασία μεταξύ των εταιρών θα συμβάλει στην άμεση διάδοση των αποτελεσμάτων της έρευνας και στην ταχεία αξιοποίησή τους. Ένας από τους κεντρικούς στόχους είναι η μείωση του χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί μεταξύ της βασικής και εφαρμοσμένης έρευνας. Επίσης, αναμένεται ότι η εκπαίδευση των ερευνητών, και η άμεση διάδοση των αποτελεσμάτων της έρευνας θα συμβάλουν στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών τόσο στην Ελλάδα όσο και στην Ευρώπη.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συνδυαστική χρήση ηλεκτροδίων με βάση τις νανοδομές άνθρακα και αγώγιμων πολυμερικών υλικών μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη καινοτόμων ηλεκτροχημικών διεργασιών αφαλάτωσης και επεξεργασίας του νερού (membrane-assisted capacitive deionization, mCDI) οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση διαχωρισμού των ιόντων έως και 50% σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα της ηλεκτροδιαπίδωσης και της αντίστροφης ώσμωσης. Καθότι ο χωρητικός απιονισμός απαιτεί την εφαρμογή χαμηλής διαφοράς δυναμικού, συνήθως κάτω από 2V, το έργο NANOΠΟΛ θα διερευνήσει τη δυνατότητα ελαχιστοποίησης του λειτουργικού κόστους της διεργασίας με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως είναι η ηλιακή.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιείται στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «Ανάπτυξη Καινοτόμων Ηλεκτροχημικών Διεργασιών Επεξεργασίας Νερού με τη Συνδυαστική Χρήση Ηλεκτροδίων από

Νανοάνθρακες και Αγωγή Πολυμερή», και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνΕΚ 2014-2020), Δράση ΕΡΕΥΝΩ-ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ-ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ (κωδικός έργου: Τ1ΕΔΚ-02663).



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] M. E. Suss, S. Porada, X. Sun, P. M. Biesheuvel, J. Yoon, V. Presser. *Energy Environ. Sci.*, (2015), 8, 2296-2319
- [2] A. Hassanvand, K. Wei, S. Talebi, G. Chen, S. Kentish. *Membranes*, (2017), 7(3), 54.
- [3] Y. Liu, L. Pan, X. Xu, T. Lu, Z. Sun, D. H. Chua. *Electrochimica Acta*, (2014), 130, 619-624.
- [4] C. H. Hou, N. L. Liu, H. L. Hsu, W. Den. *Separation and Purification Technology*, (2014), 130, 7-14.
- [5] D. Hou, H. Fan, Q. Jiang, J. Wang, X. Zhang. *Separation and Purification Technology*, (2014), 135, 211-222.
- [6] C. Nie, L. Pan, Y. Liu, H. Li, T. Chen, T. Lu, Z. Sun. *Electrochimica Acta*, (2012), 66, 106-109.
- [7] S. Nejati, C. Boo, C. O. Osuji, M. Elimelech. *Journal of Membrane Science*, (2015), 492, 355-363.
- [8] T. L. Silva, S. Morales-Torres, J. L. Figueiredo, A. M. Silva. *Desalination*, (2015), 357, 233-245.
- [9] S. Porada, R. Zhao, A. Van Der Wal, V. Presser, P. M. Biesheuvel. *Progress in materials science*, (2013), 58(8), 1388-1442.
- [10] A. Hassanvand, K. Wei, S. Talebi, G. Chen, S. Kentish. *Membranes*, (2017), 7(3), 54.
- [11] P. M. Biesheuvel, R. Zhao, S. Porada, A. Van der Wal. *Journal of colloid and interface science*, (2011) 360(1), 239-248.