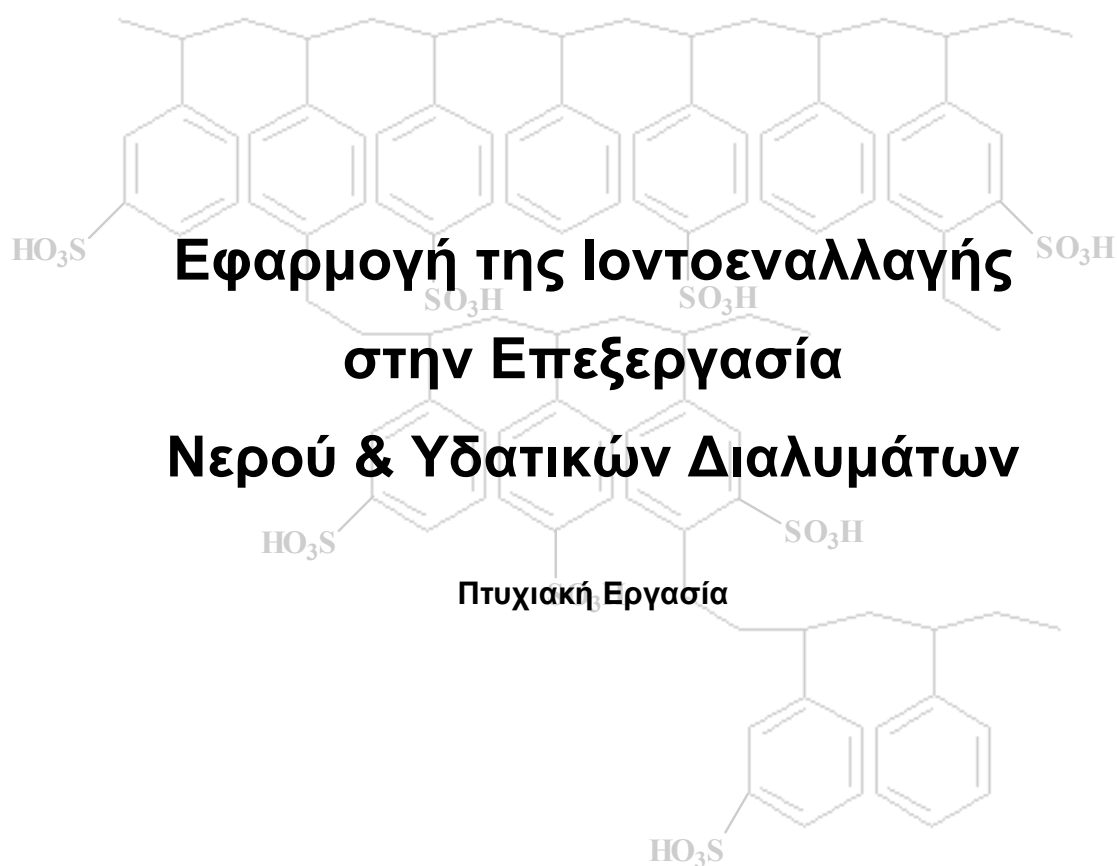




ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΚΡΗΤΗΣ



ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



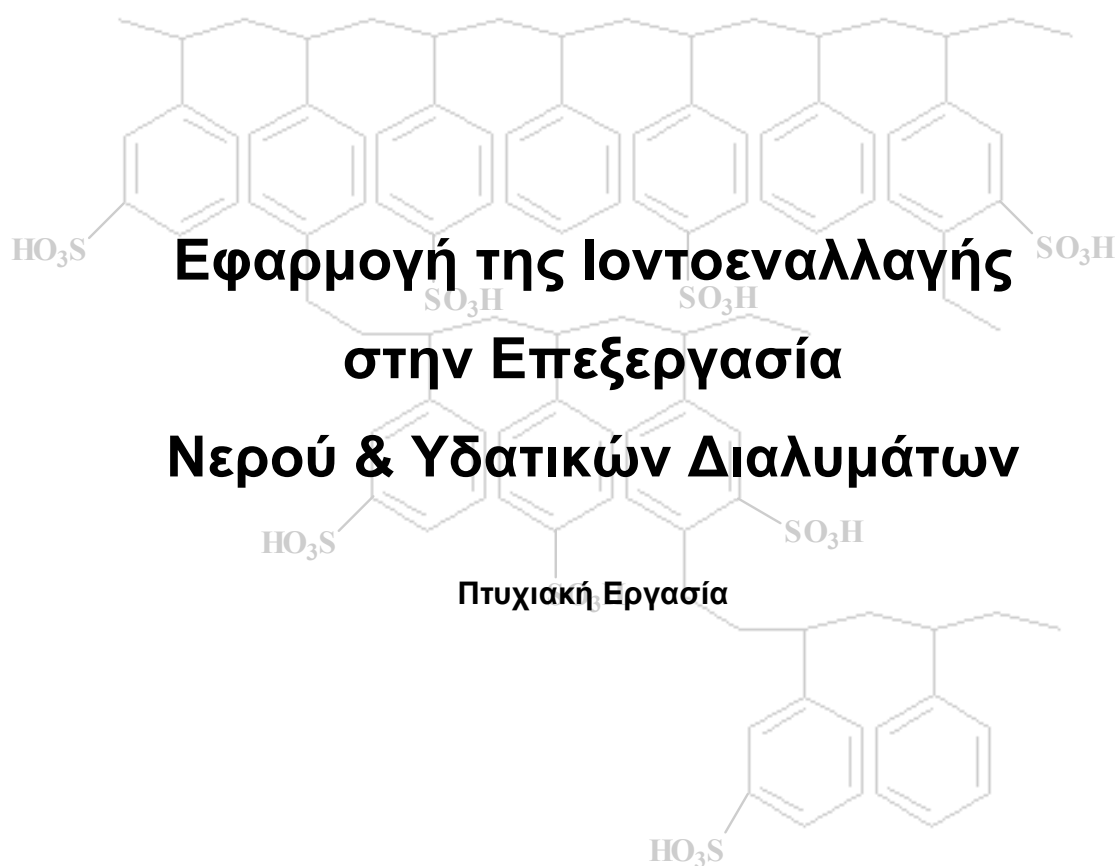
Κατσοπρινάκη Στέλλα

Χανιά, 2004



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



Κατσοπρινάκη Στέλλα

**Επιβλέπων: Δρ. Νικόλαος Μιχόπουλος
Καθηγητής Εφαρμογών**

Ευχαριστίες

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την ατέλειωτη ηθική στήριξη που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια σπουδών. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής εργασίας Δρ. Νικόλαο Μιχόπουλο, για την βοήθειά του στην συλλογή και επεξεργασία των στοιχείων καθώς και για την υποστήριξη και καθοδήγησή του. Θα ήθελα, ακόμα, να ευχαριστήσω τους Δρ. Γεώργιο Σταυρουλάκη Αναπληρωτή Καθηγητή και Δρ. Ευάγγελο Τερζή Καθηγητή Εφαρμογών, για την γενικότερη καθοδήγησή τους στην πτυχιακή μου και για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή. Τέλος, ευχαριστώ τον Δρ. Παντελή Σουπιό Επίκουρο Καθηγητή, για την βοήθειά του στην φωτογράφιση υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το πόσιμο νερό προέρχεται από επιφανειακές και υπόγειες πηγές. Η συνήθης καλή κατάσταση των υπόγειων νερών, επιτρέπει την χρήση τους ως πόσιμα, χωρίς ιδιαίτερη επεξεργασία. Αντίθετα, τα επιφανειακά νερά είναι εκτεθειμένα στο περιβάλλον με αποτέλεσμα η ποιότητά τους να είναι πιο ευάλωτη και ευμετάβλητη. Συνεπώς, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πόσιμα χωρίς επεξεργασία. Η μέθοδος και ο βαθμός επεξεργασίας εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του νερού.

Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού πρέπει να παράγουν ένα τελικό προϊόν υψηλής ποιότητας. Αρχικά, και αν είναι απαραίτητο, το ακατέργαστο νερό περνάει από μια προεπεξεργασία, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει τον εσχαρισμό, το κοσκίνισμα, την εξάμμωση, την από-ιλύωση, την απομάκρυνση ελαιωδών.

Στη συνέχεια ακολουθεί η κυρίως επεξεργασία, οι σημαντικότερες διεργασίες της οποίας είναι η κροκίδωση και η συσσωμάτωση, η καθίζηση, η διήθηση και η απολύμανση. Έτσι, το ποιοτικό επίπεδο του νερού φτάνει σε ένα τέτοιο σημείο, ώστε να χαρακτηριστεί ως πόσιμο.

Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, όπως ιδιαίτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ακατέργαστου νερού ή ιδιαίτερες χρήσεις, το νερό υπόκειται σε πιο εξειδικευμένες διεργασίες, όπως προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα, ιοντοεναλλαγή και αντίστροφη όσμωση.

Η ιοντοεναλλαγή είναι μία φυσικοχημική διεργασία κατά την οποία επιτυγχάνεται μεταφορά ιόντων από ένα αδιάλυτο στερεό σε μια υγρή φάση ή αντίστροφα. Η διεργασία αυτή εκμεταλλεύεται το πλεονέκτημα ορισμένων φυσικών ή τεχνικών αδιάλυτων υλικών των ρητινών ιοντοεναλλαγής να ανταλλάσσουν κάποιο ιόν που περιέχουν με κάποιο άλλο που περιέχεται στο νερό που περνάει διαμέσου του υλικού αυτού.

Το πειραματικό μέρος της πτυχιακής εργασίας είναι η επεξεργασία του νερού με ιοντοεναλλαγή. Οι ρητίνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η ανιονική ρητίνη Purolite A-510 και η κατιονική ρητίνη Purolite C-100H. Στόχος του πειράματος ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς των ρητινών κατά την απομάκρυνση διαφόρων ιόντων από το πόσιμο νερό και από διάφορα υδατικά διαλύματα. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν, ήταν η σκληρότητα, η αλκαλικότητα, η απομάκρυνση μετάλλων

όπως το αργίλιο, ο σίδηρος και ο ψευδάργυρος, η απομάκρυνση ιόντων χλωρίου και υπολειμματικού χλωρίου και τέλος η απομάκρυνση αμμωνιακών ιόντων.

Τα στάδια λειτουργίας της ρητίνης στην μελέτη κάθε παραμέτρου ήταν τέσσερα, αναγέννηση, πλύση, διέλευση διαλύματος και τελική πλύση. Ο όγκος της ρητίνης που χρησιμοποιήθηκε ήταν κάθε φορά ο ίδιος και ίσος με 70 cm³. Η συγκέντρωση της κάθε παραμέτρου στην είσοδο ήταν γνωστή, οπότε προσδιορίζοντας την συγκέντρωση των ιόντων στην έξοδο, υπολογίζαμε την «μάζα» των ιόντων που κατακρατούσε η ρητίνη. Σε κάποιες από τις παραμέτρους, έγινε λεπτομερής μελέτη της συμπεριφοράς των ρητινών, όπως στην περίπτωση της σκληρότητας, του σιδήρου, των χλωριόντων και των αμμωνιακών ιόντων. Στην περίπτωση αυτή γινόταν διέλευση από την ρητίνη ενός σημαντικού αριθμού δειγμάτων, για να υπολογιστεί η Λειτουργική Δυναμικότητα και η διαρροή.

Έτσι, από τα πειράματα που έγιναν βρέθηκε ότι στις περιπτώσεις της ολικής αλκαλικότητας και του ψευδαργύρου η απόδοση της κατιονικής ρητίνης για τα δείγματα που πέρασαν ήταν της τάξης του 95%. Άρα, η επεξεργασία που έγινε σε αυτές τις δύο παραμέτρους ήταν ικανοποιητική, σε αντίθεση με την περίπτωση της απομάκρυνσης ιόντων αργιλίου από υδατικό διάλυμα, όπου η απόδοση έφτασε μόλις το 47%. Στην περίπτωση της απομάκρυνσης του υπολειμματικού χλωρίου από πόσιμο νερό, η απόδοση της ανιονικής ρητίνης ήταν 33,3%, ποσοστό πολύ χαμηλό. Η απομάκρυνση όμως του υπολειμματικού χλωρίου συνηθίζεται να γίνεται με άλλες μεθόδους.

Μετά την διέλευση 25 δειγμάτων από την κατιονική ρητίνη με σκοπό την αποσκλήρυνση νερού μέσης σκληρότητας, διαπιστώσαμε ότι η συγκεκριμένη ρητίνη μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά για αρκετά μεγάλο όγκο δείγματος. Στην περίπτωση της απομάκρυνσης ιόντων σιδήρου από την κατιονική ρητίνη, δεν είχαμε το ίδιο ικανοποιητικό αποτέλεσμα, αφού δεν φαίνεται να κατακρατεί σχετικά μεγάλη ποσότητα ιόντων. Δεν διαπιστώσαμε όμως κάτι ανάλογο κατά την επεξεργασία των αμμωνιακών ιόντων. Η λειτουργία της ρητίνης στην περίπτωση αυτή ήταν αξιοσημείωτη, αφού έγινε διέλευση 20 δειγμάτων όγκου 20 L και στο 20^ο δείγμα η απόδοση της ρητίνης ήταν στο 97,9%. Τέλος διαπιστώσαμε ότι η ανιονική ρητίνη στην περίπτωση της απομάκρυνσης ιόντων χλωρίου από νερό, μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά για αρκετά μεγάλο αριθμό δειγμάτων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	4
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	5
1. ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ	6
1.1. Ανόργανα συστατικά	6
1.2. Αιωρούμενα στερεά	8
1.3. Οργανικά συστατικά	8
1.4. Ραδιοϊσότοπα	9
1.5. Αισθητικά οργανοληπτικά χαρακτηριστικά	9
1.6. Μικροοργανισμοί στο νερό	10
1.6.1. Είδη μικροοργανισμών	11
2. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ	13
2.1. Προεπεξεργασία	14
2.2. Κυρίως Επεξεργασία	18
2.2.1. Κροκίδωση - Συσσωμάτωση	18
2.2.2. Καθίζηση	21
2.2.3. Διήθηση	23
2.2.4. Απολύμανση	25
2.2.5. Απομάκρυνση οργανικών ενώσεων από το νερό με προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα	27
2.2.6. Διαχωρισμοί μεμβρανών	29
2.2.7. Ιοντοεναλλαγή	32
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	50
1. ΥΛΙΚΑ	51
1.1. Ισχυρά όξινη κατιονική ρητίνη, PUROLITE C-100H	51
1.2. Ισχυρά βασική ανιονική ρητίνη, PUROLITE A-510	53
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	55
2.1. Αποσκλήρυνση νερού	56
2.2. Απακαλίωση νερού	60
2.3. Απομάκρυνση υπολειμματικού χλωρίου από πόσιμο νερό	64
2.4. Απομάκρυνση μετάλλων από υδατικά διαλύματα	67
2.4.1. Αργίλιο	67
2.4.2. Σίδηρος (II)	71
2.4.3. Ψευδάργυρος	75
2.4. Απομάκρυνση ιόντων Cl ⁻ από υδατικό διάλυμα	78
2.6. Απομάκρυνση Αμμωνιακών ιόντων (NH ₄ ⁺) από υδατικό διάλυμα	81
3. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	84
ΕΠΙΛΟΓΟΣ	103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	104

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ιοντοεναλλαγή αποτελεί μία από τις πιο εξειδικευμένες μεθόδους επεξεργασίας του νερού. Στις μέρες μας, η διεργασία αυτή, χρησιμοποιείται σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις που είναι απαραίτητη η παραγωγή πολύ καθαρού νερού, όπως βιομηχανική χρήση, παραγωγή νερού σε μονάδες εμφιάλωσης, εργαστηριακή χρήση, τουρισμός, οικιακή χρήση κ.λ.π., ενώ σε πολύ μικρή κλίμακα στις Επιχειρήσεις Ύδρευσης. Στην εργασία που ακολουθεί, αρχικά παρουσιάζονται γενικές πληροφορίες για την επεξεργασία του νερού και ακολουθεί ανάλυση για την μέθοδο της ιοντοεναλλαγής. Στο πειραματικό μέρος, παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία και τα αποτελέσματα και ακολουθούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν. Σκοπός του πειράματος, ήταν η επιβεβαίωση της απομάκρυνσης διαφόρων ιοντικών μορφών χημικών ουσιών που αποτελούν ρύπους ή και μη, από το πόσιμο νερό, μετά από την επεξεργασία του με την συγκεκριμένη μέθοδο. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκαν καινούριες αναλυτικές μέθοδοι για την ανίχνευση των χημικών αυτών μορφών στο πόσιμο νερό στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Ελέγχου Ποιότητας Νερού.

Θεωρητικό Μέρος

1. ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού ταξινομούνται συνήθως σε φυσικοχημικά, χημικά και μικροβιολογικά. Μπορούν επιπλέον να διαχωριστούν σε αυτά που σχετίζονται με την ανθρώπινη υγεία ή την αισθητική, ενώ για περιγραφικούς ή περισσότερο εξειδικευμένους σκοπούς μπορούν να διαχωριστούν σε υποομάδες.

1.1 Ανόργανα συστατικά

Από τα επικρατέστερα ανόργανα συστατικά ενός φυσικού νερού είναι το ασβέστιο (Ca), το μαγνήσιο (Mg), το νάτριο (Na), το κάλιο (K), τα όξινα ανθρακικά (HCO_3^-), τα θειικά (SO_4^{2-}), τα χλωριούχα (Cl^-) και τα νιτρικά (NO_3^-). Οι συγκεντρώσεις των συστατικών αυτών στα φυσικά νερά μπορεί να κυμαίνονται από 1 έως 1.000 mg/L. Στην Ελλάδα τα όξινα ανθρακικά στο πόσιμο νερό κυμαίνονται στα 200-400 mg/L ενώ τα υπόλοιπα στα 1-100 mg/L.

Άλλα ιόντα, τα οποία απαντούν σε μικρές συγκεντρώσεις (0,01-100 mg/L), είναι αρκετά σημαντικά είτε βιολογικά, είτε γιατί επηρεάζουν συγκεκριμένες βιομηχανικές εφαρμογές. Σε αυτά περιλαμβάνονται η αμμωνία, τα νιτρώδη, τα φωσφορικά, ο σίδηρος, το μαγγάνιο και το φθόριο.

Προέλευση ανόργανων συστατικών νερού

Η χημική σύσταση των φυσικών νερών είναι αποτέλεσμα των αντιδράσεων του νερού με τα πετρώματα της γης, με τα οποία έρχεται σε επαφή, της αποσάθρωσης των πετρωμάτων και της έκπλυσης εδαφών και ιζημάτων. Τροποποιείται με τη βοήθεια βιολογικών μεταβολισμών και ενδεχόμενα η συγκέντρωση των στοιχείων μεγαλώνει ή μικραίνει εξαιτίας της επίδρασης του υδρολογικού κύκλου. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι, διάλυση, οξειδωση-αναγωγή, ιοντοεναλλαγή και συμπλοκοποίηση.

Επίσης, είναι δυνατόν να υπάρχει κάθε στοιχείο του περιοδικού πίνακα στο νερό σε συγκεντρώσεις μερικών mg/L (ιχνοστοιχεία), πράγμα το οποίο οφείλεται είτε στο γήινο υπόβαθρο της περιοχής, είτε σε γεωργική ή βιομηχανική ρύπανση (Μήτρακας, 2001).

Δείκτες ποιότητας νερού

Υπάρχουν μερικές μετρήσεις, οι οποίες σχετίζονται με την ποιότητα του νερού σε σχέση με τα ανόργανα συστατικά που περιέχει, όπως είναι η περιεκτικότητα σε πολυσθενή κατιόντα (σκληρότητα), τα διαλυμένα στερεά (TDS), η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η ενεργότητα ιόντων υδρογόνου (pH) κ.α. (Μήτρακας, 2001).

Σκληρότητα (TH): Η σκληρότητα είναι μια παράμετρος, που εκφράζει την περιεκτικότητα του νερού σε πολυσθενή κατιόντα Ca^{2+} και Mg^{2+} . Νερά με σκληρότητα 0-100 mg/L (ισοδύναμο CaCO_3) χαρακτηρίζονται ως «μαλακά», από 100-200 ως «μέσης σκληρότητας», από 200-300 ως «σκληρά» και από 300 και πάνω ως «πολύ σκληρά» (Μήτρακας, 2001; Ζανάκη, 2001).

Σε σχέση με την παρουσία των ανθρακικών ιόντων (HCO_3^- και CO_3^{2-}) η σκληρότητα του νερού διακρίνεται στα παρακάτω είδη (Κουιμτζής και Σαμαρά-Κωνσταντίνου, 1994):

Ολική σκληρότητα: Είναι η σκληρότητα η οποία οφείλεται σ' όλα τα κατιόντα που σχηματίζουν ίζημα με σάπωνα. Στην πράξη ισούται με το άθροισμα της συγκέντρωσης των κατιόντων ασβεστίου και μαγνησίου.

Μόνιμη σκληρότητα: Είναι η σκληρότητα η οποία παραμένει μετά την καταβύθιση των ουδέτερων ανθρακικών αλάτων.

Παροδική σκληρότητα: Είναι η σκληρότητα η οποία οφείλεται στα κατιόντα τα οποία απομακρύνονται με το βρασμό του νερού. Ισούται με τη διαφορά ανάμεσα στην ολική και την μόνιμη. Η παροδική σκληρότητα ονομάζεται και ανθρακική σκληρότητα και είναι ίση με την ανθρακική αλκαλικότητα.

Ολικά διαλυμένα στερεά (TDS): Τα ολικά διαλυμένα στερεά είναι μια παράμετρος που δείχνει την περιεκτικότητα όλων των ιόντων που υπάρχουν σε διάλυση στο νερό. Στο πόσιμο νερό, η παρουσία στερεών αλλοιώνει τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά (θολερότητα, γεύση). Όταν το πόσιμο νερό έχει συγκέντρωση στερεών πάνω από 500 mg/L αρχίζει σταδιακά να έχει ιδιάζουσα γεύση (Μήτρακας, 2001; Ζανάκη, 2001).

Αγωγιμότητα: Ηλεκτρική αγωγιμότητα (HA) είναι η αριθμητική έκφραση των ηλεκτρικών φορτίων που φέρει ένα υδατικό διάλυμα. Η αγωγιμότητα ενός δείγματος νερού εξαρτάται, κυρίως, από την ολική συγκέντρωση των ιονιζομένων ουσιών που περιέχονται στο δείγμα και τη θερμοκρασία, στην οποία έγινε η μέτρηση. Στα νερά με χαμηλή περιεκτικότητα αλάτων ισχύει με ικανοποιητική προσέγγιση: $\text{TDS}=0,5$ (HA). Καθώς η συγκέντρωση των αλάτων αυξάνεται ($\text{TDS}>1000$ mg/L, $\text{HA}>2000$ $\mu\text{mhos/cm}$), ελαττώνεται η ενεργότητα των ιόντων και κατά συνέπεια ελαττώνεται η ικανότητά τους να μεταφέρουν ρεύμα, οπότε η σχέση τείνει προς $\text{TDS}=0,9$ HA (θαλασσινό νερό) (Μήτρακας, 2001).

1.2. Οργανικά συστατικά

Η προέλευση των οργανικών ουσιών στο πόσιμο νερό μπορεί να είναι είτε η φυσική αποικοδόμηση υλικών φυτικής ή ζωικής προέλευσης, είτε η βιομηχανική, αστική ή αγροτική ρύπανση. Η συγκέντρωση των οργανικών ουσιών μπορεί να κυμαίνεται από το μηδέν, σε ορισμένα καθαρά υπόγεια νερά, έως μερικές δεκάδες mg/L σε νερά επιφανειακά, που έχουν ρυπανθεί.

Φυσικές οργανικές ενώσεις

Τα φυσικά οργανικά αποτελούν συνήθως το μεγαλύτερο ποσοστό των οργανικών ενώσεων, που απαντούν στο νερό. Η σύστασή τους αντικατοπτρίζει τη διαδικασία χουμοποίησης διάφορων συστατικών του εδάφους, τα οποία εκπλένονται από το νερό. Τα οργανικά συστατικά του εδάφους, που υφίστανται χουμοποίηση, προέρχονται από την αποικοδόμηση οργανικών προϊόντων φυτικής και ζωικής προέλευσης (Μήτρακας, 2001; Λέκκας, 1996).

Συνθετικές οργανικές ενώσεις

Η χημική επανάσταση των έξι τελευταίων δεκαετιών είχε ως αποτέλεσμα τη σύνθεση νέων μορίων και κατά συνέπεια τη δημιουργία ενός τεράστιου αριθμού οργανικών ενώσεων, οι οποίες δεν υπάρχουν στη φύση. Οι περισσότεροι κοινοί ρυπαντές του πόσιμου νερού είναι οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC_s), οι οποίοι είναι διαλύτες, αλογονομένοι υδρογονάνθρακες, καύσιμα και ψυκτικά υγρά.

Οργανικές ενώσεις, οι οποίες ρυπαίνουν το νερό, μπορεί να δημιουργηθούν κατά την επεξεργασία του νερού. Κατά τη χλωρίωση του νερού παράγονται διάφορες τοξικές αλογονούχες οργανικές ενώσεις ως αποτέλεσμα αντίδρασης του χλωρίου με τα φυσικά οργανικά συστατικά του νερού.

Μερικές οργανικές ενώσεις, όπως είναι τα παρασιτοκτόνα, τα ζιζανιοκτόνα και πολλοί διαλύτες, χρησιμοποιούνται και διασπείρονται στο περιβάλλον σκόπιμα. Όλες αυτές οι τοξικές οργανικές ενώσεις εκπλένονται από το νερό κατά τον υδρολογικό κύκλο ρυπαίνοντας τις πηγές υδροληψίας πόσιμου νερού.

1.3. Αιωρούμενα στερεά

Η παράμετρος αυτή αναφέρεται στα στερεά υλικά, που αιωρούνται στο νερό, επειδή βρίσκονται σε πολύ λεπτό διαμερισμό. Αποτελούνται από υλικά ανόργανης και οργανικής προέλευσης (Κουιμτζής και Σαμαρά-Κωνσταντίνου, 1994).

Τα αιωρούμενα στερεά έχουν ευρεία επίδραση στην ποιότητα του νερού, η οποία εξαρτάται από τα φυσικά, χημικά και βιολογικά τους χαρακτηριστικά. Οι μέθοδοι με τις οποίες μετρούνται τα αιωρούμενα στερεά είναι η θολότητα και η μέτρηση της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων (Μήτρακας, 2001).

1.4. Ραδιοϊσότοπα

Τα ραδιοϊσότοπα είναι ραδιενεργά άτομα, τα οποία διασπώνται ελευθερώνοντας ενέργεια (ραδιενέργεια). Η ραδιενέργεια του νερού μπορεί να είναι φυσική, αλλά μπορεί να είναι και ανθρώπινης προέλευσης. Η φυσική ραδιενέργεια οφείλεται στα ραδιενεργά στοιχεία που υπάρχουν στη γη ή δημιουργούνται από τον βομβαρδισμό της ατμόσφαιρας με κοσμική ακτινοβολία. Τα ανθρώπινης προέλευσης ραδιενεργά ισότοπα προέρχονται συνήθως από τρεις πηγές, από πυρηνικά όπλα, από ραδιενεργά φάρμακα, καθώς επίσης από την παραγωγή και χρήση ραδιενεργών καυσίμων (Μήτρακας, 2001).

1.5. Οργανοληπτικά χαρακτηριστικά

Τα αισθητικά ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού περιλαμβάνουν την οσμή, τη γεύση και το χρώμα του. Τα προβλήματα σε αυτά τα χαρακτηριστικά ενδεχόμενα να σχετίζονται με την προέλευση του νερού, τη μέθοδο επεξεργασίας του, καθώς επίσης και με το δίκτυο διανομής. Για τα αισθητικά χαρακτηριστικά του πόσιμου νερού υπάρχει θεσμοθετημένη επιτρεπτή περιοχή τιμών μέσα στην οποία πρέπει να κυμαίνονται.

Οσμή και γεύση

Η οσμή όπως και η γεύση αποτέλεσαν εδώ και αιώνες εμπειρικά κριτήρια, στα οποία στηρίζονταν οι άνθρωποι για να αποφεύγουν τροφές και νερό που ήταν τοξικά ή επικίνδυνα για την υγεία τους (Ζανάκη, 2001).

Τα μη ρυπαινόμενα φυσικά νερά με κανονικές περιεκτικότητας ελεύθερου οξυγόνου είναι άοσμα. Η δυσάρεστη οσμή των νερών οφείλεται βασικά στα αέρια μεθάνιο (CH_4) και υδρόθειο (H_2S) (Μαλεφάκης, 1998), αλλά και σε πληθώρα αλογονομένων οργανικών ουσιών.

Τα προβλήματα γεύσης στο νερό οφείλονται στα διαλυμένα άλατα (TDS), καθώς επίσης στην παρουσία κάποιων συγκεκριμένων μετάλλων όπως είναι ο σίδηρος, ο χαλκός, το μαγγάνιο και ο ψευδάργυρος. Γενικά, τα νερά με σύνολο διαλυμένων αλάτων (TDS) μικρότερο από 1200 mg/L δεν παρουσιάζουν προβλήματα γεύσης και είναι αποδεκτά από τον καταναλωτή, αν και πρέπει να προτιμάται συγκέντρωση TDS μικρότερη από 500 mg/L. Η συγκέντρωση των κοινών συστατικών, τα οποία δημιουργούν συνήθως γεύση στο πόσιμο νερό, δίνεται στον **Πίνακα 1**.

Πίνακας 1. Συγκεντρώσεις ορισμένων χημικών συστατικών που δημιουργούν προβλήματα γεύσης στο πόσιμο νερό (Μήτρακας, 2001).

Συστατικό	Συγκέντρωση γεύσης, mg/L
Zn ²⁺	4-9
Cu ²⁺	2-5
Fe ²⁺	0,04-0,1
Mn ²⁺	4-30
2-Χλωροφαινόλη*	0,004
2,4-Χλωροφαινόλη*	0,008
2,6-Χλωροφαινόλη*	0,002
Φαινόλη	>1,0
* Δημιουργούνται από τη φαινόλη κατά τη χλωρίωση του νερού	

Η αποικοδόμηση φυτικών υλικών και τα προϊόντα μεταβολισμού των μικροοργανισμών είναι οι περισσότερο πιθανές αιτίες δημιουργίας γεύσης και οσμής στα επιφανειακά νερά.

Χρώμα

Ο όρος χρώμα αναφέρεται μόνο στο χρώμα που παραμένει στο νερό, όταν απομακρυνθούν τα αιωρούμενα σωματίδια με κατάλληλη διήθηση. Ο όρος φαινομενικό χρώμα αναφέρεται στο χρώμα που εμφανίζουν τα νερά, χωρίς να έχει προηγηθεί το στάδιο της διήθησης (Κουιμτζή, Σαμαρά-Κωνσταντίνου, 1994).

Χρώμα στα νερά μπορούν να δώσουν διάφοροι φυσικοί και ανθρωπογενείς παράγοντες όπως το πλαγκτόν, η τύρφη, μεταλλοϊόντα, απόβλητα βιομηχανιών, κλπ. Τα πόσιμα νερά πρέπει να είναι διαυγή και να μην έχουν ούτε ίχνος χρώματος, για να μην προκαλούν την αποστροφή των καταναλωτών. Ο βαθμός του χρώματος στα νερά καθορίζεται με σύγκριση πρότυπων διαλυμάτων.

1.6. Μικροοργανισμοί στο νερό

Οι μικροοργανισμοί παίζουν από πολλές απόψεις σπουδαίο ρόλο στον έλεγχο της ποιότητας του νερού. Είναι υπεύθυνοι για πολλές ασθένειες, όπως είναι για παράδειγμα ο τύφος, για οσμές και γεύσεις στο πόσιμο νερό, καθώς επίσης και για τη διάβρωση των μετάλλων και του σκυροδέματος. Ως μικροοργανισμοί θεωρούνται οι οργανισμοί στους οποίους δεν μπορούμε να διακρίνουμε λεπτομέρειες με γυμνό μάτι (διάμετρος μικρότερη του 1 mm) (Μήτρακας, 2001).

1.6.1. Είδη μικροοργανισμών

Η βασικότερη ταξινόμηση των μικροοργανισμών είναι ο διαχωρισμός τους σε φυτικούς και ζωικούς. Όμως, οι διαχωριστικές γραμμές μεταξύ των διαφόρων ειδών μικροοργανισμών είναι συχνά ασαφείς με αποτέλεσμα η ταξινόμησή τους ορισμένες φορές να είναι αρκετά δύσκολη.

Ιοί

Οι ιοί έχουν μέγεθος μικρότερο από 0,3 μm. Ένας ιός συνίσταται από την ένωση ενός νουκλεϊνικού οξέος και μιας πρωτεΐνης. Είναι όλοι παρασιτικοί και στερούνται κανονικών μεταβολικών λειτουργιών. Οι ιοί βρίσκονται συνήθως στα λύματα και είναι για το λόγο αυτό παρόντες στα μολυσμένα νερά. Εξαιτίας του μικρού τους μεγέθους είναι δύσκολη η απομάκρυνσή τους από το νερό και είναι συχνά ανθεκτικοί στις συνήθεις μεθόδους απολύμανσης των νερών (Μήτρακας, 2001; Ζανάκη, 2001).

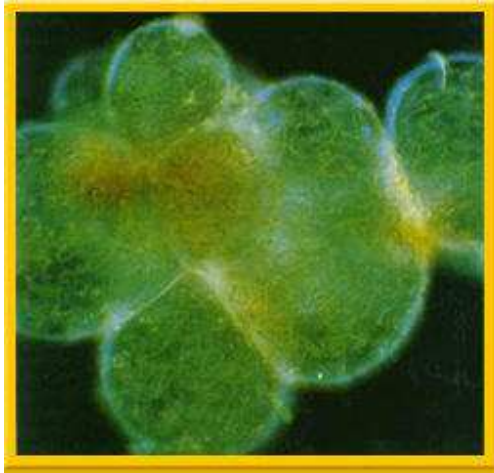
Φυτικοί οργανισμοί

Τα φυτά απαιτούν διαλυτή τροφή, η οποία μπορεί να είναι είτε οργανική, είτε ανόργανη. Ορισμένα είδη φυτών είναι τα βακτήρια, οι μύκητες και τα άλγη (**Εικ. 1**).

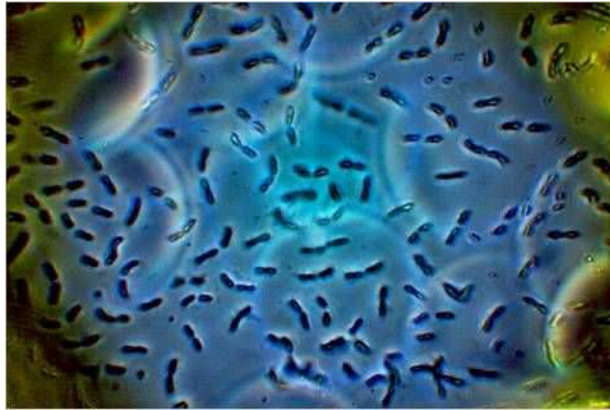
Τα βακτήρια (**Εικ. 2**) είναι οι βασικές μονάδες της φυτικής ζωής. Είναι μονοκύτταροι οργανισμοί που καταναλώνουν διαλυτή τροφή η οποία είναι συνήθως οργανική. Τα περισσότερα βακτήρια είναι ευαίσθητα σε αλλαγές του pH και προτιμούν λίγο ή πολύ ουδέτερες συνθήκες. Είναι ακόμα αρκετά ευαίσθητα στις διάφορες μορφές του χλωρίου και στην θερμοκρασία και έχουν μια βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης. Τα βακτήρια είναι είτε αερόβια, είτε αναερόβια και είναι υπεύθυνα για ασθένειες που μεταδίδονται με το νερό (Μήτρακας, 2001).

Ζωικοί οργανισμοί

Οι ζωικοί οργανισμοί καταναλώνουν μόνο οργανικής φύσης τροφή. Όλα τα είδη απαιτούν οξυγόνο, ενώ ορισμένα από τα λιγότερο ανεπτυγμένα είδη μπορούν να ζήσουν και σε χαμηλά επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου. Τα πρωτόζωα, τα τροχόζωα και τα μαλακόστρακα αποτελούν μερικά είδη ζώων (Μήτρακας, 2001; Ζανάκη, 2001).



Εικόνα 1. Οι οργανισμοί αυτοί είναι γνωστοί σαν blue algae
(<http://www.elbalero.gob.mx/kids/bio/html/especies/micro/micro5.html>)



Εικόνα 2. Βακτήρια
(<http://www.micrographia.com/specbiol/bacteri/bacter/bact0100/bactfw06.htm>)

2. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ

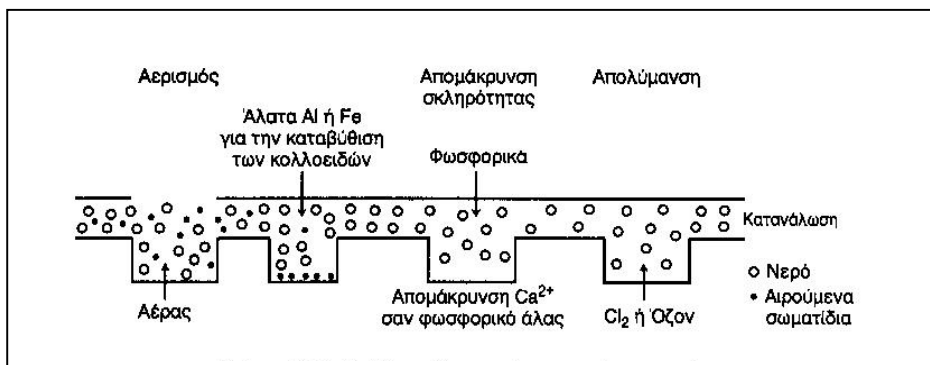
Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού πρέπει να παράγουν ένα τελικό προϊόν υψηλής ποιότητας. Η κατεργασία του νερού περιλαμβάνει μια σειρά από τεχνικές που συνήθως γίνονται διαδοχικά. Αυτές δίνονται στον **Πίνακα 2**, αν και είναι σύνηθες να χρησιμοποιηθούν όλες αυτές μαζί, σε μία εγκατάσταση (Κουϊμτζής, 1998).

Το πόσιμο νερό μπορεί να προέρχεται είτε από τα υπόγεια νερά, είτε από τα επιφανειακά (λίμνες, ποταμούς). Στα υπόγεια νερά δεν γίνεται ιδιαίτερη επεξεργασία, γιατί είναι πολύ πιο καθαρά από τα επιφανειακά. Ουσίες που συναντώνται στα υπόγεια νερά και πρέπει να ελαττωθούν ή να απομακρυνθούν είναι ο σίδηρος, η σκληρότητα (εάν ξεπερνά τα 300 mg/L) και το CO₂. Ουσίες που καταλήγουν στα υπόγεια νερά λόγω ανθρωπογενούς δράσης και πρέπει να απομακρυνθούν είναι τα νιτρικά, οι παθογόνοι μικροοργανισμοί και ίχνη οργανικών ενώσεων όπως τα παρασιτοκτόνα.

Πίνακας 2. Βασικές κατεργασίες για το πόσιμο νερό

Συμβατικές διεργασίες	Προεπεξεργασία
	Κροκίδωση-Συσσωμάτωση
	Καθίζηση
	Διήθηση
	Απολύμανση
Ειδικότερες διεργασίες	Προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα
	Αντίστροφη όσμωση
	Ιοντοεναλλαγή

Η επιλογή της αναγκαίας εγκατάστασης κατεργασίας για το πόσιμο νερό εξαρτάται από την ποιότητα του ακατέργαστου νερού και από την ποιότητα του πόσιμου νερού που απαιτείται. Η πιο συνηθισμένη κατεργασία που χρησιμοποιείται, δίνεται στην **Εικόνα 3**.



Εικόνα 3. Στάδια καθαρισμού για το πόσιμο νερό (Κουϊμτζής, 1998).

2.1. Προεπεξεργασία

Με τον όρο προεπεξεργασία ονομάζουμε εκείνες τις διεργασίες που εφαρμόζονται για την προετοιμασία του νερού για την κύρια επεξεργασία καθαρισμού του.

Το ακατέργαστο επιφανειακό νερό που προέρχεται από ποταμούς ή από ταμειυτήρες περιέχει πολλές φορές αιωρούμενα ή επιπλέοντα στερεά, που λόγω μεγέθους ή χαρακτηριστικών πρέπει να απομακρυνθούν πριν το νερό εισέλθει στην κύρια διαδικασία καθαρισμού του. Η άμεση απομάκρυνση τέτοιων στερεών είναι αναγκαία και για την προστασία των αντλητικών συγκροτημάτων καθώς και του δικτύου διακίνησης του νερού, κυρίως για την αποφυγή εμφράξεων (Λέκκας, 1996; Μεγαλόπουλος, 1977).

Οι διεργασίες προεπεξεργασίας είναι:

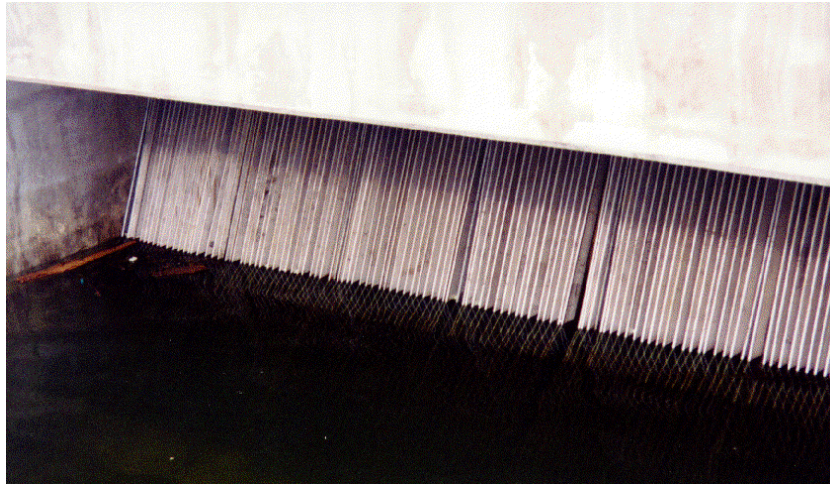
- Εσχαρισμός και κοσκίνισμα
- Εξάμμωση
- Από-ιλύωση
- Απομάκρυνση ελαιωδών
- Μικροκοσκίνισμα

Εσχάρες

Οι εσχάρες (**Εικ. 4, 5**) είναι διατάξεις με παράλληλες μπάρες και χρησιμοποιούνται για:

- Την προστασία των μονάδων επεξεργασίας από ογκώδη αντικείμενα, που εάν εισέλθουν θα προκαλέσουν διάφορες εμφράξεις στις εγκαταστάσεις.
- Το διαχωρισμό και απομάκρυνση στερεών, που η παρουσία τους θα εμπόδιζε την επεξεργασία που ακολουθεί (Λέκκας, 1996; Μεγαλόπουλος, 1977).

Η εσχάρα αποτελείται από μεταλλικές λάμες με πάχος 1 με 1,5 cm, πλάτος 6 cm και διαφορετική κατά περίπτωση διατομή. Η μεταξύ των ράβδων απόσταση διαφέρει, ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων που είναι προς απομάκρυνση. Ο καθαρισμός της εσχάρας μπορεί να γίνεται είτε με τα χέρια είτε με τη βοήθεια ειδικής χτένας (Τσόγκας, 1998).



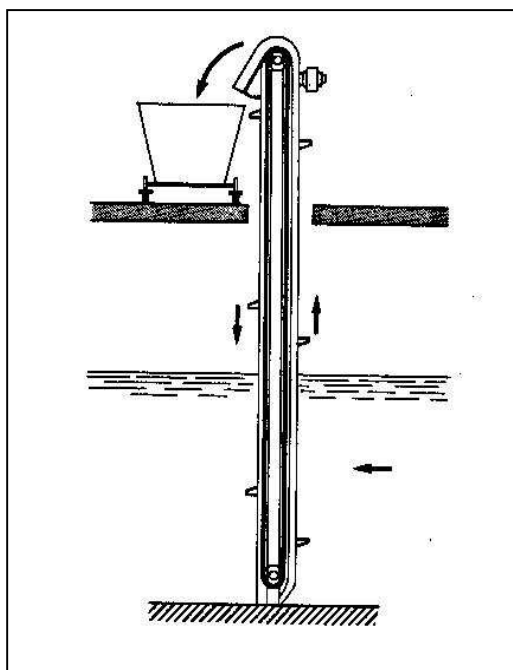
Εικόνα 4. Το νερό πρώτα περνάει από όπως εσχάρες για να αφαιρεθούν τα μεγάλα αντικείμενα, όπως είναι τα κλαδιά και τα φύλλα. (http://www-ceg.eng.ohio-state.edu/~hwalker/CE812_Web/CE812_Tour.htm)



Εικόνα 5. Άλλος τύπος εσχάρας (<http://www.sewer-overflow.com/>)

Κόσκινα

Όταν γίνεται υδροληψία από ποτάμι, χρησιμοποιούνται κόσκινα με ανοίγματα γύρω στα 10 mm, για να συγκρατούν διάφορα στερεά που παρασύρει το νερό. Τα κόσκινα αυτά είναι συνήθως βυθισμένα στο κανάλι τροφοδοσίας, περιστρέφονται και στο πάνω μέρος καθαρίζονται (**Εικ. 6**).



Εικόνα 6. Περιστροφικό κόσκινο σημείου υδροληψίας (Λέκκας, 1996).

Τεμαχιστές

Ο τεμαχισμός των στερεών ως διεργασία προεπεξεργασίας βρίσκει μεγαλύτερη εφαρμογή στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Ο ρόλος των τεμαχιστών είναι η μείωση του μεγέθους των στερεών σε βαθμό που να απομακρύνονται από τις διεργασίες καθαρισμού που ακολουθούν (Λέκκας, 1996; Μεγαλόπουλος, 1977).

Εξάμμωση

Η εξάμμωση έχει ως στόχο την αφαίρεση από το ρεύμα του ακατέργαστου νερού των χαλικιών, της άμμου και των άλλων ανόργανων στερεών. Η εξάμμωση αφορά στερεά μεγέθους μεγαλύτερου των 200 μm. Τα μικρότερα απομακρύνονται με τις διεργασίες της καθίζησης και διήθησης (Λέκκας, 1996).

Απο-ιλύωση

Η απο-ιλύωση είναι μια διεργασία που λαμβάνει χώρα πριν τη καθίζηση των επιφανειακών νερών, που περιέχουν μεγάλες ποσότητες αιωρούμενων στερεών. Αποτελεί προκαταρκτική καθίζηση, όπου στόχος είναι η απομάκρυνση της λεπτής άμμου και του μεγαλύτερου μέρους της αργίλου. Στις δεξαμενές από-ιλύωσης χρησιμοποιούνται πολυηλεκτρολύτες, όταν η συγκέντρωση είναι μεγάλη και απαιτείται αυξημένη απόδοση των δεξαμενών (Λέκκας, 1996; Μεγαλόπουλος, 1977).

Απομάκρυνση ελαιωδών

Στην τεχνολογία καθαρισμού νερού η απομάκρυνση των ελαιωδών και λιπαρών προσμίξεων είναι αναγκαία σε μια σειρά περιπτώσεων:

- Απομάκρυνση ελαιωδών από τα επιφανειακά νερά πριν την κύρια επεξεργασία του νερού.
- Απομάκρυνση λιπαρών από τα οικιακά υγρά απόβλητα πριν την απόρριψη στο δίκτυο αποχέτευσης.
- Απομάκρυνση λιπαρών κατά την επεξεργασία των αστικών υγρών αποβλήτων.
- Απομάκρυνση ελαιωδών προσμίξεων από τα υγρά απόβλητα των διυλιστηρίων πετρελαίου και άλλων βιομηχανιών.
- Απομάκρυνση ελαιωδών από τα συμπυκνώματα ατμού στη βιομηχανία πριν την ανακύκλωση νερού.

Η απομάκρυνση των ελαιωδών είναι ένας διαχωρισμός υγρών φάσεων, ενώ η απομάκρυνση των λιπαρών είναι ένας διαχωρισμός στερεής-υγρής φάσης.

Τόσο τα ελαιώδη όσο και τα λιπαρά συστατικά είναι ελαφρύτερα από το νερό και όταν το νερό βρεθεί σε ηρεμία σε μια δεξαμενή, οι προσμίξεις αυτές επιπλέουν. Η υπερχειλίση που πολλές φορές υποβοηθείται με ένα επιφανειακό “ξέστρο” κυρίως για τα λιπαρά, είναι η μέθοδος απομάκρυνσης των προσμίξεων αυτών (Λέκκας, 1996).

Λεπτομερές σούρωμα

Η χρήση κόσκινων με λεπτό πλέγμα χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές στην τεχνολογία καθαρισμού του νερού. Ανάλογα με το μέγεθος των ανοιγμάτων του πλέγματος που χρησιμοποιείται διακρίνουμε τα:

- Μακροκόσκινα (ανοίγματα πλέγματος μεγαλύτερα από 0,3 mm).
- Μικροκόσκινα (ανοίγματα πλέγματος μικρότερα από 100 μm)

2.2. Κυρίως Επεξεργασία

2.2.1. Κροκίδωση - Συσσωμάτωση

Η κροκίδωση και η συσσωμάτωση είναι από τις πιο σημαντικές διεργασίες επεξεργασίας του νερού και απαιτούν το συνδυασμό φυσικών και χημικών φαινομένων για την παραγωγή νερού κατάλληλου για χρήση από τον άνθρωπο. Εφαρμόζεται για την απομάκρυνση των αιωρούμενων κολλοειδών σωματιδίων από τα νερά. Πολλά σωματίδια είναι συστατικά της γης ή της ατμόσφαιρας, όπως άργιλοι, ιλύς, προϊόντα γήινης αποσάθρωσης, παθογόνοι μικροοργανισμοί και ίνες αμίαντου, ενώ άλλα παράγονται από χημικές ή βιολογικές διεργασίες στο νερό. Το μέγεθός τους κυμαίνεται από λίγα nm, όπως οι ιοί, έως μερικές εκατοντάδες μm, όπως για παράδειγμα το ζωοπλαγκτόν. Παραμένουν αιωρούμενα για μεγάλο χρονικό διάστημα, δεν καθιζάνουν και δεν απομακρύνονται εύκολα με τις συμβατικές φυσικές διεργασίες επεξεργασίας του νερού (καθίζηση-διήθηση) (Σαββάκης, 2002).

Οι χουμικές ουσίες είναι τα κύρια οργανικά συστατικά των καθαρών νερών, τα οποία προέρχονται από το έδαφος και σχηματίζονται από χημικές ή βιολογικές αντιδράσεις, όπως η αποσύνθεση της φυτικής βλάστησης. Είναι επιφανειοδραστικά σώματα και αντιδρούν με τα περισσότερα κροκιδωτικά (Μήτρακας, 2001).

Τα κολλοειδή σωματίδια διακρίνονται, ανάλογα με την συμπεριφορά τους ως προς το νερό, σε υδρόφιλα και υδρόφοβα. Τα υδρόφοβα σωματίδια δεν συγκρατούν στην επιφάνειά τους μόρια του νερού. Με την παρουσία όμως ηλεκτρολυτών έχουν περιορισμένη σταθερότητα και συσσωματώνονται εύκολα. Τα υδρόφιλα κολλοειδή σωματίδια έχουν την τάση να συγκρατούν στην επιφάνειά τους μόρια του νερού και είναι οργανικής κυρίως προέλευσης (Σαββάκης, 2002).

Βασικός σκοπός των διεργασιών κροκίδωση-συσσωμάτωση, είναι η συνένωση μικρών σωματιδίων σε μεγαλύτερα, τα οποία απομακρύνονται στη συνέχεια από το νερό με καθίζηση ή επίπλευση ή διήθηση. Συνεισφέρουν δε ουσιαστικά στον αποτελεσματικό καθαρισμό του νερού με χαμηλό κόστος επεξεργασίας (**Εικ. 7**).

Οι χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται για την αποσταθεροποίηση των σωματιδίων ονομάζονται κροκιδωτικά. Τα αντιδραστήρια κροκίδωσης είναι το θειικό αργίλιο, ο θειικός σίδηρος, ο χλωριούχος σίδηρος, κ.ά.

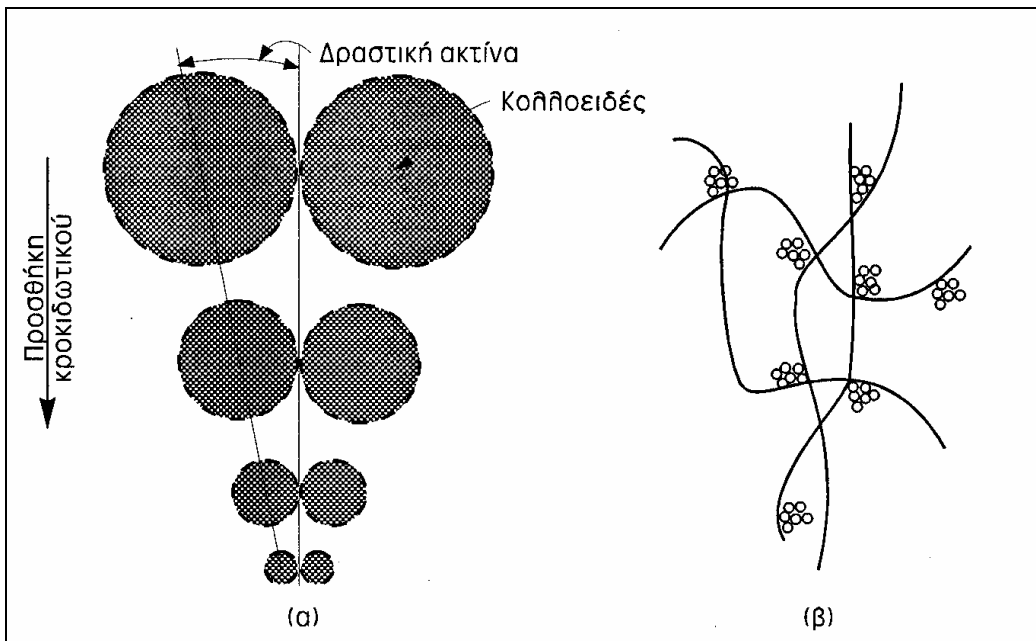
Κατά την επεξεργασία του νερού η κροκίδωση και η συσσωμάτωση είναι φαινόμενα που συμβαίνουν συνήθως ταυτόχρονα και αλληλοεπικαλύπτονται, επομένως επικρατεί μια ασάφεια στη χρήση του κατάλληλου κάθε φορά όρου που περιγράφει ένα φαινόμενο.



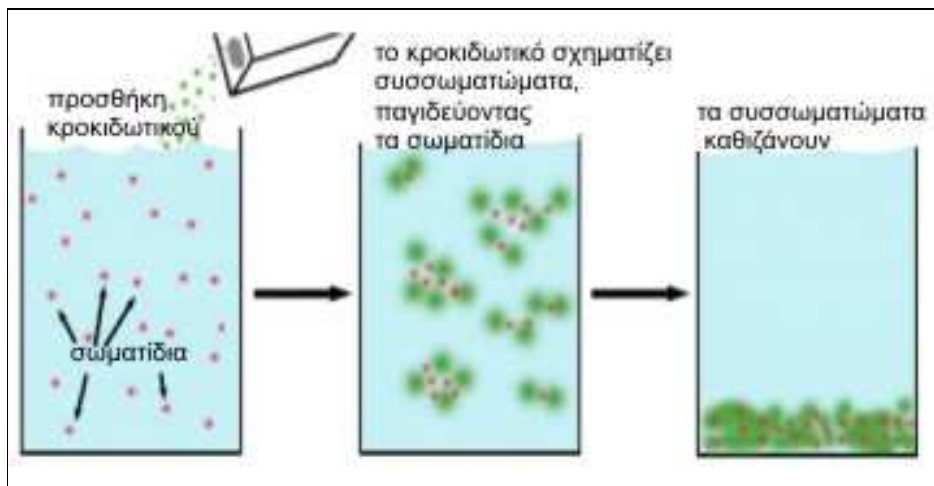
Εικόνα 7. Το νερό αναμιγνύεται με χλωριούχο σίδηρο και οξείδιο του ασβεστίου και στη συνέχεια ακολουθεί η κροκίδωση. (http://www-ceg.eng.ohio-state.edu/~hwalker/CE812_Web/CE812_Tour.htm)

Ο μηχανισμός της κροκίδωσης αναφέρεται όταν συμβαίνει μείωση των απωστικών δυνάμεων των ομώνυμα φορτισμένων κολλοειδών σωματιδίων και ο μηχανισμός της συσσωμάτωσης όταν με τη σύνδεση των κολλοειδών σωματιδίων σχηματίζονται ορατοί θρόμβοι (**Εικ. 8**) (Μήτρακας, 2001).

Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 8**, η προσθήκη του κροκιδωτικού εξουδετερώνει τα φορτία που καλύπτουν τα κολλοειδή και συνεισφέρει στη συσσώρευσή τους. Ο σχηματισμός γεφυρών ανάμεσα στα συσσωρευμένα κολλοειδή σωματίδια και του αντιδραστηρίου συσσωμάτωσης δημιουργεί μεγάλους θρόμβους που καθιζάνουν (**Εικ. 9**).



Εικόνα 8. Σχηματική παράσταση α) Κροκιδώσης και β) Συσσωμάτωσης (Μήτρακας 2001).

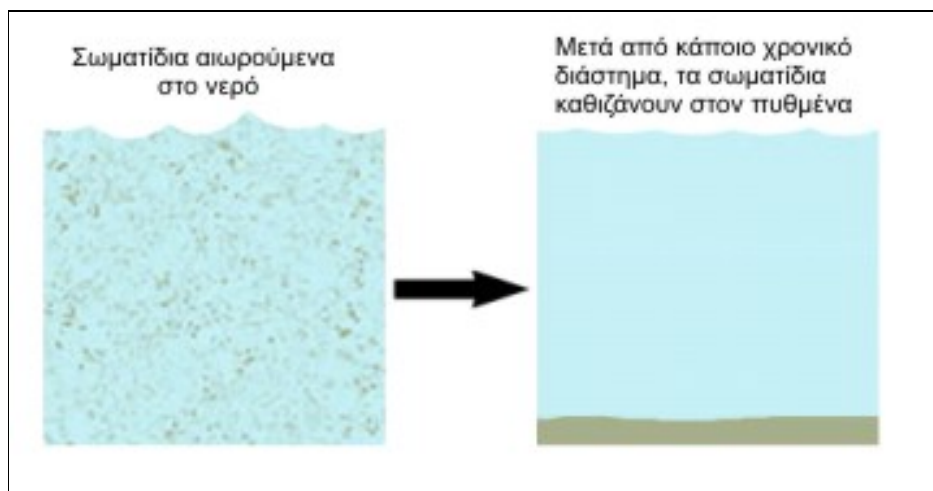


Εικόνα 9. Θρόμβωση σωματιδίων

(<http://wunmr.wustl.edu/EduDev/LabTutorials/Water/PublicWaterSupply/PublicWaterSupply.html>)

2.2.2. Καθίζηση

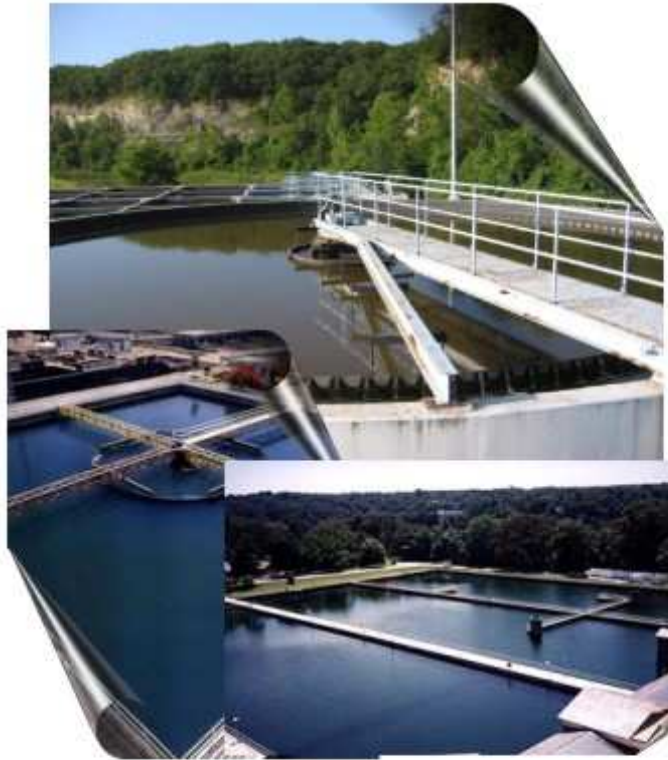
Πολλές από τις ανεπιθύμητες ουσίες στο νερό υπάρχουν με την μορφή αιωρούμενων στερεών, ενώ πολλοί από τους ρυπασμένους ρυπαντές μετατρέπονται σε αδιάλυτα στερεά για να απομακρυνθούν στη συνέχεια. Η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών από το νερό γίνεται με την καθίζηση (**Εικ. 10**).



Εικόνα 10. Εάν τα αιωρούμενα στερεά είναι αρκετά βαριά καθιζάνουν στον πυθμένα της δεξαμενής (<http://wunmr.wustl.edu/EduDev/LabTutorials/Water/PublicWaterSupply/PublicWaterSupply.html>).

Η καθίζηση είναι διεργασία που σχεδόν πάντα εφαρμόζεται τόσο στις εγκαταστάσεις καθαρισμού του πόσιμου νερού, όσο και σε εκείνες των υγρών αποβλήτων. Με την καθίζηση απομακρύνονται από το πόσιμο νερό τα αιωρούμενα στερεά γαιώδους προέλευσης, όπως τεμαχίδια αργίλου, τα ιζήματα που δημιουργούνται από την προσθήκη κροκιδωτικών, όπως το θειικό αργίλιο και ο θειικός σίδηρος και από την αποσκλήρυνση με τη χρήση υδρασβέστου (Λέκκας, 1996).

Η καθίζηση εφαρμόζεται όταν τα αιωρούμενα στερεά έχουν ειδικό βάρος μεγαλύτερο του νερού. Επειδή η ταχύτητα καθίζησης είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερα είναι τα στερεά, στις περισσότερες περιπτώσεις καθαρισμού του νερού εφαρμόζεται κροκίδωση και συσσωμάτωση για την αύξηση του μεγέθους των στερεών πριν τη δεξαμενή καθίζησης. Στην **Εικόνα 11** παρουσιάζονται διάφοροι τύποι δεξαμενών καθίζησης.



Εικόνα 11. Διάφοροι τύποι δεξαμενών καθίζησης
(<http://www.projectsmonitor.com/Library/Water%20Treatment.jpg>
<http://www.nad.usace.army.mil/Essayons/Aug00/capwa.htm>
<http://www.coffeyville.com/images/Water%20Plant%20Basin%20071802.jpg>)

2.2.3. Διήθηση

Η διήθηση μπορεί να ορισθεί ως η διεργασία κατά την οποία ένα αιώρημα διέρχεται μέσω πορώδους στρώματος που αποτελείται από σφαιρικό ή γωνιώδες υλικό και όπου γίνεται απομάκρυνση των λεπτομερών ή/ και των κολλοειδών στερεών που περιέχονται σε αυτό (Λέκκας, 1996).

Η διήθηση είναι ικανή να απομακρύνει από το νερό μεγάλη ποικιλία σωματιδίων φυσικής ή ανθρώπινης προέλευσης. Το μέγεθος των σωματιδίων αυτών κυμαίνεται μεταξύ 0,1-100 μm και παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία σχημάτων.

Στην επεξεργασία του νερού, η διήθηση χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών που δεν απομακρύνθηκαν κατά τις προηγούμενες διεργασίες, που τυπικά περιλαμβάνουν την κροκίδωση, τη συσσωμάτωση και την καθίζηση. Επομένως, η διεργασία αυτή καλείται να απομακρύνει τα μικρότερα αιωρούμενα στερεά που αρχικά υπήρχαν ή δημιουργήθηκαν λόγω προσθήκης κροκιδωτικών στο νερό. Σε αρκετές περιπτώσεις, όπου η ποιότητα του ακατέργαστου νερού είναι καλή, εφαρμόζεται διήθηση χωρίς να έχει προηγηθεί κροκίδωση.

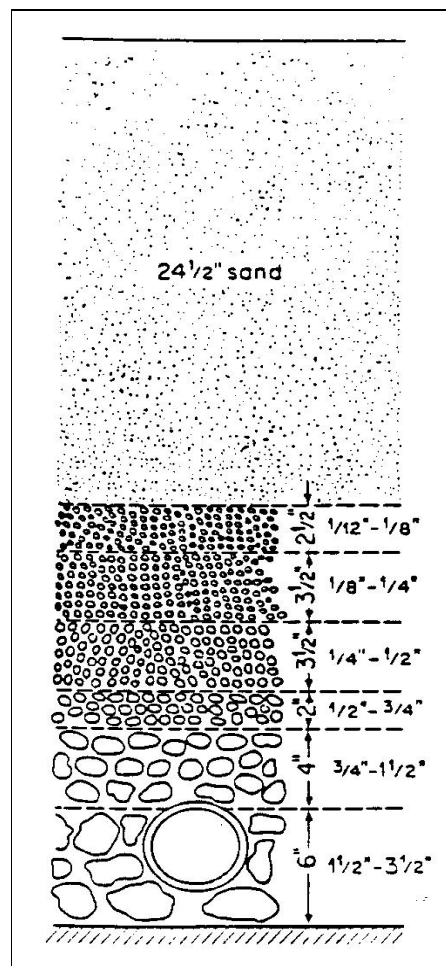
Πολλά είναι τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται στην βιβλιογραφία για την διάκριση των ειδών διήθησης και των διαφόρων φίλτρων. Μία διάκριση των φίλτρων, η οποία είναι και η σπουδαιότερη, γίνεται με βάση τον μηχανισμό της διήθησης. Στη διήθηση επιφάνειας ή πλακούντα, η διασπορά οδηγείται σε μια πορώδη επιφάνεια, η οποία συγκρατεί τα αιωρούμενα σωματίδια καθώς διέρχεται το νερό. Στη διήθηση χώρου, η διασπορά διέρχεται μέσα από ένα παχύ στρώμα πορώδους υλικού, όπως είναι η άμμος, οπότε τα σωματίδια συγκρατούνται μέσα στη μάζα του.

Διηθητικά υλικά

Η επιλογή του διηθητικού υλικού είναι από τις πιο ουσιαστικές επιλογές για την αποτελεσματικότητα της διεργασίας. Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως είναι πυριτική άμμος διαφόρων κοκκομετριών, γρανάτης, ανθρακίτης και ενεργός άνθρακας, καθώς και συνθετικοί κόκκοι από πολυαιθυλένιο κ.α. Τα χαρακτηριστικά των κοκκωδών υλικών που πρέπει να εξετάζονται και μάλιστα με συγκεκριμένες μεθόδους, είναι: εμφάνιση και καθαρότητα, κατανομή μεγέθους (**Εικ. 12**), πυκνότητα, ταχύτητα καθίζησης κόκκων, σχήμα, διαλυτότητα στα οξέα, σκληρότητα και αντοχή στην τριβή (Λέκκας, 1996).

Μπορούμε να διακρίνουμε τρία στάδια στη διαδικασία απομάκρυνσης – συγκράτησης των αιωρούμενων στερεών στο φίλτρο:

- 1^ο στάδιο: Μεταφορά των αιωρούμενων στερεών. Σε αυτό το στάδιο τα αιωρούμενα στερεά πλησιάζουν στους κόκκους του διηθητικού υλικού με τη δράση μηχανισμών όπως η καθίζηση λόγω βαρύτητας, η διάχυση, η ανάσχεση και οι υδροδυναμικές δυνάμεις.
- 2^ο στάδιο: Προσκόλληση στην επιφάνεια των κόκκων ή σε στερεά που έχουν ήδη αποτεθεί. Οι δυνάμεις που δρουν έχουν πολύ μικρή ακτίνα δράσης και η επίδρασή τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ηλεκτροχημεία των επιφανειών.
- 3^ο στάδιο: Αποκόλληση στερεών και επανεισαγωγή τους στο διήθημα. Εξαρτάται από την ταχύτητα διήθησης, τα φυσικά χαρακτηριστικά των αιωρούμενων και των κόκκων του διηθητικού υλικού, το χρόνο από την έναρξη της διεργασίας (Λέκκας, 1996).



Εικόνα 12. Κατανομή μεγέθους των κόκκων διηθητικού υλικού σε φίλτρο διήθησης.

2.2.4. Απολύμανση

Η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών στο νερό ευνοείται από ορισμένους παράγοντες, όπως είναι το ουδέτερο pH, η παρουσία οργανικής ύλης που είναι η τροφή τους, καθώς και η ύπαρξη θρεπτικών συστατικών, όπως το άζωτο και ο φώσφορος, τα οποία είναι απαραίτητα στη βιοσύνθεσή τους. Εξαιτίας του πολύ μικρού μεγέθους τους οι μικροοργανισμοί είναι δύσκολο να απομακρυνθούν πλήρως από το νερό μόνο με φυσικοχημικές διεργασίες, όπως είναι η καθίζηση και η διήθηση, οπότε για να διασφαλιστεί η απουσία τους στο νερό απαιτείται η απολύμανσή τους.

Απολύμανση είναι η διεργασία θανάτωσης των μικροοργανισμών που αναπτύσσονται στο νερό. Με την απολύμανση επιτυγχάνεται μείωση του μικροβιακού φορτίου του νερού σε επίπεδο ασφαλές για τον ανθρώπινο οργανισμό (Σαββάκης, 2002).

Παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της απολύμανσης

Η αποτελεσματικότητα της απολύμανσης είναι μια σύνθετη συνάρτηση πολλών μεταβλητών, όπως είναι το είδος και η δόση του μέσου απολύμανσης, το είδος και η συγκέντρωση των μικροοργανισμών, ο χρόνος επαφής και τα χαρακτηριστικά ποιότητας του νερού. Από αυτές, ο χρόνος επαφής και τα χαρακτηριστικά του μέσου απολύμανσης, όπως είναι το είδος, η δόση και η τεχνική εφαρμογής, είναι οι μεταβλητές που ελέγχονται τεχνικά.

Κατά την επιλογή ενός μέσου απολύμανσης, το πρώτο κριτήριο είναι η ικανότητα του να καταστρέφει τους μικροοργανισμούς. Εκτός όμως απ' αυτό, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κι άλλες ιδιότητες του, όπως αυτές που επηρεάζουν την ποιότητα του επεξεργασμένου νερού, την απόδοση της μονάδας, καθώς επίσης και το κόστος λειτουργίας.

Χλωρίωση

Μία ευρέως διαδεδομένη μέθοδος απολύμανσης είναι η χρήση ελεύθερου χλωρίου, το οποίο είναι τοξικό στους περισσότερους παθογόνους μικροοργανισμούς. Ελεύθερο (ή υπολειμματικό) είναι το χλώριο στην μοριακή του μορφή και τα παράγωγα του (υποχλωριώδες οξύ, υποχλωριώδη ιόντα).

Το χλώριο διατίθεται στο εμπόριο σε αέρια μορφή, σε υγρή (υποχλωριώδες νάτριο) ή σε σκόνη (υποχλωριωδών αλάτων). Η επιλογή της μορφής που θα χρησιμοποιηθεί για την απολύμανση του

νερού εξαρτάται από το κόστος, τις συνθήκες ασφαλείας και τις λειτουργικές ιδιαιτερότητες της εγκατάστασης.

Το μεγάλο προτέρημα της χλωρίωσης, έναντι άλλων απολυμαντικών ουσιών, είναι η ισχυρή δραστικότητα του σε πολλούς παθογόνους μικροοργανισμούς αλλά και η υπολειμματική του δράση (παραμένει σαν προστατευτικός παράγοντας για αρκετό χρονικό διάστημα μέσα στο νερό) (http://www.microlab.gr/water/water_methodoi.htm), (Λέκκας, 1996). Στην **Εικόνα 13** φαίνονται δεξαμενές χλωρίωσης του πόσιμου νερού σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας.



Εικόνα 13. Δεξαμενές χλωρίωσης πόσιμου νερού
(http://www.orange.nsw.gov.au/z_water_supply/water1.htm#water%20filtration),
<http://www.slic2.wsu.edu:82/hurlbert/micro101/pages/Chap17.html#l>

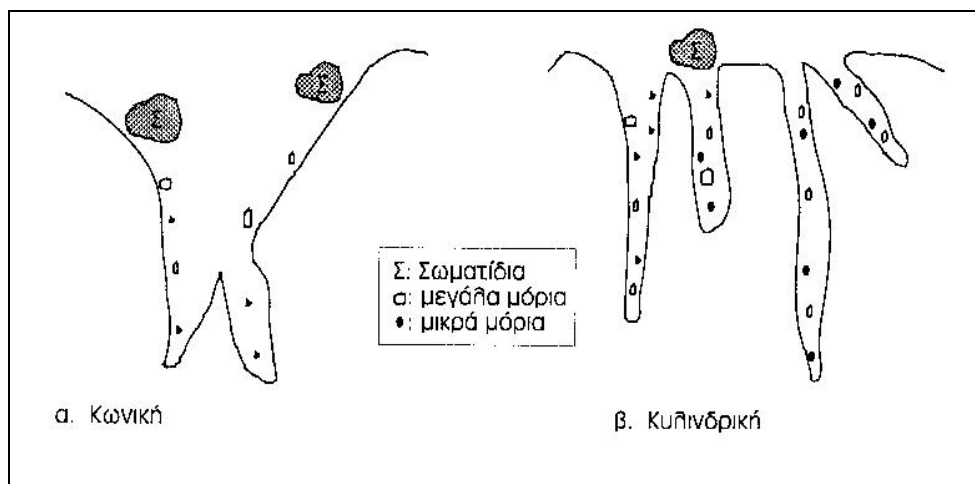
Μειωνέκτημα της χλωρίωσης είναι η δημιουργία παραπροϊόντων, όπως τα τριαλομεθάνια. (http://www.microlab.gr/water/water_methodoi.htm).

Άλλοι μέθοδοι απολύμανσης, είναι η χρησιμοποίηση όζοντος και η χρήση ακτινοβολίας UV, η αποστειρωτική διήθηση, η θερμότητα, η ραδιενεργός ακτινοβολία κ.α.

2.2.5. Απομάκρυνση οργανικών ενώσεων από το νερό με προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα

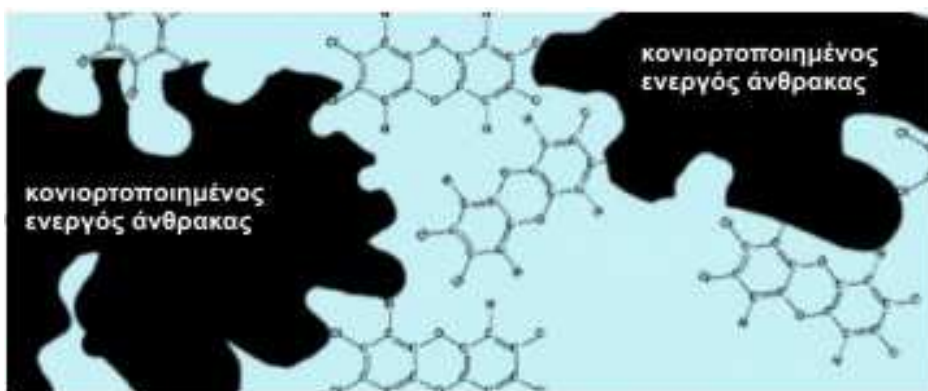
Προσρόφηση είναι γενικά η διεργασία κατά την οποία ορισμένες διαλυμένες ουσίες, που βρίσκονται σε υγρή ή σε αέρια φάση, απομακρύνονται με την προσκόλλησή τους σε μία κατάλληλη (συνήθως στερεή) διεπιφάνεια, κυρίως με φυσικούς ή/και χημικούς δεσμούς, οπότε συμβαίνει αντίστοιχα, η φυσική ή/και η χημική προσρόφηση. Η προσροφούσα φάση λέγεται προσροφητικό μέσο ή απλώς προσροφητικό, ενώ η φάση που προσροφείται, χαρακτηρίζεται σαν προσροφημένη ουσία. Όταν τα σωματίδια της προσροφούμενης ουσίας διεισδύουν μεταξύ των ατόμων, των ιόντων ή των μορίων του προσροφητικού μέσου, τότε θεωρείται ότι λαμβάνει χώρα η απορρόφηση. Σε αρκετές περιπτώσεις έχει διαπιστωθεί ότι η προσρόφηση συνοδεύεται μερικά και από απορρόφηση. Για το λόγο αυτό και για τα δύο αυτά φαινόμενα χρησιμοποιείται ο συνδυαστικός όρος ρόφηση (http://155.207.18.1/~chemtech/foititika/eisxt/kef_10_nero.pdf), (Λέκκας, 1996; Μήτρακας, 2001).

Η μοναδική φύση του ενεργού άνθρακα αυξάνει πάρα πολύ την απόδοση της προσρόφησης. Ο ενεργός άνθρακας μπορεί να περιγραφεί σαν μια άμορφη μάζα γραφίτη, με τυχαία μεγέθη γραφιτικών πλακών. Η δομή είναι πολύ πορώδης με μια ποικιλία από σπασίματα και ρωγμές που φθάνουν σε μοριακά μεγέθη (Εικ. 14).



Εικόνα 14. Σχηματική δομή των πόρων ενεργού άνθρακα (Μήτρακας, 2001).

Ο ενεργός άνθρακας χρησιμοποιείται είτε σε μορφή κόκκων είτε σε μορφή σκόνης. Κατά την επεξεργασία νερού σε σταθερές κλίνες προσρόφησης χρησιμοποιείται συνήθως η μορφή κόκκων (Εικ. 15), επειδή παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία.



Εικόνα 15. Ακανόνιστο εμβαδόν επιφάνειας κονιορτοποιημένου ενεργού άνθρακα
(<http://wunmr.wustl.edu/EduDev/LabTutorials/Water/PublicWaterSupply/PublicWaterSupply.html>)

Η προσρόφηση των συστατικών στο προσροφητικό μέσο πραγματοποιείται δια μέσου των δυνάμεων που έλκουν το προσροφούμενο συστατικό από το διάλυμα στη στερεά επιφάνεια του προσροφητικού. Εναλλακτικά, αν το θεωρήσει κανείς από θερμοδυναμική άποψη το προσροφούμενο συστατικό έχει μικρότερη ελεύθερη ενέργεια στην επιφάνεια του προσροφητικού από ότι στο διάλυμα. Οι δυνάμεις, ή ο μηχανισμός με τον οποίο το προσροφούμενο συστατικό έλκεται στην επιφάνεια του προσροφητικού, μπορεί να είναι φυσικές ή χημικές.

Οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις (δυνάμεις Coulomb) μεταξύ των προσροφημένων μορίων και του προσροφητικού εξηγούν τη φυσική προσρόφηση. Η χημική προσρόφηση ή χημιορρόφηση οφείλεται επίσης σε ηλεκτροστατικές δυνάμεις. Η διαφορά μεταξύ της φυσικής και της χημικής προσρόφησης δεν είναι σαφέστατα ξεκαθαρισμένη. Στην πρώτη είναι σχετικά ασαφές ποιο συστατικό προσροφάται και σε ποια θέση του προσροφητικού, οι δυνάμεις συγκράτησης και η ενέργεια είναι ασθενέστερες και η διεργασία είναι περισσότερο αντιστρεπτή. Στη χημιορρόφηση η έλξη μεταξύ προσροφημένου και προσροφητικού πλησιάζει την έλξη των ομοιοπολικών δεσμών με μικρότερο μήκος και μεγαλύτερη ενέργεια δεσμού.

Η απομάκρυνση των ρυπαντών από το ρεύμα επεξεργασίας συμβαίνει αρχικά με τη φυσική προσρόφηση τους στην επιφάνεια του άνθρακα. Η φυσική προσρόφηση αυξάνεται επιπλέον από την αδυναμία διάλυσης των ρυπαντών στο νερό. Οργανικοί διαλύτες συμπεριλαμβανομένων των χλωριωμένων οργανικών διαλυτών, προσροφούνται εύκολα εξαιτίας της χαμηλής τους διαλυτότητας στο νερό. Ενώσεις με μεγαλύτερο μοριακό βάρος, όπως οι αρωματικές με πολλούς δακτυλίους, προσροφούνται επίσης αποτελεσματικά. Αντίθετα, υδατοδιαλυτές ενώσεις όπως οι αλκοόλες και οι αλδεΐδες προσροφούνται δυσκολότερα (Λέκκας, 1996; Μήτρακας, 2001).

2.2.6. Διαχωρισμοί μεμβρανών

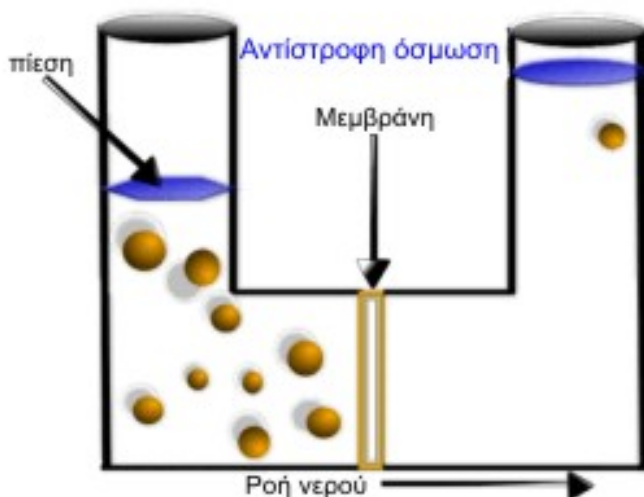
Η διήθηση του νερού στα συμβατικά φίλτρα στρώματος απομακρύνει αιωρούμενα στερεά μέχρι ενός ορισμένου μεγέθους. Το ακριβές αυτό μέγεθος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του φίλτρου και τις συνθήκες λειτουργίας της διήθησης.

Η χρήση των ημιπερατών μεμβρανών στην τεχνολογία καθαρισμού του νερού καθιστά δυνατή την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών, που δεν απομακρύνονται κατά τη διήθηση στρώματος, καθώς και την απομάκρυνση χημικών ενώσεων με μοριακό βάρος από μερικές δεκάδες έως 10^6 . Οι χημικές ενώσεις μπορεί να είναι διαλυμένες ή με τη μορφή κolloειδών και αιωρούμενων στερεών.

Η χρήση ημιπερατών μεμβρανών επιβλήθηκε από την ανάγκη επεξεργασίας νερού με υψηλές συγκεντρώσεις στερεών. Μία από τις πιο γνωστές μέθοδοι χρήσης μεμβρανών είναι η αντίστροφη όσμωση (reverse osmosis) (Λέκκας, 1996).

Αντίστροφη όσμωση

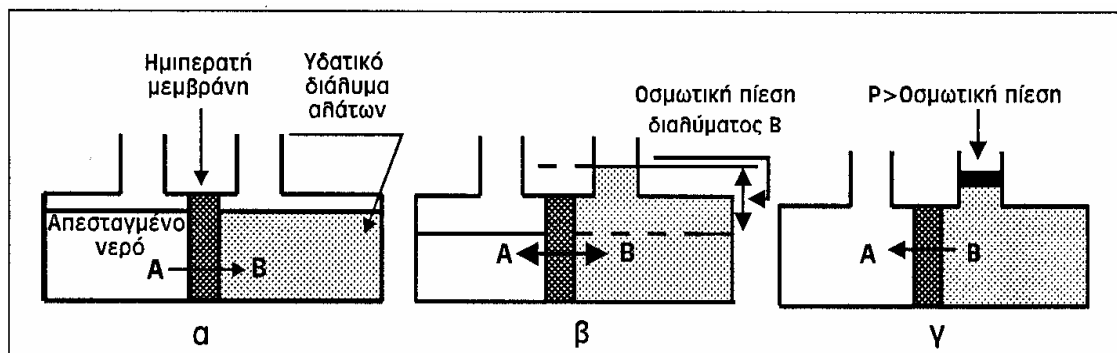
Η αντίστροφη όσμωση (Εικ. 16) είναι μια διεργασία με κινητήρια δύναμη την πίεση, η οποία επιτρέπει το διαχωρισμό των διαλυτών συστατικών από το νερό. Η εφαρμοζόμενη πίεση υπερβαίνει την οσμωτική πίεση του υδατικού διαλύματος έναντι μιας ημιπερατής μεμβράνης, με αποτέλεσμα να εξαναγκάζει τη διέλευση διαμέσου της μεμβράνης καθαρού νερού, το οποίο εγκαταλείπει πίσω του τα διαλυτά συστατικά του.



Εικόνα 16. Αντίστροφη όσμωση
(http://www.aquaticreefsystems.com/About_Reverse_Osmosis.htm)

Όταν διαλύματα διαφορετικής συγκέντρωσης διαχωρίζονται από μία ημιπερατή μεμβράνη, τότε καθαρό νερό από το διάλυμα μικρότερης συγκέντρωσης (Α) διέρχεται διαμέσου της μεμβράνης

προς το διάλυμα μεγαλύτερης συγκέντρωσης (B) (**Εικ. 17α**). Η οσμωτική ροή συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί μία κατάσταση ισορροπίας, η οποία χαρακτηρίζεται από την υψηλότερη στάθμη του διαλύματος μεγαλύτερης συγκέντρωσης (B) (**Εικ. 17β**). Η κατάσταση αυτή ισορροπίας είναι γνωστή ως οσμωτική και η διαφορά της στάθμης των διαλυμάτων αντιστοιχεί στην οσμωτική πίεση του συστήματος των δύο διαλυμάτων. Εάν στο διάλυμα (B) εφαρμοστεί εξωτερική πίεση μεγαλύτερη από την οσμωτική, τότε διέρχεται διαμέσου της μεμβράνης καθαρό νερό προς το διάλυμα (A). Η διεργασία αυτή ονομάζεται αντίστροφη όσμωση.



Εικόνα 17. Σχηματική παράσταση φαινομένου (α) όσμωσης, (β) οσμωτικής ισορροπίας και (γ) αντίστροφης όσμωσης (Μήτρακας, 2001).

Η αντίστροφη όσμωση είναι μία μέθοδος αντιστροφής της φυσικοχημικής διεργασίας που καλείται όσμωση. Είναι μια διεργασία μεμβράνης, κατά την οποία η μεμβράνη δρα σαν μοριακό φίλτρο που συγκρατεί τα διαλυμένα συστατικά ενός υδατικού διαλύματος (Μήτρακας, 2001).

Τα κριτήρια κατασκευής και επιλογής της μεμβράνης είναι:

- Να έχει υψηλό συντελεστή διέλευσης του νερού και υψηλό συντελεστή απόρριψης των αλάτων.
- Να έχει τη μεγαλύτερη δυνατή επιφάνεια σε συνδυασμό με το μικρότερο δυνατό πάχος.

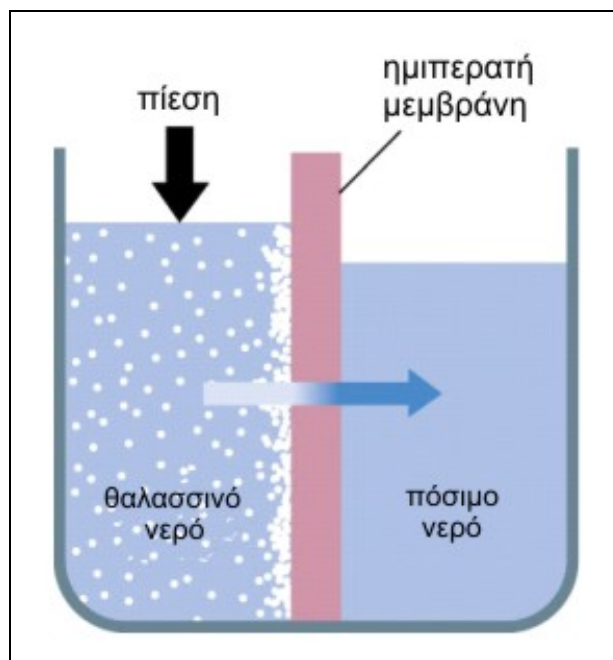
Πλεονεκτήματα της αντίστροφης όσμωσης

- Μικρό ενεργειακό και λειτουργικό κόστος.
- Απαιτείται μικρός χώρος για την εγκατάσταση των μονάδων .
- Οι διεργασίες είναι αυτοματοποιημένες σε μεγάλο βαθμό.
- Συντελεί στην προστασία του περιβάλλοντος γιατί κατά την επεξεργασία δεν χρησιμοποιούνται χημικά αντιδραστήρια ή χρησιμοποιούνται σε πολύ μικρές ποσότητες.
- Αποχωρίζει εκτός από τα άλατα και τις οργανικές ύλες, τα βακτήρια και άλλους μικροοργανισμούς (Σαββάκης, 2002).

Εφαρμογές της αντίστροφης όσμωσης

Μερικές από τις εφαρμογές της αντίστροφης όσμωσης είναι οι εξής:

- Παραγωγή πόσιμου νερού από υφάλμυρο και θαλασσινό νερό (**Εικ. 18**).
- Επεξεργασία νερού για τροφοδοσία λεβήτων.
- Επεξεργασία αποβλήτων για ανακύκλωση νερού.
- Παραγωγή νερού υψηλής καθαρότητας για τις βιομηχανίες φαρμάκων και ηλεκτρονικών.
- Ανάκτηση πολύτιμων συστατικών από το συμπύκνωμα απόρριψης, κ.ά.

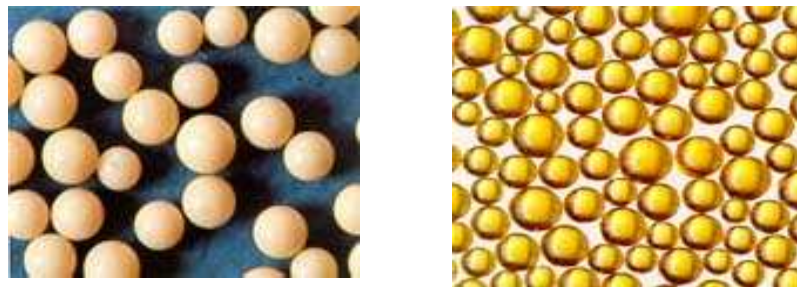


Εικόνα 18. Παραγωγή πόσιμου νερού από θαλασσινό νερό με την επεξεργασία της αντίστροφης όσμωσης (<http://www.bartleby.com/61/imagepages/A4reosmo.html>).

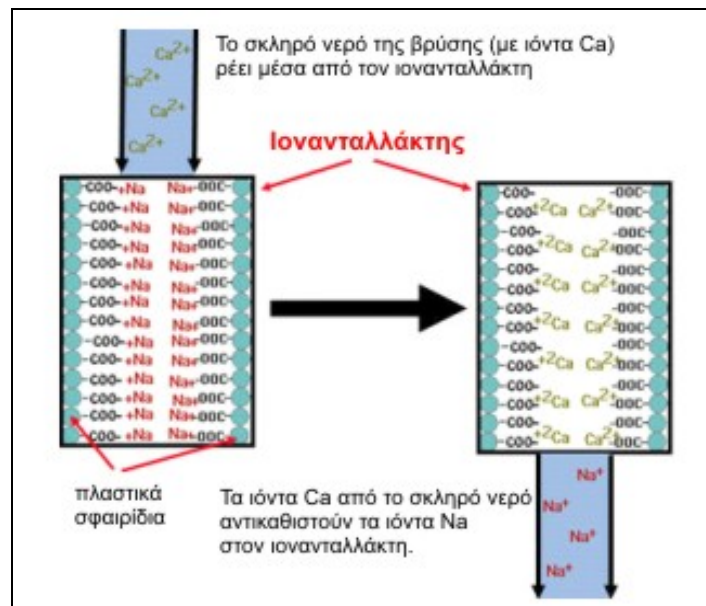
Στη συνέχεια γίνεται μια εκτεταμένη παρουσίαση της διεργασίας της ιοντοεναλλαγής, η οποία χρησιμοποιήθηκε και στο πειραματικό μέρος της εργασίας.

2.2.7. Ιοντοεναλλαγή

Η ιοντοεναλλαγή είναι μία φυσικοχημική διεργασία κατά την οποία επιτυγχάνεται μεταφορά ιόντων από ένα αδιάλυτο στερεό σε μια υγρή φάση ή αντίστροφα. Η διεργασία αυτή εκμεταλλεύεται το πλεονέκτημα ορισμένων φυσικών ή τεχνικών αδιάλυτων υλικών των ρητινών ιοντοεναλλαγής π.χ. ζεόλιθοι ή ρητίνες αντίστοιχα (**Εικ. 19**), ν' ανταλλάσσουν κάποιο ιόν που περιέχουν με κάποιο άλλο που περιέχεται στο νερό που περνάει διαμέσου του υλικού αυτού. Π.χ. εάν από κάποιο ιονανταλλάκτη που περιέχει ιόντα Na^+ και παρουσιάζει εκλεκτικότητα ως προς τα κατιόντα Ca^{++} , περάσει νερό που περιέχει Ca^{++} , τότε τα Ca^{++} θα δεσμευτούν από τον ιονανταλλάκτη, ενώ τα Na^+ θα περάσουν στο νερό (**Εικ. 20**).



Εικόνα 19. Μικροσκοπική όψη ρητινών ιοντοεναλλαγής (<http://www.ionresins.com/top.htm>)



Εικόνα 20. Ιοντοεναλλαγή (<http://wunmr.wustl.edu/EduDev/LabTutorials/Water/FreshWater/hardness.html>)

Δυναμικότητα ρητινών

Δυναμικότητα ανταλλαγής ενός υλικού ιοντοεναλλαγής είναι το βάρος ιόντων ανά μονάδα όγκου της στήλης ιοντοεναλλαγής και εκφράζεται ως γραμμοίσοδύναμα ιόντα/λίτρο στήλης. Διακρίνουμε την Ολική Δυναμικότητα και την Χρήσιμη Δυναμικότητα. Η Ολική δυναμικότητα είναι ιδιότητα της ρητίνης και εκφράζει το σύνολο του ιοντοανταλλακτικού δυναμικού που έχει το υλικό. Χρήσιμη δυναμικότητα είναι το ποσοστό της παραπάνω δυναμικότητας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια δεδομένη περίπτωση και εξαρτάται από την υδραυλική του συστήματος και τη χημική σύσταση κάθε εφαρμογής. Η Χρήσιμη δυναμικότητα, μπορεί να εκφραστεί από τον παρακάτω τύπο (Benefield, 1982; Λέκκας, 1996):

$$X = \frac{C_o V_{op}}{V_r} - \frac{C_o}{V_r} \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i)(V_i)$$

όπου,

X = Χρήσιμη δυναμικότητα (meq/ml)

C_o = Συγκέντρωση ιόντος στην είσοδο (meq/L)

C_e = Συγκέντρωση ιόντος στην έξοδο (meq/L)

C_e/C_o = Λόγος συγκέντρωσης ιόντος στην έξοδο προς την είσοδο ή «διαρροή» (Leakage)

V_r = Όγκος της ρητίνης (ml) (Bed Volume)

V_i = Ο όγκος δείγματος που προσθέτουμε κάθε φορά (L)

V_{op} = Συνολικός όγκος διαλύματος που πέρασε από την ρητίνη (L)

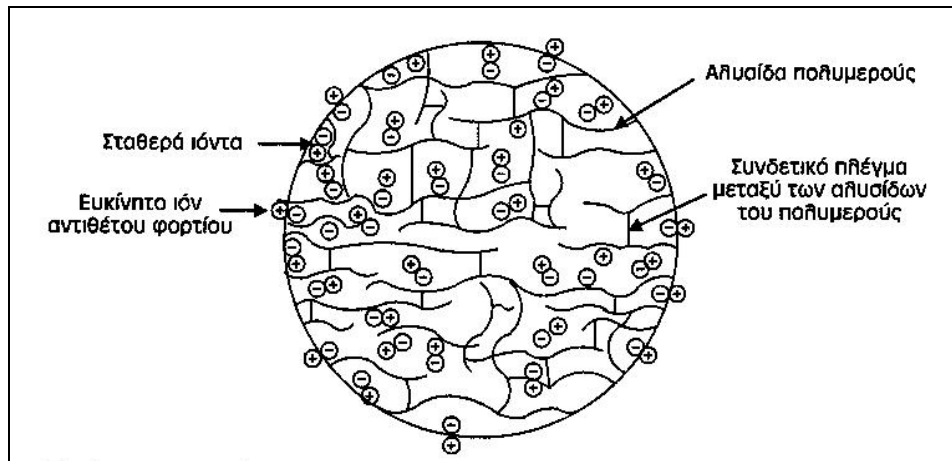
Y_i = Ο λόγος C_e/C_o κάθε φορά που προσθέτουμε δείγμα όγκου V_i (δηλαδή η διαρροή)

Χημική δομή ρητινών ιοντοεναλλαγής

Η πλειοψηφία των ρητινών ιοντοεναλλαγής παρασκευάζεται με συμπολυμερισμό στυρενίου και διβινυλοβενζολίου (DVB). Η κύρια βάση (matrix) που παράγεται με πολυμερισμό είναι συνήθως πολυστυρένιο, ενώ το διβινυλοβενζόλιο χρησιμοποιείται ως συνδετικό πλέγμα μεταξύ των αλυσίδων του πολυμερούς, εξασφαλίζοντας τη σκληρότητα και τη δυσδιαλυτότητά του (Degremont, 1979).

Η δομή των ρητινών έχει τη μορφή σφαιρικών κόκκων, η διάμετρος των οποίων κυμαίνεται από 0,3 έως 1,2 mm. Στην **Εικόνα 22** παρουσιάζεται η δομή μιας ρητίνης, όπου οι αρνητικά φορτισμένες ενεργές ομάδες είναι τοποθετημένες πάνω στην κύρια βάση, ενώ τα αντίθετα φορτισμένα ευκίνητα θετικά ιόντα συνδέονται με ηλεκτροστατικές δυνάμεις με κάθε μία από αυτές.

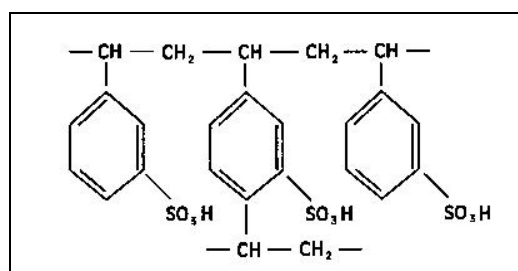
Η ενεργή ομάδα προστίθεται στην κύρια βάση της ρητίνης με χημική αντίδραση και ανάλογα με το είδος και την ισχύ της η ρητίνη χαρακτηρίζεται ως ισχυρά κατιονική (Strong Acid Cationic), ασθενώς κατιονική (Weak Acid Cationic), ισχυρά ανιονική (Strong Basic Anionic) και ασθενώς ανιονική (Weak Basic Anionic) (Μήτρακας, 2001; Λέκκας, 1996; Σαββάκης, 2002).



Εικόνα 22. Η δομή μίας κατιονικής ρητίνης (Μήτρακας, 2001)

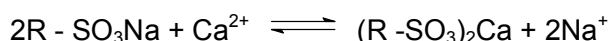
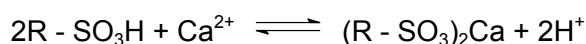
Ισχυρά κατιονικές ρητίνες (SAC)

Ο τύπος του πολυμερούς των ισχυρά κατιονικών ρητινών είναι πολυστυρένιο συμπολυμερισμένο με διβινυλοβενζόλιο, ενώ σαν ενεργή ομάδα έχει την ισχυρά αρνητική σουλφονική ομάδα (Εικ. 23). Το ποσοστό του DVB κυμαίνεται από 4% έως 16%. Όσο αυξάνεται το ποσοστό του συνδετικού πλέγματος, τόσο πιο ανθεκτική γίνεται η ρητίνη στο φαινόμενο της οξείδωσης, καθώς επίσης μειώνεται και η ικανότητα δέσμευσης μονοσθενών ιόντων.



Εικόνα 23. Χημική δομή ισχυρά κατιονικής ρητίνης σε κύκλο υδρογόνου.

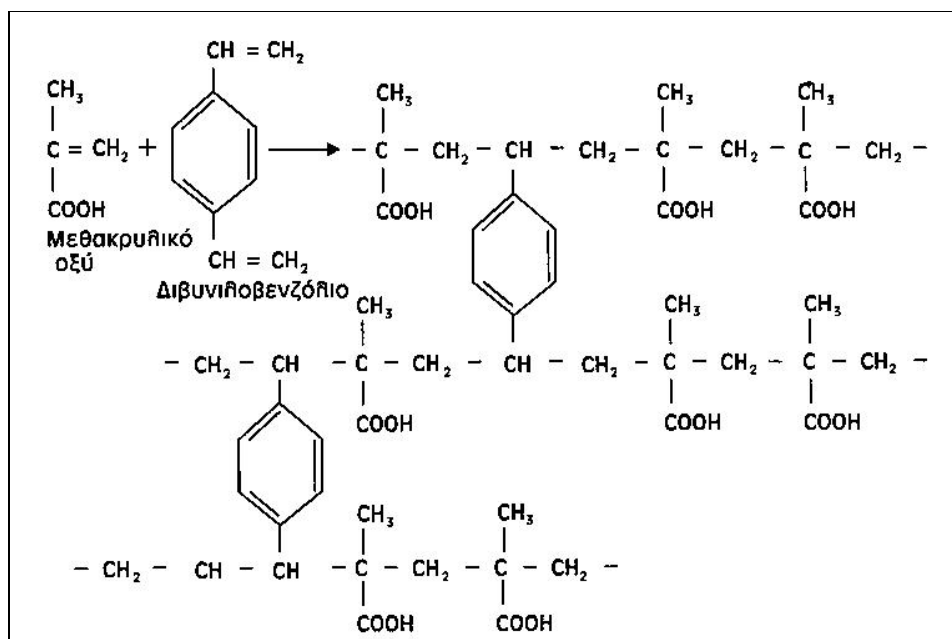
Ανάλογα με τη χρήση της ρητίνης η ενεργή ομάδα βρίσκεται σε ισορροπία είτε με κατιόντα υδρογόνου, είτε με ιόντα νατρίου, οπότε αναφέρεται ότι λειτουργεί σε κύκλο υδρογόνου ή σε κύκλο νατρίου, αντίστοιχα, και η δράση της μπορεί να παρασταθεί με χημικές εξισώσεις ως εξής:



Το R συμβολίζει την κύρια βάση του πολυμερούς που είναι συνδεδεμένη με την ισχυρά αρνητική ενεργή ομάδα. Για το pH του νερού εισόδου δεν υπάρχουν περιορισμοί, ενώ για την αναγέννηση χρησιμοποιείται ισχυρό οξύ (33% w/w HCl), αν η ρητίνη λειτουργεί σε κύκλο υδρογόνου, ή κορεσμένο διάλυμα χλωριούχου νατρίου, αν λειτουργεί σε κύκλο νατρίου, όπως στην περίπτωση της αποσκλήρυνσης (Μήτρακας, 2001; Degremont, 1979).

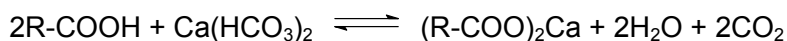
Ασθενώς κατιονικές ρητίνες (WAC)

Η κύρια βάση των ασθενώς κατιονικών ρητινών κατασκευάζεται από ακρυλικό ή μεθακρυλικό οξύ, ενώ ως συνδετικό πλέγμα μεταξύ των αλυσίδων του πολυμερούς χρησιμοποιείται διβινυλοβενζόλιο. Η ενεργός τους ομάδα είναι το καρβοξύλιο ($-COO^-$), το οποίο βρίσκεται σε ισορροπία με ιόντα υδρογόνου. Στην **Εικόνα 24** παρουσιάζεται η χημική δομή μιας ασθενώς κατιονικής ρητίνης, η οποία παρασκευάζεται με τη μέθοδο του πολυμερισμού οργανικών ηλεκτρολυτών.



Εικόνα 24. Παρασκευή ασθενώς κατιονικής ρητίνης με την μέθοδο πολυμερισμού οργανικών ηλεκτρολυτών (Μήτρακας, 2001)

Οι ρητίνες αυτού του είδους εναλλάσσουν το ιόν υδρογόνου συγκρατώντας κυρίως τα ιόντα ασβεστίου και μαγνησίου, τα οποία βρίσκονται σε ισορροπία με όξινα ανθρακικά ιόντα. Σχηματικά η δράση τους μπορεί να παρασταθεί ως εξής:

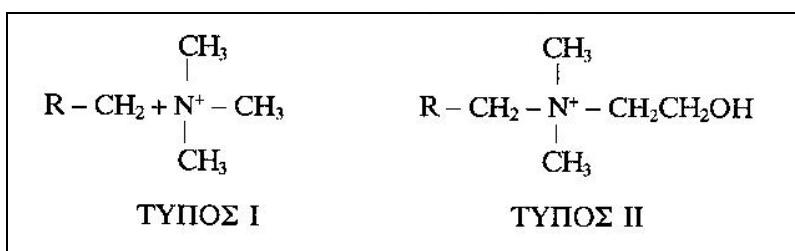


Οι ασθενώς κατιονικές ρητίνες εξαιτίας της ύπαρξης των καρβοξυλικών ομάδων έχουν παρόμοια συμπεριφορά με εκείνη των ασθενών οργανικών οξέων. Επομένως, δεν ιονίζονται σε όξινα διαλύματα και συνεπώς λειτουργούν κανονικά αντικαθιστώντας το ιόν υδρογόνου σε τιμές pH μεγαλύτερες από 4 έως 5. Για το λόγο αυτό οι ασθενώς κατιονικές ρητίνες χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση της ανθρακικής σκληρότητας. Επίσης, πρέπει να τονισθεί ότι παρουσιάζουν μεγαλύτερη εκλεκτικότητα εναλλαγής με δισθενή κατιόντα και μικρότερη με μονοσθενή. Η αντικατάσταση τέλος των ιόντων υδρογόνου από άλλα κατιόντα έχει ως αποτέλεσμα αύξηση του όγκου της ρητίνης ανάλογα με το είδος των ιόντων που αντικαθίστανται (Μήτρακας, 2001; Λέκκας, 1996).

Ισχυρά ανιονικές ρητίνες (SBA)

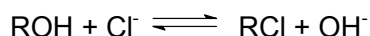
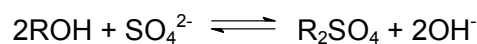
Ο τύπος του πολυμερούς των ισχυρά ανιονικών ρητινών είναι πολυστυρένιο με συνδετικό πλέγμα διβινυλοβενζόλιο, ενώ η ενεργή τους ομάδα είναι κάποιο τεταρτοταγές άζωτο, το οποίο βρίσκεται σε ισορροπία είτε με ιόντα χλωρίου, είτε με ιόντα υδροξυλίου.

Το τεταρτοταγές άζωτο είναι ενωμένο είτε με τρία μεθύλια (τύπος 1), είτε με δύο μεθύλια και μία αιθανόλη (τύπος 2).



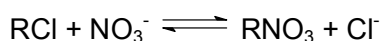
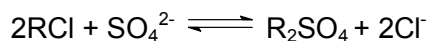
Ο τύπος 1 παρουσιάζει μεγαλύτερη χημική σταθερότητα από τον τύπο 2. Επειδή όμως δεσμεύει ισχυρότερα τα ιόντα, παρουσιάζει μικρότερη ολική ικανότητα δέσμευσης και απαιτεί μεγαλύτερη περίσσεια αντιδραστηρίων αναγέννησης, ενώ χρησιμοποιείται καλύτερα για την απομάκρυνση του πυριτίου και των ασθενών οξέων.

Όταν λειτουργούν σε κύκλο υδροξυλίου, οι ισχυρά ανιονικές ρητίνες δεσμεύουν όλα τα ανιόντα που υπάρχουν στο νερό εναλλάσσοντάς τα με ιόντα υδροξυλίου κατά τις χημικές αντιδράσεις:



και για την αναγέννησή τους χρησιμοποιείται διάλυμα NaOH 30% w/w.

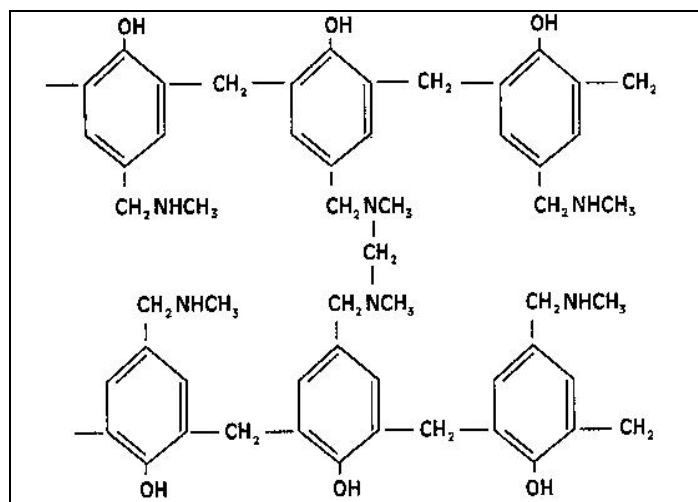
Όταν λειτουργούν σε κύκλο χλωρίου είναι δυνατή η απομάκρυνση των θειικών και των νιτρικών από το νερό κατά τις χημικές αντιδράσεις:



και για την αναγέννηση της ρητίνης χρησιμοποιείται κορεσμένο διάλυμα χλωριούχου νατρίου (Μήτρακας, 2001; Λέκκας, 1996).

Ασθενώς ανιονικές ρητίνες (WBA)

Οι ασθενώς ανιονικές ρητίνες παρασκευάζονται όπως και οι ισχυρά ανιονικές, με τη διαφορά ότι η ενεργή ομάδα είναι μείγμα πρωτοταγούς, δευτεροταγούς, τριτοταγούς και τεταρτοταγούς αμίνης, όπου υπερτερεί σε αναλογία η τριτοταγής. Στην **Εικόνα 25** παρουσιάζεται η χημική δομή αυτού του είδους των ρητινών. Οι ρητίνες αυτές δεσμεύουν μόνο ελεύθερα ανιόντα ισχυρών οξέων, όπως είναι τα Cl^- , τα SO_4^{2-} και τα NO_3^- και για την αναγέννησή τους χρησιμοποιούνται NaOH, NH_4OH ή Na_2CO_3 .



Εικόνα 25. Χημική δομή ασθενώς ανιονικής ρητίνης (Μήτρακας, 2001).

Επισημαίνεται ότι οι ανιονικές ρητίνες παρουσιάζουν μικρότερη χημική σταθερότητα από τις κατιονικές, με αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια των επαναλαμβανόμενων κύκλων λειτουργίας να

παρατηρείται απώλεια αμινών από την κύρια βάση, γεγονός που οδηγεί στη βαθμιαία ελάττωση της συνολικής εναλλακτικής τους ικανότητας (Μήτρακας, 2001; Degremont, 1979).

Φυσικές ιδιότητες ρητινών

Η χρήση των συνθετικών ρητινών ιοντοεναλλαγής σε ευρεία κλίμακα οφείλεται στην ικανότητα προσδιορισμού της συμπεριφοράς εναλλαγής με βάση τη σύνθεσή τους. Κατά τη χρήση τους όμως πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και άλλοι παράγοντες, όπως είναι η ικανότητα αντίστασης της δομής της ρητίνης σε φυσικούς και χημικούς παράγοντες, η οποία και θα της εξασφαλίσει μεγάλη διάρκεια ζωής. Επίσης, η ποιότητα της ρητίνης θα πρέπει να είναι τέτοια, ώστε τυχόν οξειδωτικοί ή θερμικοί παράγοντες να μην επιταχύνουν την καταστροφή της.

➤ *Διόγκωση, περιεκτικότητα σε υγρασία, πυκνότητα* : Η διόγκωση οφείλεται στην εμφάνιση οσμωτικής πίεσης στο εσωτερικό του κόκκου της ρητίνης. Η μάζα του νερού που δεσμεύεται εξαρτάται από δύο κυρίως παραμέτρους, από το ποσοστό αντικατάστασης των ιόντων των ενεργών ομάδων και από το ποσοστό του συνδετικού πλέγματος μεταξύ των αλυσίδων του πολυμερούς. Ο τύπος καθώς και η ποσότητα των ενεργών ομάδων καθορίζει την περιεκτικότητα σε υγρασία μιας ρητίνης, καθώς μεγαλύτερος βαθμός αντικατάστασης συνεπάγεται αυξημένη περιεκτικότητα σε υγρασία. Η συμπεριφορά των ισχυρά κατιονικών και ανιονικών ρητινών είναι τέτοια ώστε παρουσιάζουν τον μεγαλύτερο βαθμό διόγκωσης, όταν λειτουργούν σε κύκλο υδρογόνου και υδροξυλίου αντίστοιχα, ενώ η συμπεριφορά των ασθενώς ανιονικών και κατιονικών ρητινών είναι ακριβώς η αντίθετη. Το ποσοστό του συνδετικού πλέγματος επηρεάζει αντίστροφα τη συγκράτηση υγρασίας από τη ρητίνη. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του συνδετικού πλέγματος τόσο μικρότερη είναι η ποσότητα του νερού που μπορεί να συγκρατηθεί από τη ρητίνη.

Η ποσότητα του νερού που δεσμεύεται από τα διάφορα είδη ρητινών ιοντοεναλλαγής δεν είναι ίδια, γεγονός που συνεπάγεται την ύπαρξη διαφορετικών πυκνοτήτων για κάθε τύπο ρητίνης, αφού η πυκνότητα εξαρτάται από την ποσότητα του δεσμευμένου νερού και την ιονική μορφή της ρητίνης (Μήτρακας, 2001; Λέκκας, 1996; Degremont, 1979).

➤ *Ικανότητα της ρητίνης*: Λέγοντας ικανότητα της ρητίνης εννοούμε την ικανότητά της να εναλλάσσει ιόντα. Συνήθως εκφράζεται σε ισοδύναμα ανά λίτρο ρητίνης (eq/L), ενώ στη βιομηχανία εκφράζεται συνήθως σε γραμμάρια ανθρακικού ασβεστίου ανά λίτρο ρητίνης (g CaCO₃/L). Η ισοδυναμία μεταξύ των μονάδων είναι η εξής:

$$1 \text{ eq/L} = 50 \text{ g CaCO}_3/\text{L}$$

Γνωρίζοντας την τιμή της ικανότητας είναι δυνατός ο υπολογισμός της απαιτούμενης ποσότητας ρητίνης για την επεξεργασία μίας συγκεκριμένης τροφοδοσίας (Μήτρακας, 2001; Λέκκας, 1996).

- *Μέγεθος σωματιδίου:* Το μέγεθος των σωματιδίων επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την κινητική της διεργασίας, καθώς η μείωση του μεγέθους προκαλεί αύξηση του ρυθμού εναλλαγής στην επιφάνεια, ενώ ο ρυθμός διάχυσης στο εσωτερικό είναι αντιστρόφως ανάλογος της δευτέρας δύναμης του μεγέθους του σωματιδίου. Επίσης, το μέγεθος των σωματιδίων επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της στήλης, καθώς όσο μειώνεται το μέγεθος σωματιδίων, τόσο αυξάνεται η πτώση πίεσης ανά μονάδα βάθους της κλίνης (Μήτρακας, 2001; Λέκκας, 1996).
- *Σταθερότητα της ρητίνης:* Όπως προαναφέρθηκε, κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας η ρητίνη υφίσταται αλλαγές στην ιονική της μορφή. Οι διαφορετικές αυτές μορφές κατέχουν διαφορετικούς όγκους με αποτέλεσμα τη συστολή και τη διαστολή της ρητίνης. Όσο υψηλότερη είναι η ικανότητα εναλλαγής, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η διακύμανση του όγκου της ρητίνης και επομένως ο ρυθμός αποσύνθεσής της εξαιτίας των μηχανικών καταπονήσεων. Επίσης, υπερβολικές θερμοκρασίες έχουν αρνητική επίδραση στα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά της. Κατά τη διαδικασία της αναγέννησης προκαλείται φθορά των σωματιδίων της ρητίνης, εξαιτίας της τριβής των σωματιδίων μεταξύ τους αλλά και με τη στήλη. Επίσης, οι διακυμάνσεις της πίεσης προκαλούν σημαντικό σπάσιμο των σωματιδίων. Αποτέλεσμα της διάσπασης αυτής των σωματιδίων είναι η απώλεια των λεπτών σωματιδίων ρητίνης κατά τη διαδικασία της αναγέννησης. Τα παραπάνω φαινόμενα επηρεάζουν όχι μόνο τη διάρκεια ζωής της ρητίνης, αλλά επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό και την απόδοση της μονάδας (Μήτρακας, 2001; Degremont, 1979).

Εκλεκτικότητα ρητινών

Όλα τα διαλυμένα ιόντα δεν απομακρύνονται εξίσου ικανοποιητικά κατά τη διεργασία της ιονανταλλαγής. Ο κάθε ιονανταλλάκτης χαρακτηρίζεται από τη δική του σειρά εκλεκτικότητας, επομένως κάποια διαλυμένα ιόντα που βρίσκονται στο τέλος της σειράς αυτής θα απομακρυνθούν μερικώς μόνον. Ο συντελεστής εκλεκτικότητας εξαρτάται κυρίως από τη χημική φύση, το σθένος και τη συγκέντρωση του προς απομάκρυνση ιόντος, το είδος του ιονανταλλάκτη που θα χρησιμοποιηθεί και το βαθμό κορεσμού του. Στην πράξη, οι συντελεστές

εκλεκτικότητας προσδιορίζονται με εργαστηριακές μετρήσεις και ισχύουν μόνο για τις συνθήκες μέτρησής τους.

Στον **Πίνακα 3** παρουσιάζεται η σειρά εκλεκτικότητας των ιόντων, όπου τα ιόντα που δεσμεύονται κατά προτεραιότητα (υψηλή τιμή του παράγοντα διαχωρισμού) ταξινομούνται στην κορυφή του πίνακα, ενώ αυτά που προτιμούνται λιγότερο στο τέλος. Για παράδειγμα, τιμή του παράγοντα διαχωρισμού $a_{Ca/Na}$ ίση με 1,9 σημαίνει ότι για ίσες συγκεντρώσεις στην υδάτινη φάση το ασβέστιο προτιμάται από τη ρητίνη κατά 1,9/1,0 έναντι του νατρίου. Επίσης, εάν κάποιο νερό περιέχει ασβέστιο, μαγνήσιο, νάτριο, σίδηρο και αμμωνία και πρόκειται να επεξεργασθεί σε μία κλίνη που περιέχει κατιονική ρητίνη σε κύκλο υδρογόνου, τα πρώτα ιόντα που θα εμφανισθούν στην έξοδο της κλίνης θα είναι αυτά του νατρίου και της αμμωνίας. Επομένως, τα δεδομένα εκλεκτικότητας δείχνουν ποιο ιόν έχει την τάση να εκτοπίζει ποιο σε ένα σύστημα ιοντοεναλλαγής και προσδιορίζουν ποια ρητίνη είναι η πιο κατάλληλη για μια συγκεκριμένη εφαρμογή (Μήτρακας, 2001; Λέκκας, 1996).

Πίνακας 3. Εκλεκτικότητα των ιόντων έναντι των ρητινών ¹ (Μήτρακας, 2001).

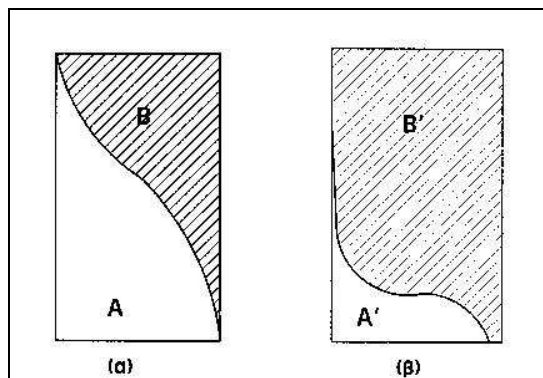
Ισχυρά κατιονική ρητίνη ²		Ισχυρά ανιονική ρητίνη ³	
Κατιόν i	a_i/Na^+	Ανιόν i	a_i/Cl^-
Ra ²⁺	13	CrO ₄ ²⁻	100
Ba ²⁺	5,8	SeO ₄ ²⁻	17
Pb ²⁺	5	SO ₄ ²⁻	9,1
Sr ²⁺	4,8	HSO ₄ ⁻	4,1
Cu ²⁺	2,6	NO ₃ ⁻	3,2
Ca ²⁺	1,9	Br ⁻	2,3
Zn ²⁺	1,8	HAsO ₄ ²⁻	1,5
Fe ²⁺	1,7	SeO ₄ ²⁻	1,3
Mg ²⁺	1,67	HSO ₃ ³⁻	1,2
K ⁺	1,67	NO ₂ ⁻	1,1
Mn ²⁺	1,6	Cl ⁻	1
NH ₄ ⁺	1,3	HCO ₃ ⁻	0,27
Na ⁺	1	CH ₃ COO ⁻	0,14
H ⁺	0,67	F ⁻	0,07

1. Υπολογισμένη για συγκεντρώσεις 0,01 N (TDS = 500 mg/L ως CaCO₃)
2. Ρητίνη από πολυστυρένιο – διβινυλοβενζόλιο με ενεργό ομάδα τη σουλφονική
3. Ρητίνη από πολυστυρένιο – διβινυλοβενζόλιο με ενεργό ομάδα –N⁺(CH₃)₃

Διαρροή

Η αλληλεκτόπιση των στοιχείων συνεχίζεται μέχρι ένα σημείο, από το οποίο και μετά αποκαθίσταται πλήρως η ισορροπία (**Εικ. 21α, β**) με αποτέλεσμα τη μη δέσμευση πλέον της

εναπομένουσας ποσότητας των ιόντων του διαλύματος, η οποία εμφανίζεται στην έξοδο. Η κατάσταση αυτή αποτελεί χαρακτηριστική παράμετρο της ρητίνης και των λειτουργικών συνθηκών, η οποία ονομάζεται διαρροή (Λέκκας, 1996).



Εικόνα 21. Αποκατάσταση ισορροπίας σε κλίνη ρητίνης, (α) δύο στοιχείων ίδιας εκλεκτικότητας και (β) διαφορετικής (Μήτρακας, 2001).

Σχεδιασμός κλινών ρητίνης

Υπάρχουν γενικά, πολλές **τροποποιήσεις** και **συνδυασμοί** των ιονανταλλακτικών μονάδων, που έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο για την κατεργασία του (πόσιμου ή βιομηχανικού) νερού, όσο και των υγρών αποβλήτων. Η ιονανταλλακτική διεργασία μπορεί να λάβει χώρα, είτε σε ξεχωριστές ιονανταλλακτικές στήλες, που περιέχουν διαδοχικά ανιονικές και κατιονικές ρητίνες, τοποθετημένες σε σειρά, είτε και οι δύο ρητίνες μπορούν να αναμιχθούν και να χρησιμοποιηθούν στην ίδια στήλη (μικτό στρώμα) (http://155.207.18.1/~chemtech/foititika/eisxt/kef_10_nero.pdf).

Ανεξάρτητα από τον τύπο της ρητίνης και την εφαρμογή για την οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, κάθε συσκευή ιοντοεναλλαγής αποτελείται συνήθως από ένα κατακόρυφο δοχείο, το οποίο περιέχει τη ρητίνη. Το νερό εισάγεται από την κορυφή της κλίνης μέσα από κατάλληλο σύστημα διανομής, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ομοιόμορφη ροή του νερού σε όλο τον όγκο της ρητίνης. Το νερό ρέει προς τον πυθμένα της κλίνης, όπου και συλλέγεται από κατάλληλο σύστημα συλλογής, το οποίο αποτελείται είτε από ομοιόμορφα κατανεμημένους διαχυτές είτε από διάτρητους σωλήνες κατάλληλου αριθμού και μεγέθους. Επίσης, για τη συγκράτηση της ρητίνης στον πυθμένα του δοχείου χρησιμοποιείται κατάλληλο στρώμα από κοκκώδη αδρανή υλικά, όπως είναι η χαλαζιακή άμμος κ.ά.

Η σχεδιαστική προσέγγιση των κλινών ρητίνης είναι όμοια με αυτή των αμμόφιλτρων και των φίλτρων ενεργού άνθρακα. Οι διαστάσεις της στήλης εξαρτώνται από τη μέθοδο επεξεργασίας που πρόκειται να εφαρμοσθεί. Συνήθως, το καθαρό ύψος της ρητίνης κυμαίνεται από 0,6 m έως 1,2 m (Πίν. 4), ενώ ο υπερκείμενος ελεύθερος χώρος της κλίνης πρέπει να κυμαίνεται από 30% έως 100% του καθαρού ύψους της ρητίνης. Η διάμετρος του δοχείου είναι συνήθως 0,3 m και 3 m, έτσι ώστε η ταχύτητα ροής κενού χώρου να κυμαίνεται από 10-30 m/h (Πίν. 4) (Μήτρακας, 2001).

Πίνακας 4. Παράμετροι σχεδιασμού των κλινών ιοντοεναλλαγής (Μήτρακας, 2001).

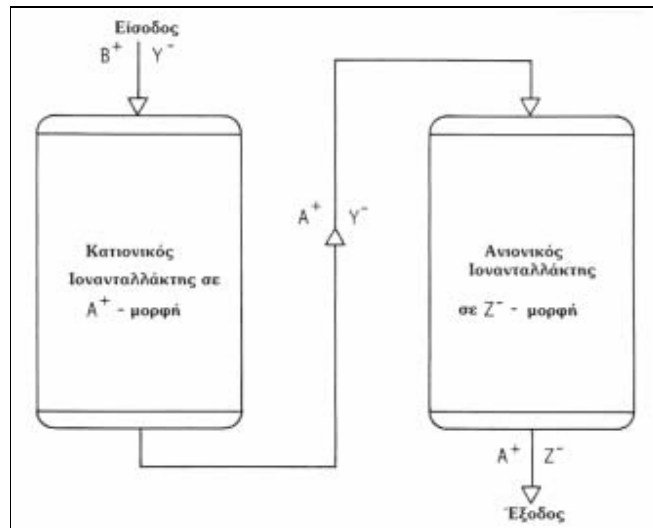
Τύπος ρητίνης	Υδραυλική ροή		Ελάχιστο ύψος ρητίνης (m)	Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	Χρήσιμη ικανότητα (eq/L)
	Μέγιστη (m/h)	Ελάχιστη (m/h)			
Ισχυρά κατιονική	17-30	3-5	0,60-0,75	120	0,8-1,5
Ασθενώς κατιονική	20	3-5	0,60-0,75	120	0,5-2,7
Ισχυρά κατιονική	12-17	3-5	0,75-0,90	38-50	0,4-0,8
Ασθενώς κατιονική	10-17	3-5	0,75-0,90	38	0,8-1,1
Μικτή	20-30	5	0,90-1,20	38	0,3-0,5

Κύκλος λειτουργίας κλινών ιοντοεναλλαγής

Για την απομάκρυνση του συνόλου των διαλυμένων «στερεών» (δηλ. των φορτισμένων συστατικών/ ιόντων) από το προς κατεργασία νερό, πρέπει να χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα τόσο ανιονικές, όσο και κατιονικές ιονανταλλακτικές ρητίνες. Το νερό περνάει πρώτα μέσα από ένα κατιονικό ιονανταλλάκτη, οπότε τα κατιόντα αντικαθίστανται με H^+ , και στη συνέχεια περνάει μέσα από ένα ανιονικό ιονανταλλάκτη, οπότε τα περιεχόμενα ανιόντα αντικαθίστανται από OH^- . Με τον τρόπο αυτό τα διαλυμένα στερεά αντικαθίστανται τελικά από H^+ και OH^- , που μπορούν να αντιδράσουν μεταξύ τους για να δώσουν μόρια νερού (Λέκκας, 1996; http://155.207.18.1/~chemtech/foititika/eisxt/kef_10_nero.pdf).

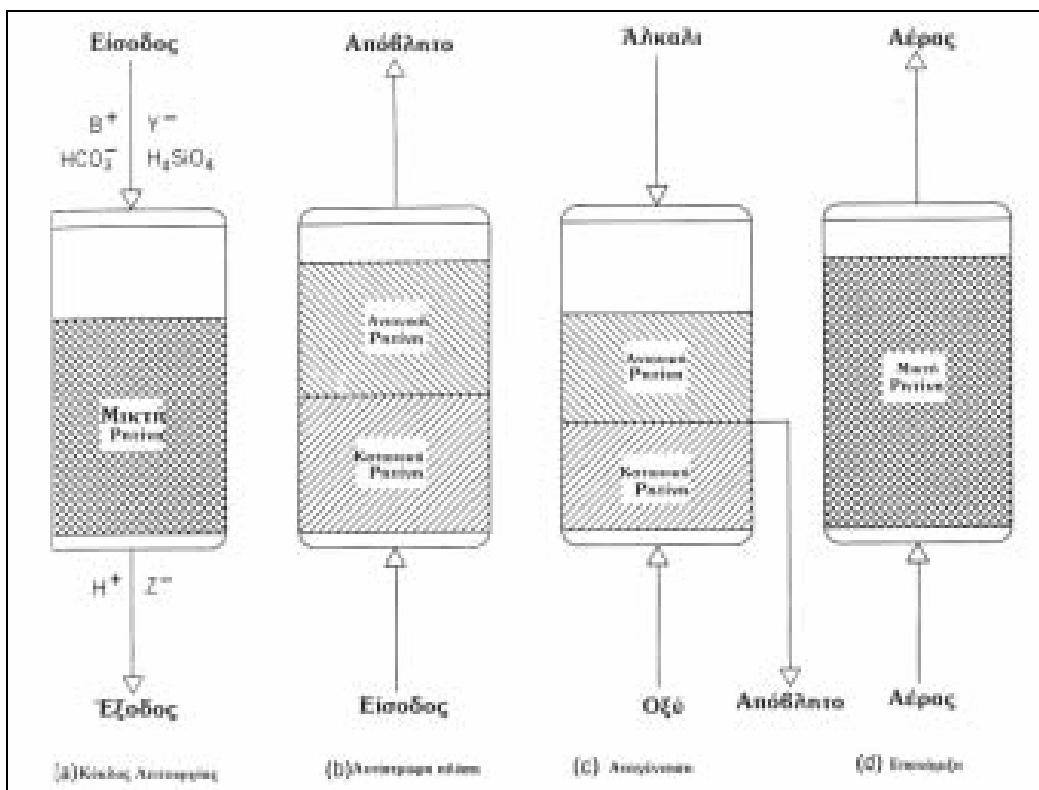
Οι ιονανταλλάκτες είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν σε ασυνεχή (batch) ή συνεχή τρόπο λειτουργίας. Κατά τον *ασυνεχή τρόπο*, η προσθήκη π.χ. της ρητίνης ακολουθείται από την ανάδευση με το προς κατεργασία νερό μέχρι να συμπληρωθεί η αντίδραση ιονανταλλαγής. Στη συνέχεια, η χρησιμοποιημένη ρητίνη απομακρύνεται (διαχωρίζεται) συνήθως με καθίζηση και κατόπιν υφίσταται αναγέννηση, οπότε μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί σε επόμενο κύκλο λειτουργίας. Κατά τη *συνεχή διεργασία*, η ρητίνη χρησιμοποιείται συνήθως μέσα σε μια στήλη

(κολώνα) σαν πληρωτικό υλικό, όπου τοποθετείται και σχηματίζει κατάλληλο στρώμα. Η ροή του προς κατεργασία νερού μέσα από τις στήλες είναι συνήθως από το επάνω μέρος, όπου εισέρχεται υπό πίεση, διαμέσου του στρώματος των ρητινών προς τα κάτω, οπότε το κατεργασμένο (καθαρισμένο) νερό απομακρύνεται τελικά από το κάτω μέρος της στήλης. Στην **Εικόνα 26** παρουσιάζεται σχηματικά η λειτουργία ιονανταλλαγής σε δύο στάδια, που περιγράφηκε προηγουμένως.



Εικ. 26. Λειτουργία ιοντοεναλλαγής σε δυο στάδια
(http://155.207.18.1/~chemtech/foititika/eisxt/kef_10_nero.pdf).

Εάν το νερό που πρόκειται να καθαριστεί από το προς απομάκρυνση ιόν που περιέχει, έρχεται συνεχώς σε επαφή με την ίδια ποσότητα ιονανταλλάκτη, η ιονανταλλακτική ικανότητα του τελευταίου με την πάροδο του χρόνου θα καταναλώνεται, επομένως θα ελαττώνεται. Πρέπει λοιπόν η στήλη αρχικά να ξεπλυθεί με ρεύμα νερού αντίθετης ροής, ώστε να απομακρυνθούν τα παγιδευμένα στερεά και κατόπιν να υποβληθεί σε μία διεργασία που καλείται αναγέννηση, κατά την οποία ο ιονανταλλάκτης μετατρέπεται πάλι στην αρχική του κατάσταση, ερχόμενος σ' επαφή με κατάλληλο χημικό αντιδραστήριο, που έχει την ικανότητα να του επαναπροσδίδει τα ιόντα που έχασε, απομακρύνοντας ταυτόχρονα τα ιόντα που είχαν δεσμευτεί. Η κατιονική ρητίνη αναγεννάται ερχόμενη σε επαφή με κάποιο οξύ, συνήθως υδροχλωρικό ή θειικό, ενώ η ανιονική ρητίνη αναγεννάται συνήθως με διέλυση διαλύματος καυστικού νατρίου. Στην **Εικόνα 27** παρουσιάζονται τα διάφορα στάδια του κύκλου λειτουργίας μιας μικτής ιονανταλλακτικής ρητίνης
(http://155.207.18.1/~chemtech/foititika/eisxt/kef_10_nero.pdf).



Εικόνα 27. Κύρια στάδια του κύκλου λειτουργίας μιας μικτής ιονανταλλακτικής ρητίνης (http://155.207.18.1/~chemtech/foititika/eisxt/kef_10_nero.pdf).

Στην πράξη ο κύκλος λειτουργίας περιλαμβάνει πέντε στάδια. Στο πρώτο στάδιο γίνεται η δέσμευση των ιόντων ενώ τα υπόλοιπα αποτελούν τη διαδικασία αναγέννησης. Τα στάδια αυτά είναι:

- α) Δέσμευση των ιόντων (Exhaustion)
- β) Αντίστροφη πλύση (Backwash)
- γ) Αναγέννηση (Regeneration)
- δ) Αντικατάσταση (Displacement)
- ε) Έκπλυση (Rinse)

Στο πρώτο στάδιο του κύκλου λειτουργίας, όπου επιτυγχάνεται η δέσμευση των ιόντων, η είσοδος του προς επεξεργασία νερού γίνεται από το πάνω μέρος της κλίνης. Με τη βοήθεια του συστήματος κατανομής ρέει ομοιόμορφα μέσα από την κλίνη αντιδρώντας με τη ρητίνη και εξέρχεται από το σύστημα συλλογής στο κάτω μέρος της στήλης.

Το πρώτο στάδιο της διαδικασίας αναγέννησης είναι η αντίστροφη πλύση. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται αναδιάταξη των κόκκων της ρητίνης με τη δημιουργία βαθμιαίας αύξησης του μεγέθους τους από την κορυφή προς τον πυθμένα της κλίνης. Επίσης, στόχος της αντίστροφης πλύσης είναι η απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων που συγκρατήθηκαν από τη ρητίνη κατά το πρώτο στάδιο του κύκλου λειτουργίας. Κατά το σχεδιασμό της κλίνης προβλέπεται υπερκείμενος ελεύθερος χώρος πάνω από τη ρητίνη, ο οποίος κυμαίνεται από 30 έως 100% του συμπιεσμένου όγκου ανάλογα με το είδος της ρητίνης, έτσι ώστε να αποφεύγονται οι απώλειες ρητίνης με συμπαρασυρμό κατά τη διάρκεια της αντίστροφης πλύσης (Λέκκας, 1996; Μήτρακας, 2001).

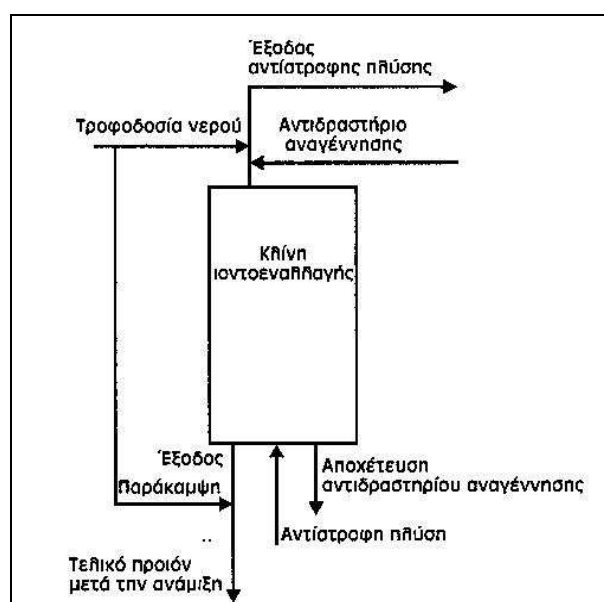
Κατά την αναγέννηση, όπως προαναφέρθηκε, αντιστρέφουμε τη διαδικασία δέσμευσης απομακρύνοντας τα ιόντα που είχε δεσμεύσει η ρητίνη. Η ροή του διαλύματος αναγέννησης γίνεται είτε κατά την ίδια φορά ροής του νερού με αυτή του σταδίου δέσμευσης (ομορροή), είτε κατά την αντίθετη (αντιρροή). Η διεργασία αναγέννησης, όπως άλλωστε και όλες οι αντιδράσεις εναλλαγής, δεν είναι 100% αποδοτική. Επομένως, η υπερκατανάλωση του αντιδραστηρίου αναγέννησης εξαρτάται από τον τύπο της ρητίνης, τις συνθήκες λειτουργίας, καθώς επίσης και τον τρόπο με τον οποίο η ρητίνη φέρεται σε επαφή με το διάλυμα αναγέννησης (**Πίν. 5**).

Στο στάδιο της αντικατάστασης διοχετεύεται ροή νερού μέσα από την κλίνη κατά την ίδια φορά με αυτή του σταδίου της αναγέννησης. Έτσι, εκτοπίζεται το διάλυμα αναγέννησης υποχρεώνοντας όλη την ποσότητά του να διέλθει σε επαφή με την κλίνη. Στο στάδιο της έκπλυσης διοχετεύεται νερό κατά τη ροή της δέσμευσης για την πλήρη απομάκρυνση του αντιδραστηρίου αναγέννησης.

Στην **Εικόνα 28** παρουσιάζεται ένας τυπικός κύκλος λειτουργίας, στον οποίο περιλαμβάνεται ανάμιξη ενός μέρους της τροφοδοσίας με το τελικό προϊόν μετά την ιοντοεναλλαγή. Η διαδικασία ανάμιξης εφαρμόζεται συνήθως στις περιπτώσεις που το παραγόμενο νερό είναι περισσότερο καθαρό από τις απαιτήσεις της κατανάλωσης (Μήτρακας, 2001).

Πίνακας 5. Επίδραση του είδους αναγέννησης στην απαίτηση HCl, μίας ασθενώς κατιονικής ρητίνης που λειτουργεί σε κύκλο υδρογόνου (Μήτρακας, 2001).

Απαιτήσεις οξέος	Είδος αναγέννησης	
	Ομορορή	Αντιρορή
Συγκέντρωση	2-4%	2%
Κατανάλωση (kg/m ³)	96	59
Μέγιστη κατανάλωση ως ποσοστό του θεωρητικού	520%	170%

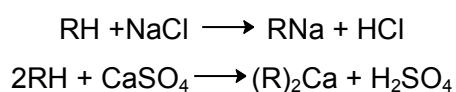


Εικόνα 28. Τυπικός κύκλος λειτουργίας μιας κλίνης ιοντοεναλλαγής (Μήτρακας, 2001).

Εφαρμογές της ιοντοεναλλαγής

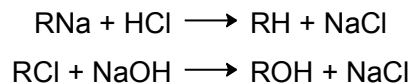
➤ Απιονισμός

Απιονισμός είναι η διεργασία πλήρους απομάκρυνσης όλων των διαλυμένων ιόντων με τη συνδυασμένη χρήση κατιονικών και ανιονικών ρητινών. Στα απλά συστήματα χρησιμοποιείται πρώτα μια ισχυρά κατιονική ρητίνη σε κύκλο υδρογόνου, επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτό εναλλαγή όλων των κατιόντων με ιόντα υδρογόνου, ενώ το παραγόμενο νερό περιλαμβάνει τα οξέα των αλάτων που περιείχε αρχικά.



Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας μια ανιονική ρητίνη σε κύκλο υδροξυλίου, επιτυγχάνεται εναλλαγή των ανιόντων των οξέων από ιόντα υδροξυλίου εξασφαλίζοντας την καθαρότητα του παραγόμενου νερού.

Για την αναγέννηση της ισχυρά κατιονικής ρητίνης χρησιμοποιείται οξύ (συνήθως 33% w/w HCl) και για την ανιονική ρητίνη βάση (συνήθως 30% w/w NaOH).



Η ανιονική ρητίνη μπορεί να είναι είτε μια ασθενώς ανιονική ρητίνη, η οποία μπορεί να συγκρατεί τα ισχυρά ανιόντα αλλά όχι και τα ασθενή, όπως είναι το CO₂ και τα πυριτικά, είτε μια ισχυρά ανιονική ρητίνη, η οποία συγκρατεί τόσο τα ισχυρά όσο και τα ασθενή ανιόντα. Για να επιτύχουμε πλήρη απιονισμό υπάρχουν αρκετοί συνδυασμοί βασικών τύπων ρητινών, οι οποίοι έχουν ως σκοπό τη μείωση της ποσότητας των αντιδραστηρίων αναγέννησης, καθώς επίσης και την αύξηση της καθαρότητας του παραγόμενου νερού (Μήτρακας, 2001; Σαββάκης, 2001).

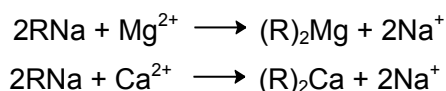
Μικτή κλίση απιονισμού

Η μικτή κλίση περιλαμβάνει μία ισχυρά κατιονική ρητίνη σε κύκλο υδρογόνου και μία ισχυρά ανιονική ρητίνη σε κύκλο υδροξυλίου, αναμειγμένες σε μία κλίση τέλεια με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα. Έτσι, οι κόκκοι των ρητινών ταξινομούνται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να αποτελούν ζεύγη ισχυρά ανιονικής και κατιονικής ρητίνης, με αποτέλεσμα η συνολική κλίση να συμπεριφέρεται σαν ένας άπειρος αριθμός ζευγών σε σειρά, όπου η κάθε μία δεσμεύει τα ιόντα που διαφεύγουν από την προηγούμενη.

Για την αναγέννηση οι δύο τύποι διαχωρίζονται πρώτα με αντίστροφη πλύση. Εξαιτίας της διαφορετικής πυκνότητας η ανιονική ρητίνη ανέρχεται στην κορυφή, ενώ η κατιονική μετατοπίζεται στον πυθμένα της κλίσης. Στη συνέχεια, η μεν ανιονική ρητίνη αναγεννάται με ισχυρά βάση, η δε κατιονική με ισχυρό οξύ και ξεπλένονται χωριστά. Ακολουθεί ανάμειξη των δύο ρητινών με αέρα και η τελική πλύση πριν η κλίση τεθεί σε νέο κύκλο λειτουργίας. Τα συστήματα απιονισμού μικτής κλίσης παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως είναι η εξαιρετική καθαρότητα και το σχεδόν ουδέτερο pH του παραγόμενου νερού, καθώς επίσης η χαμηλή κατανάλωση νερού έκπλυσης. Τα κύρια μειονεκτήματα της μικτής κλίσης είναι η χαμηλή ικανότητα εναλλαγής, καθώς επίσης και η περισσότερο σύνθετη διεργασία λειτουργίας εξαιτίας της απαίτησης διαχωρισμού και ανάμειξης των δύο ρητινών (Degremont, 1979).

➤ **Αποσκήρυση**

Αποσκλήρυνση είναι η διεργασία απομάκρυνσης των ιόντων Ca^{2+} και Mg^{2+} από το νερό, τα οποία είναι ανεπιθύμητα σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές και όχι μόνο επειδή δημιουργούν επικαθίσεις. Η απομάκρυνση της σκληρότητας γίνεται με τη χρήση ισχυρά κατιονικών ρητινών σε κύκλο νατρίου, όπου κατά τη διαδικασία αποσκλήρυνσης η ρητίνη δεσμεύει το ασβέστιο και το μαγνήσιο του νερού τροφοδοσίας εναλλάσσοντάς τα με νάτριο. Η διεργασία αποσκλήρυνσης περιγράφεται από τις αντιδράσεις:



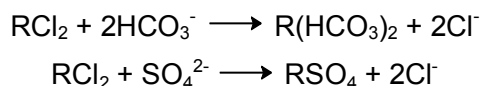
Σε όλες τις περιπτώσεις η αντιστροφή της διεργασίας επιτυγχάνεται με τη διαβίβαση διαμέσου της ρητίνης κορεσμένου διαλύματος χλωριούχου νατρίου (Μήτρακας, 2001; Degremont, 1979).

➤ **Απαλκαλίωση**

Απαλκαλίωση είναι η διεργασία απομάκρυνσης από το νερό των ανθρακικών και όξινων ανθρακικών ιόντων. Επιτυγχάνεται είτε με τη χρήση ισχυρά ανιονικής ρητίνης σε κύκλο χλωρίου, είτε με τη χρήση ασθενώς κατιονικής ρητίνης σε κύκλο υδρογόνου.

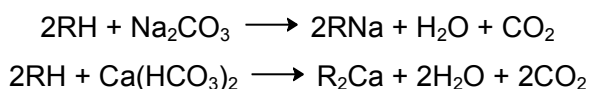
Ισχυρά ανιονική ρητίνη

Είναι η απλούστερη μέθοδος, κατά την οποία χρησιμοποιείται ισχυρά ανιονική ρητίνη τύπου II που αναγεννάται με κορεσμένο διάλυμα NaCl . Οι αντιδράσεις δέσμησης είναι οι εξής:



Ασθενώς κατιονική ρητίνη

Κατά τη δέσμηση των κατιόντων τα ελευθερούμενα κατιόντα H^+ ελαττώνουν την τιμή του pH μεταξύ 4 και 5, οπότε τα ανθρακικά ιόντα και όξινα ανθρακικά διασπώνται προς διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο απομακρύνεται στη συνέχεια με απαερισμό. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι οι εξής:



Άλλες εφαρμογές

Υπάρχει ένα πλήθος άλλων χρήσεων των ιοντοεναλλακτικών ρητινών, μερικές από τις οποίες είναι (<http://www.puroliteusa.com>):

1. Επεξεργασία νερού

- Απομάκρυνση ταννινών
- Απομάκρυνση θειικών
- Απομάκρυνση κολλοειδούς σιδήρου
- Απομάκρυνση ουρανίου
- Απομάκρυνση ραδίου, βαρίου
- Απομάκρυνση βαρέων μετάλλων
- κ.ά.

2. Ειδικές εφαρμογές

- Διαχωρισμός ή απομάκρυνση αλκαλοειδών
- Χρήση στην κατάλυση
- Χρήση στην ιατρική
- Χρήση στην βιομηχανία τροφίμων
- Χρήση στην βιομηχανία ημιαγωγών
- Χρήση στην Φαρμακευτική βιομηχανία
- Χρήση στην βιομηχανία χρωμάτων
- κ.ά.

Πειραματικό μέρος

ΣΚΟΠΟΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το πειραματικό μέρος της πτυχιακής εργασίας. Σκοπός των πειραμάτων ήταν η αποσκλήρυνση, η απαλκαλίωση και η απομάκρυνση του υπολειμματικού χλωρίου από νερό δικτύου ύδρευσης καθώς επίσης και η απομάκρυνση διαφόρων ιόντων, όπως το αργίλιο, ο σίδηρος, ο ψευδάργυρος, τα χλωριόντα και τα αμμωνιακά από υδατικά διαλύματα. Ακόμα, μελετήθηκε η συμπεριφορά των ρητινών σε σχέση με τα ιόντα που ανταλλάχτηκαν, καθώς και η Χρήσιμη Δυναμικότητα τους με βάση τις δεδομένες συνθήκες λειτουργίας τους.

1. ΥΛΙΚΑ

Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν η ισχυρά βασική ανιονική ρητίνη A-510 της Purolite και η ισχυρά όξινη κατιονική ρητίνη υδρογονικού τύπου C-100H της Purolite (**Εικ. 29**).



Εικόνα 29. Στήλες με ρητίνες που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα

1.1. Ισχυρά όξινη κατιονική ρητίνη, C-100H της Purolite

Περιγραφή

Η ρητίνη C-100H (**Εικ. 30**) είναι ένας εξαιρετικής ποιότητας ανταλλάκτης κατιόντων, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον απιονισμό του νερού. Η ρητίνη C-100H παράγεται χρησιμοποιώντας το πολυμερές πολυστυρένιο συμπολυμερισμένο με διβινυλοβενζόλιο 8%. Η σταθερότητα των σφαιριδίων και τουλάχιστον το 95% του συνολικού αριθμού τους, κάνουν την ρητίνη C-100H γέλη εξαιρετικής ποιότητας, χωρίς το πρόσθετο κόστος της αγοράς ενός αναβαθμισμένου κατιονικού προϊόντος. Τα στοιχεία που παρουσιάζονται σε αυτό το σημείο είναι κατάλληλα μόνο για ανταλλαγή κατιόντων κύκλου υδρογόνου (Purolite Technical Data C-100H, 1999). Στον **Πίνακα 6**

παρουσιάζονται τα τυπικά χημικά και φυσικά χαρακτηριστικά της κατιονικής ρητίνης C-100H της Purolite, ενώ ο Πίνακας 7 δείχνει τις συνήθεις συνθήκες λειτουργίας της.



Εικόνα 30. Ισχυρά κατιονική ρητίνη C-100H της Purolite

Πίνακας 6. Τυπικά χημικά και φυσικά χαρακτηριστικά της ρητίνης C-100H της Purolite (Purolite Technical Data C-100H, 1999)

Πολυμερής δομή	Πολυστυρένιο συμπολυμερισμένο με διβινυλοβενζόλιο
Λειτουργικές ομάδες	R-SO ₃ ⁻
Φυσική εμφάνιση	Καθαρά σφαιρικά σωματίδια
Ιοντική μορφή	Υδρογόνο
Σειρά μεγέθους μορίων	+16 mesh <5%, -40 mesh <1%
Διατήρηση ύδατος	49-55%
Περιορισμοί pH	Κανένας
Περιορισμοί θερμοκρασίας	Μέγιστη: 280°F (140°C)
Σύνολο σφαιρικών σωματιδίων	95% minimum
Βάρος φορτίου	50lbs/ft ³ (800 grams/liter)
Ολική δυναμικότητα	1,9 meq/ml ελάχιστο βάρος
Χρώμα	Μαύρο ή κίτρινο κεχριμπαριού

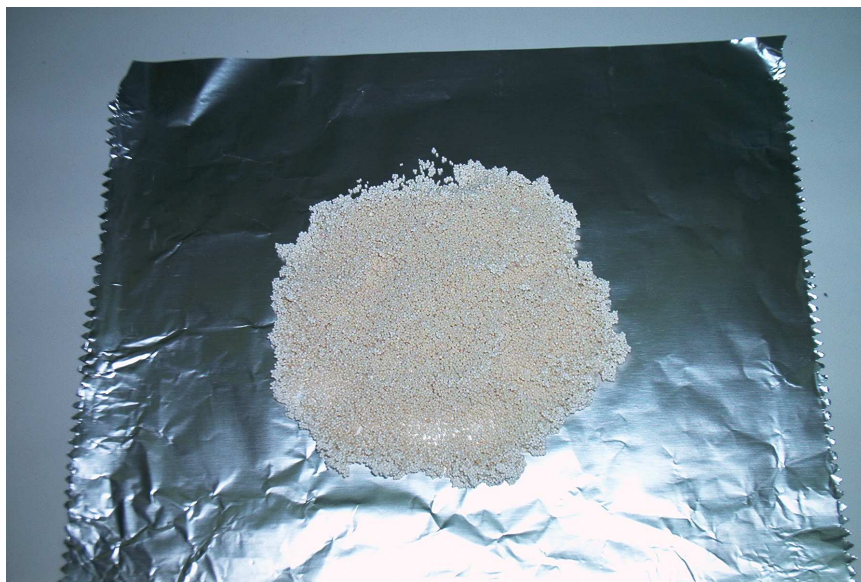
Πίνακας 7. Συνήθεις συνθήκες λειτουργίας της ρητίνης C-100H της Purolite (Purolite Technical Data C-100H, 1999)

Λειτουργία	Ρυθμός/Ροή	Διάλυμα	Λεπτά	Ποσότητα
Λειτουργία	1-5 gpm/ft ³	Εισρέον νερό		
Αντίστροφη πλύση	3-5 gpm/ft ³ (40-60 °F)	Ροή νερού	5-20	10-25 gals/ft ³
Αναγέννηση	0,2-0,8 gpm/ft ³	0,5-5% H ₂ SO ₄ 4-10% HCl	30	4-10 lbs
Ξέπλυμα (αργό)	0,2-0,8 gpm/ft ³	Απιονισμένο νερό	60	20 gals/ft ³
Ξέπλυμα (γρήγορο)	1-5 gpm/ft ³	Απιονισμένο νερό	60	30 gals/ft ³

1.2. Ισχυρά βασική ανιονική ρητίνη A-510 της Purolite

Περιγραφή

Η ρητίνη A-510 της Purolite (**Εικ. 31**) είναι ισχυρά βασική ρητίνη ανταλλαγής ανιόντων, μεγάλου πορώδους. Η μοναδική της δομή έχει τη δυνατότητα να αφαιρεί τα μεγάλα οργανικά μόρια αλλά και να διατηρεί μια υψηλή ικανότητα για την αφαίρεση των ιόντων. Εξαιτίας της χαμηλής βασικότητας της ρητίνης A-510 επιτυγχάνονται καλύτερες αποδόσεις αναγέννησης και υψηλότερες ικανότητες συγκράτησης. Η δομή της ρητίνης A-510 προσφέρει καλή αντίσταση στη χημική επιμόλυνση και μια υψηλή αντίσταση στη φθορά (λόγω τριβής) (Purolite Technical Data A-510, 1999). Στον **Πίνακα 8** φαίνονται τα τυπικά χημικά και φυσικά χαρακτηριστικά της ανιονικής ρητίνης A-510, ενώ στον **Πίνακα 9** παρουσιάζονται οι συνθήκες συνθήκες λειτουργίας της.



Εικόνα 31. Ισχυρά ανιονική ρητίνη A-510 της Purolite

Πίνακας 8. Τυπικά χημικά και φυσικά χαρακτηριστικά της ρητίνης A-510 της Purolite (Purolite Technical Data A-510, 1999)

Πολυμερής δομή	Πολυστυρένιο συμπολυμερισμένο με διβινυλοβενζόλιο
Λειτουργικές ομάδες	$R(CH_3)_2(C_2H_4OH)N^+$
Φυσική εμφάνιση	Σφαιρικά σωματίδια
Ιοντική μορφή	Χλωριούχα
Σειρά μεγέθους μορίων	+1,2 mm <2%, -0,3 mm <2%
Συντελεστής ομοιομορφίας	1,7 (μέσος όρος)
Ενεργό μέγεθος	0,50 mm (μέσος όρος)
Διατήρηση ύδατος	53-60%
Διόγκωση (OH-OH)	15%
Περιορισμοί pH	Κανένας
Περιορισμοί θερμοκρασίας, αναγέννηση	Μέγιστη 40° C σε μορφή OH Μέγιστη 80° C σε μορφή άλατος
Περιορισμοί θερμοκρασίας, λειτουργία	Μέγιστη 40° C
Χημική αντίσταση	Απρόσβλητος από τα αραιά οξέα και τους περισσότερους διαλύτες
Βάρος φορτίου	672 g/l (42 lb/ft ³)
Ολική δυναμικότητα	1,2 meq/ml κατ' ελάχιστο ογκομετρικά
Σύνολο σφαιρικών σωματιδίων	95% minimum

Πίνακας 9. Συνήθεις συνθήκες λειτουργίας της ρητίνης A-510 της Purolite (Purolite Technical Data A-510, 1999)

Λειτουργία	Ρυθμός/Ροή	Διάλυμα	Λεπτά	Ποσότητα
Λειτουργία	8-40 όγκοι κλίνης (BV/hr)	Εκροή από τον ανταλλάκτη κατιόντων		
Αντίστροφη πλύση	6-7,5 m/h (10-20 °F)	Ροή νερού	5-20	1,5-4 BV
Αναγέννηση	2-4 BV/h	2-8% NaOH	60	64-160g NaOH/L 4-10 lb ft ³
Ξέπλυμα (αργό)	2-4 BV/h	Απιονισμένο νερό	60	2-4 BV
Ξέπλυμα (γρήγορο)	8-40 BV/h	Απιονισμένο νερό		3-6 BV

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν δύο γυάλινες στήλες με εσωτερική βάση για κατακράτηση του υλικού, διαπερατή στην υγρή φάση και στρόφιγγα στο κάτω μέρος για απομάκρυνση των διαλυμάτων. Στη μία στήλη προστέθηκε η ανιονική ρητίνη A-510 της Purolite και στην άλλη η κατιονική ρητίνη C-100H της Purolite. Ο όγκος της ρητίνης που προστέθηκε μέσα σε κάθε στήλη ήταν 70 cm^3 (το ύψος της στήλης που κάλυπτε η ρητίνη ήταν περίπου 10 cm, ενώ η διάμετρος της στήλης ήταν 3 cm).

Λειτουργία ρητινών

Τα στάδια λειτουργίας της ρητίνης κάθε φορά ήταν τέσσερα, αναγέννηση, πλύση, διέλευση διαλύματος, τελική πλύση.

Η αναγέννηση της κατιονικής ρητίνης C-100H, πραγματοποιήθηκε κάθε φορά με διέλευση διαλύματος H_2SO_4 5% συνολικού όγκου $V_{\text{t}(\text{H}_2\text{SO}_4)} = 350 \text{ cm}^3$, με ροή $Q = 5 \text{ BV/h}$, για μία ώρα, δηλαδή $Q = 5 \times 70 \text{ cm}^3/\text{h} = 350 \text{ cm}^3/\text{h}$, δηλαδή περίπου $Q \approx 5 - 6 \text{ cm}^3/\text{min}$ (Purolite Technical Data C-100H, 1999).

Η αναγέννηση της ανιονικής ρητίνης A-510 πραγματοποιήθηκε με διέλευση διαλύματος NaOH 8% (80 gr NaOH/L) συνολικού όγκου $V_{\text{t}(\text{NaOH})} = 350 \text{ cm}^3$ με ροή $Q = 5 \text{ BV/h}$ για μία ώρα, δηλαδή $Q = 5 \times 70 \text{ cm}^3/\text{h} = 350 \text{ cm}^3/\text{h}$ ($Q \approx 5 - 6 \text{ cm}^3/\text{min}$) (Purolite Technical Data A-510, 1999). Ειδικότερα στην περίπτωση της απαλκαλίωσης χρησιμοποιήθηκε κορεσμένο διάλυμα NaCl .

Ακολουθούσε έκλουση της ρητίνης με απιονισμένο νερό με ίδια ροή για μία ώρα (ροή $Q = 5 \text{ BV/h} = 5 \times 70 \text{ cm}^3/\text{h} = 350 \text{ cm}^3/\text{h}$, συνολικός όγκος νερού: $V_{\text{t}(\text{H}_2\text{O})} = 350 \text{ cm}^3$). Αμέσως μετά ακολουθούσε έκλουση, με μεγάλη ροή για λίγα λεπτά (ανοίγοντας εντελώς την στρόφιγγα), χρησιμοποιώντας πάλι απιονισμένο νερό συνολικού όγκου $V = 350 \text{ cm}^3$ (5 BV).

Στο κυρίως στάδιο γινόταν διέλευση του αντίστοιχου διαλύματος κάθε φορά, όγκου $V = 1000 \text{ cm}^3$ (περίπου 15 BV), σε χρονικό διάστημα μιας ώρας, με ροή δηλαδή $Q = 15 \text{ BV/h}$ ($\sim 17 \text{ cm}^3/\text{min}$), και συλλογή του από την βάση της στήλης. Τέλος, πραγματοποιούνταν πλύση της ρητίνης με απιονισμένο νερό ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, όπως ήδη αναφέρθηκε. Κάθε φορά, γινόταν ανάλυση-προσδιορισμός της αντίστοιχης χημικής παραμέτρου στο διάλυμα που συλλεγόταν.

2.1. Αποσκλήρυνση νερού

Γενικά

Η σκληρότητα του νερού είναι μια χαρακτηριστική ιδιότητα που οφείλεται στην παρουσία διαλυμένων αλάτων ασβεστίου και μαγνησίου δεσμευμένων με ανθρακικά και δισανθρακικά ιόντα σχηματίζοντας τις ενώσεις $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, CaCO_3 κτλ. Η σκληρότητα μπορεί να προέλθει και από άλλα κατιόντα, συνήθως όμως, η συμμετοχή τους είναι μικρή και είναι δύσκολο να προσδιοριστεί (Ζανάκη, 2001). Εκφράζει την τάση απόθεσης αλάτων (κυρίως ασβεστίου) στα δίκτυα και τις συσκευές από τις οποίες διέρχεται. Χαρακτηριστική ένδειξη της υψηλής συγκέντρωσης, αποτελεί το γεγονός ότι «κόβει» το σαπούνι κατά το πλύσιμο, επειδή σχηματίζονται αδιάλυτα άλατα των λιπαρών οξέων με το ασβέστιο. Οι αποθέσεις αλάτων γίνονται μεγαλύτερες όταν το νερό θερμαίνεται, με αποτέλεσμα εμφράξεις των σωλήνων ύδρευσης, καταστροφή των ηλεκτρικών συσκευών, προβλήματα στη βιομηχανία αλλά και στην υγεία. (WHO, 1993).

Νερά με σκληρότητα 0-100 mg/L (ισοδύναμο CaCO_3) χαρακτηρίζονται ως «μαλακά», από 100-200 ως «μέσης σκληρότητας», από 200-300 ως «σκληρά» και από 300 και πάνω ως «πολύ σκληρά» (Μήτρακας, 2001; Ζανάκη, 2001). Χαμηλή σκληρότητα έχουν τα επιφανειακά νερά, ενώ τα υπόγεια, που έρχονται σε μεγαλύτερη επαφή με τα πετρώματα, έχουν κατά κανόνα μεγαλύτερη. Υψηλή σκληρότητα μπορεί ακόμα να οφείλεται στην μόλυνση του υπόγειου ή του επιφανειακού υδροφορέα με θαλάσσιο νερό.

Η σκληρότητα εκφράζεται με διάφορες μονάδες μέτρησης. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες μονάδες είναι: mg/L CaCO_3 , ή Γαλλικοί, Γερμανικοί και Βρετανικοί βαθμοί (Ζανάκη, 2001). Οι σχέσεις αντιστοιχίας αυτών των μονάδων μέτρησης της σκληρότητας μεταξύ τους, δίνονται στον **Πίνακα 10**.

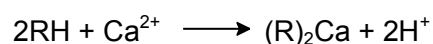
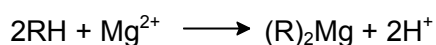
Πίνακας 10. Αντιστοιχία μονάδων μέτρησης σκληρότητας (Ζανάκη, 2001).

	Γερμανικός βαθμός	CaCO_3	Βρετανικός βαθμός	Γαλλικός βαθμός
	D	mg/L		F
1 Γερμ. βαθμός	1,00	17,80	1,25	1,78
1 mg/L CaCO_3	0,058	1,00	0,0702	0,10
1 Βρεταν. Βαθμός	0,798	14,30	1,00	1,43
1 Γαλλικός βαθμός	0,560	10,00	0,702	1,00

Αποσκλήρυνση σε κύκλο Υδρογόνου

Πειραματική διαδικασία

Στόχος του πειράματος ήταν η αποσκλήρυνση νερού δικτύου ύδρευσης σε κύκλο υδρογόνου και ο προσδιορισμός της λειτουργικής δυναμικότητας της κατιονικής ρητίνης (**Εικ. 32**) μετά από διέλευση 25 δειγμάτων νερού βρύσης όγκου 1 L το κάθε ένα με συνθήκες που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2, δηλαδή αναγέννηση με διάλυμα H₂SO₄ 5%, πλύση με απιονισμένο νερό, διέλευση νερού βρύσης και πλύση πάλι με απιονισμένο νερό. Η σκληρότητα του νερού προσδιορίστηκε πριν και μετά την διέλευση κάθε δείγματος με ογκομέτρηση με EDTA (Ξένος, 1998). Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται φαίνονται παρακάτω (Μήτρακας, 2001):



Εικόνα 32. Η κατιονική ρητίνη Purolite C-100H μέσα σε στήλη

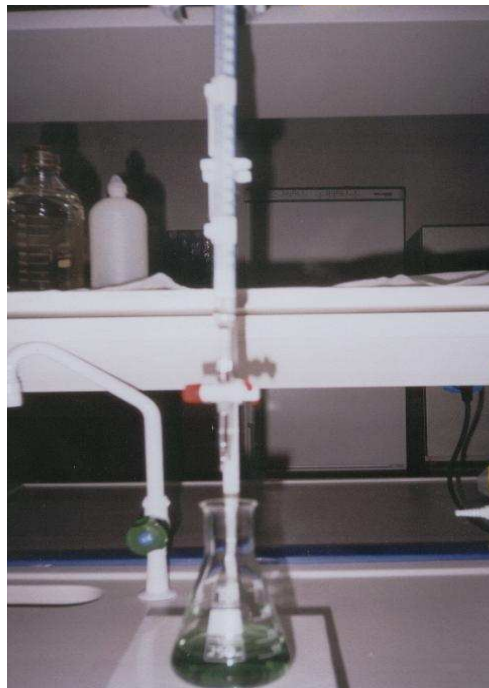
Προσδιορισμός Ολικής Σκληρότητας

Ο προσδιορισμός της σκληρότητας με αυτή τη μέθοδο βασίζεται στην, από κοινού, δέσμευση των ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου από το δινάτριο άλας του αιθυλενο-διάμινο-τετραοξικού οξέος (EDTA) σε αλκαλικό περιβάλλον ($\text{pH}: 10 \pm 0,1$) παρουσία δείκτη Eriochrome Black T (Ζανάκη, 2001).

Αντιδραστήρια

- Διάλυμα EDTA
- Δισκία δείκτη
- Διάλυμα πυκνής αμμωνίας

Σε μια κωνική φιάλη τοποθετήθηκαν 100 ml δείγματος με ογκομετρικό κύλινδρο. Στην κωνική φιάλη προστέθηκε 1 ml πυκνής αμμωνίας. Στη συνέχεια προστέθηκε 1 δισκίο από το δείκτη και ακολούθησε ανάδευση μέχρι να διαλυθεί. Το χρώμα του διαλύματος που προέκυψε ήταν κόκκινο. Ακολούθησε ογκομέτρηση με πρότυπο διάλυμα EDTA 0,01M, μέχρι αλλαγής του κόκκινου χρώματος σε πράσινο (**Εικ. 33**). Ο αριθμός των ml του πρότυπου διαλύματος EDTA που καταναλώθηκαν, δείχνει τη σκληρότητα σε Γαλλικούς βαθμούς. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε τρεις φορές για κάθε δείγμα νερού, πριν και μετά τη διέλευση από τη ρητίνη. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ο μέσος όρος των τριών μετρήσεων.



Εικόνα 33. Η ογκομέτρηση του δείγματος σταμάτησε όταν το χρώμα από κόκκινο έγινε πράσινο.

Έτσι, εκτελώντας την παραπάνω πειραματική διαδικασία για τα 25 δείγματα νερού που επεξεργάστηκαν από την κατιονική ρητίνη C-100H, πήραμε τις μετρήσεις που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 11**. Η συγκέντρωση της σκληρότητας στην είσοδο της ρητίνης, μετρήθηκε μία μόνο φορά, αφού όλα τα δείγματα τα πείραμε την ίδια στιγμή από το δίκτυο ύδρευσης. Η ογκομέτρηση του κάθε δείγματος στην έξοδο της ρητίνης έγινε 3 φορές. Το pH των διαλυμάτων στην είσοδο ήταν περίπου ίσο με 7,78, ενώ στην έξοδο η τιμή μειώθηκε στο 5,84. Στον **Πίνακα 11**, παρουσιάζεται ο μέσος όρος των τριών ογκομετρήσεων του κάθε δείγματος.

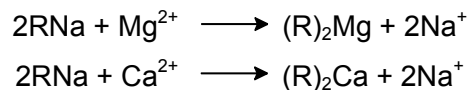
Πίνακας 11. Αποτελέσματα ιοντοεναλλακτικής διαδικασίας αποσκλήρυνσης. Συγκέντρωση εισόδου (C_o) και εξόδου (C_e) από την ρητίνη.

Αριθμός δείγματος	Σκληρότητα (mg/L CaCO ₃)	
	Είσοδος (C_o)	Έξοδος (C_e)
1	136 (13,6 F)	2 (0,2 F)
2	136 (13,6 F)	2,1 (0,21 F)
3	136 (13,6 F)	2,1 (0,21 F)
4	136 (13,6 F)	2,3 (0,23 F)
5	136 (13,6 F)	3 (0,3 F)
6	136 (13,6 F)	3,5 (0,35 F)
7	136 (13,6 F)	6 (0,6 F)
8	136 (13,6 F)	11 (1,1 F)
9	136 (13,6 F)	17 (1,7 F)
10	136 (13,6 F)	22 (2,2 F)
11	136 (13,6 F)	29 (2,9 F)
12	136 (13,6 F)	34 (3,4 F)
13	136 (13,6 F)	39,5 (3,95 F)
14	136 (13,6 F)	44 (4,4 F)
15	136 (13,6 F)	50 (5 F)
16	136 (13,6 F)	55 (5,5 F)
17	136 (13,6 F)	59,5 (5,95 F)
18	136 (13,6 F)	64 (6,4 F)
19	136 (13,6 F)	70 (7 F)
20	136 (13,6 F)	77 (7,7 F)
21	136 (13,6 F)	81 (8,1 F)
22	136 (13,6 F)	88 (8,8 F)
23	136 (13,6 F)	95 (9,5 F)
24	136 (13,6 F)	101 (10,1 F)
25	136 (13,6 F)	109 (10,9 F)

Αποσκλήρυνση σε κύκλο Νατρίου

Πειραματική διαδικασία

Στόχος του συγκεκριμένου πειράματος ήταν η αποσκλήρυνση νερού δικτύου ύδρευσης. Αυτό πραγματοποιήθηκε μετά από διέλευση του νερού βρύσης όγκου ενός λίτρου (1 L) από την κατιονική ρητίνη C-100H της Purolite, σε κύκλο νατρίου (Μήτρακας, 2001), με συνθήκες που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2, δηλαδή αναγέννηση με κορεσμένο διάλυμα NaCl ώστε να αντικατασταθούν τα H⁺ των χαρακτηριστικών ομάδων της ρητίνης με χλωριόντα Na⁺, πλύση με απιονισμένο νερό, διέλευση νερού βρύσης και πλύση πάλι με απιονισμένο νερό. Η σκληρότητα του νερού προσδιορίστηκε πριν και μετά την διέλευση κάθε δείγματος με ογκομέτρηση με EDTA (Ξένος, 1998). Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται φαίνονται παρακάτω (Μήτρακας, 2001):



Προσδιορισμός Ολικής Σκληρότητας

Ο προσδιορισμός της σκληρότητας με αυτή τη μέθοδο βασίζεται στην, από κοινού, δέσμευση των ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου από το δινάτριο άλας του αιθυλενο-διάμινο-τετραοξικού οξέος (EDTA) σε αλκαλικό περιβάλλον (pH:10 ± 0,1) παρουσία δείκτη Eriochrome Black T (Ζανάκη, 2001).

Αντιδραστήρια

- Διάλυμα EDTA
- Δισκία δείκτη
- Διάλυμα πυκνής αμμωνίας

Σε μια κωνική φιάλη τοποθετήθηκαν 100 ml δείγματος με ογκομετρικό κύλινδρο. Στην κωνική φιάλη προστέθηκε 1 ml πυκνής αμμωνίας. Στη συνέχεια προστέθηκε 1 δισκίο από το δείκτη και ακολούθησε ανάδευση μέχρι να διαλυθεί. Το χρώμα του διαλύματος που προέκυψε ήταν κόκκινο. Ακολούθησε ογκομέτρηση με πρότυπο διάλυμα EDTA 0,01M, μέχρι αλλαγής του κόκκινου χρώματος σε πράσινο. Ο αριθμός των ml του πρότυπου διαλύματος EDTA που καταναλώθηκαν, δείχνει τη σκληρότητα σε Γαλλικούς βαθμούς. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε τρεις φορές για το δείγμα νερού, πριν και μετά τη διέλευση από τη ρητίνη. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ο μέσος όρος των τριών μετρήσεων.

Το δείγμα νερού δικτύου ύδρευσης είχε σκληρότητα ίση με 132 mg/L CaCO₃. Μετά την επεξεργασία του στην κατιονική ρητίνη, βρέθηκε ότι είχε συγκέντρωση ίση με 2,8 mg/L CaCO₃. Οι τιμές αυτές φαίνονται στον **Πίνακα 12**.

Πίνακας 12. Αποτελέσματα ιοντοεναλλακτικής διαδικασίας αποσκλήρυνσης. Συγκέντρωση εισόδου (C_ο) και εξόδου (C_ε) από την ρητίνη.

Σκληρότητα (mg CaCO₃/ L)	
Είσοδος (C_ο)	Έξοδος (C_ε)
132	2,8

2.2. Απαλκαλίωση νερού

Γενικά

Ο προσδιορισμός της αλκαλικότητας είναι απαραίτητος για τα πόσιμα νερά, τα νερά που προορίζονται για άρδευση, βιομηχανίες και ιχθυοκαλλιέργειες (Ξένος, 1998). Ως αλκαλικότητα ενός δείγματος νερού, ορίζεται η απαιτούμενη ποσότητα ισχυρού οξέως για την εξουδετέρωση των βάσεων, που περιέχει το δείγμα αυτό (Ζανάκη, 2001).

Η ύπαρξη της αλκαλικότητας του νερού οφείλεται στα ιόντα OH^- , HCO_3^- και CO_3^{2-} . Η αλκαλικότητα εκφράζεται ως συγκέντρωση, σε mg/L CaCO_3 . Υπάρχουν δύο είδη αλκαλικότητας (Κουιμτζής, 1994; Λέκκας, 1996):

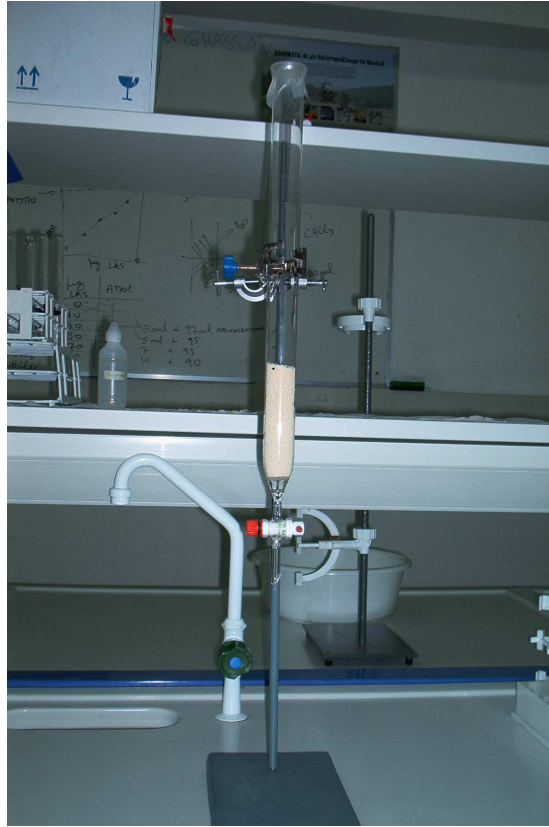
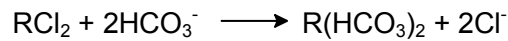
1. Αλκαλικότητα φαινολοφθαλείνης: Η αλκαλικότητα αυτή αντιστοιχεί στην ποσότητα του ισχυρού οξέως που απαιτείται για την εξουδετέρωση της μέχρι $\text{pH} = 8,3$ όπου αλλάζει χρώμα ο δείκτης φαινολοφθαλείνη. Η αλκαλικότητα φαινολοφθαλείνης οφείλεται στην παρουσία ιόντων CO_3^{2-} και ισχυρών βάσεων, OH^- .
2. Ολική αλκαλικότητα: Η αλκαλικότητα αυτή αντιστοιχεί στην ποσότητα του ισχυρού οξέως που απαιτείται για την εξουδετέρωσή της μέχρι $\text{pH} = 4,5$ όπου αλλάζει χρώμα ο δείκτης ηλιανθίνη. Η ολική αλκαλικότητα οφείλεται στην παρουσία όλων των συστατικών που δρουν ως δέκτες πρωτονίων (OH^- , HCO_3^- , CO_3^{2-}).

Η χαμηλή αλκαλικότητα, προσδίδει στο νερό μία αρκετά όξινη δράση, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την διάβρωση των αγωγών. Από την άλλη, η υψηλή αλκαλικότητα έχει ως αποτέλεσμα την τάση εναπόθεσης αλάτων ασβεστίου. Γι' αυτούς τους λόγους, λοιπόν, είναι σημαντικός ο προσδιορισμός και ο έλεγχος της αλκαλικότητας στο πόσιμο νερό.

Πειραματική διαδικασία

Στόχος του συγκεκριμένου πειράματος ήταν η απαλκαλίωση νερού δικτύου ύδρευσης. Αυτό πραγματοποιήθηκε μετά από διέλευση του νερού βρύσης όγκου ενός λίτρου (1 L) από την ανιονική ρητίνη A-510 της Purolite (**Εικ. 34**), σε κύκλο χλωρίου (Μήτρακας, 2001), με συνθήκες που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2, δηλαδή αναγέννηση με κορεσμένο διάλυμα NaCl ώστε να αντικατασταθούν τα υδροξυλιόντα OH^- των χαρακτηριστικών ομάδων της ρητίνης με χλωριόντα Cl^- , πλύση με απιονισμένο νερό, διέλευση νερού βρύσης και πλύση πάλι με απιονισμένο νερό. Η

αλκαλικότητα του νερού προσδιορίστηκε πριν και μετά από την διέλευση χρωματομετρικά (Ξένος, 1998). Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται φαίνονται παρακάτω (Μήτρακας, 2001):



Εικόνα 34. Η ανιονική ρητίνη A-510 της Purolite μέσα σε στήλη

Προσδιορισμός Αλκαλικότητας

Αντιδραστήρια

- I. Διάλυμα HCl 0,1 N
- II. Δείκτης ηλιανθίνης
- III. Δείκτης φαινολοφθαλεΐνης

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε δύο φορές. Μία φορά για το δείγμα βρύσης και άλλη μία για το κατεργασμένο. Με την βοήθεια ογκομετρικού κυλίνδρου, μεταφέρθηκαν 100 ml δείγματος νερού βρύσης σε μία κωνική φιάλη και προστέθηκαν 2-3 σταγόνες φαινολοφθαλεΐνης. Το διάλυμα που προέκυψε ήταν άχρωμο (pH=7,95). Στην συνέχεια, στο ίδιο διάλυμα προστέθηκαν 3 σταγόνες ηλιανθίνης και αμέσως το χρώμα άλλαξε σε κίτρινο. Ακολούθως, έγινε τιτλοδότηση με διάλυμα HCl

0,1 N μέχρι αλλαγής του χρώματος σε ανοιχτό πορτοκαλί (pH=4,5). Τα καταναλωθέντα ml HCl 0,1 N αντιστοιχούν στην ολική αλκαλικότητα ή αλκαλικότητα ως προς την ηλιανθίνη και υπολογίζεται από την σχέση:

$$\text{Ολική Αλκαλικότητα} = \left[\frac{N \times V}{V_{\delta}} \times 50.000 \right] \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$$

όπου

N = κανονικότητα οξέος = 0,1 N

V = καταναλωθέντα ml οξέος = 2,3 ml

V_{δ} = όγκος δείγματος νερού = 100 ml

Άρα, με αντικατάσταση στον παραπάνω τύπο, προκύπτει ότι η ολική αλκαλικότητα στο δείγμα νερού βρύσης είναι 115 mg/L CaCO_3 , ενώ η αλκαλικότητα ως προς την φαινολοφθαλεΐνη είναι μηδέν, αφού το διάλυμα έμεινε άχρωμο. Η αλκαλικότητα ως προς την φαινολοφθαλεΐνη οφείλεται στα ιόντα OH^- και CO_3^{2-} και προσδίδουν ισχυρή αλκαλική αντίδραση στο δείγμα. Αν όμως το δείγμα είναι άχρωμο σημαίνει ότι περιέχονται μόνο HCO_3^- ιόντα. Τα υπόγεια και επιφανειακά νερά έχουν μόνο ιόντα HCO_3^- (Ξένος, 1998).

Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για το κατεργασμένο νερό. Έτσι, μεταφέρθηκαν 100 ml από το δείγμα σε μία κωνική φιάλη και προστέθηκαν 2-3 σταγόνες φαινολοφθαλεΐνης. Το χρώμα του διαλύματος που προέκυψε ήταν ανοιχτό ροζ (pH=8,53). Ακολούθησε τιτλοδότηση με διάλυμα HCl 0,1 N μέχρι το διάλυμα να γίνει άχρωμο. Τα ml του οξέος που καταναλώθηκαν ήταν 0,05 ml, τα οποία αντιστοιχούν στην αλκαλικότητα της φαινολοφθαλεΐνης, η οποία δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Αλκαλικότητα Φαινολοφθαλεΐνης} = \left[\frac{N \times V}{V_{\delta}} \times 50.000 \right] \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$$

όπου,

N = κανονικότητα οξέος = 0,1 N

V = καταναλωθέντα ml οξέος = 0,05 ml

V_{δ} = όγκος δείγματος νερού = 100 ml

Έτσι, με αντικατάσταση στον παραπάνω τύπο προκύπτει ότι η αλκαλικότητα της φαινολοφθαλεΐνης είναι ίση με 2,5 mg/L CaCO_3 . Στη συνέχεια, στην ίδια κωνική φιάλη προστέθηκαν 3 σταγόνες

ηλιανθίνης, με αποτέλεσμα το χρώμα να αλλάξει σε κίτρινο. Έτσι, πραγματοποιήθηκε τιτλοδότηση με διάλυμα HCl 0,1 N μέχρι αλλαγής του χρώματος σε ανοιχτό πορτοκαλί (pH≈4,5). Τα ml του οξέος που καταναλώθηκαν ήταν 0,1. Άρα, με αντικάσταση στον τύπο που μας δίνει την ολική αλκαλικότητα, βρίσκω για το κατεργασμένο δείγμα ότι είναι ίση με 5 mg/L CaCO₃. Στον **Πίνακα 13** φαίνεται η περιοχή αλλαγής του χρώματος του διαλύματος για τον κάθε δείκτη.

Πίνακας 13. Περιοχή αλλαγής χρώματος διαλύματος για κάθε δείκτη

	Περιοχή αλλαγής	Όξινο διάλυμα	Αλκαλικό διάλυμα
Φαινολοφθαλείνη	8-10	Άχρωμο	Φούξια
Ηλιανθίνη	3,1-4,4	Κόκκινο	Κίτρινο

Ακολουθώντας την πειραματική διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω για το ένα δείγμα νερού δικτύου ύδρευσης που επεξεργάστηκε από την κατιονική ρητίνη C-100H της Purolite, πήραμε τις τιμές που παρυσιάζονται στον **Πίνακα 14**, όπου φαίνονται οι συγκεντρώσεις της ολικής αλκαλικότητας σε mg/L CaCO₃, στην είσοδο και στην έξοδο.

Πίνακας 14. Αποτελέσματα ιοντοεναλλακτικής διαδικασίας απαλκαίωσης. Συγκέντρωση εισόδου (C_ο) και εξόδου (C_ε) από την ρητίνη.

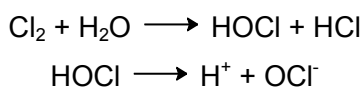
Ολική αλκαλικότητα (mg CaCO₃/ L)	
Είσοδος (C _ο)	Έξοδος (C _ε)
115	7,5

2.3. Απομάκρυνση υπολειμματικού χλωρίου από πόσιμο νερό

Γενικά

Η συνηθέστερη μέθοδος για την απολύμανση των πόσιμων υδάτων, λυμάτων και αποβλήτων, είναι η χλωρίωση. Η χλωρίωση των υδάτων μπορεί να γίνει με χρήση καθαρού χλωρίου, σε αέρια μορφή ή με ενώσεις του χλωρίου, όπως το υποχλωριώδες νάτριο (NaOCl) και το υποχλωριώδες ασβέστιο (Ca(OCl)₂), σε μορφή σκόνης ή διαλύματος (Ζανάκη, 2001).

Κατά τη διάλυση του χλωρίου στο νερό, σχηματίζεται υποχλωριώδες οξύ (HOCl) και υδροχλωρικό οξύ. Το υποχλωριώδες οξύ διίστανται σε υδρογονιόντα και υποχλωριώδη ιόντα (OCl⁻).



Η πιο δραστική μορφή του χλωρίου είναι το HOCl. Αν το δείγμα περιέχει αμμωνία, τότε το υποχλωριώδες οξύ αντιδρά με την αμμωνία και σχηματίζει μονοχλωραμίνες, διχλωραμίνες ή τριχλωραμίνες, ανάλογα με τις ποσότητες χλωρίου και αμμωνίας που εμπεριέχονται στο δείγμα.

Οι μορφές HOCl και OCl⁻ αποτελούν το ελεύθερο υπολειμματικό χλώριο ενώ οι χλωραμίνες αποτελούν το δεσμευμένο υπολειμματικό χλώριο. Το ελεύθερο υπολειμματικό χλώριο μαζί με το δεσμευμένο, αποτελούν το ολικό υπολειμματικό χλώριο.

Για να διαπιστωθεί εάν έχει γίνει επαρκής χλωρίωση στο πόσιμο νερό ή τα επεξεργασμένα λύματα προσδιορίζεται το υπολειμματικό χλώριο. Στο πόσιμο νερό η συγκέντρωση του ελεύθερου υπολειμματικού χλωρίου πρέπει να είναι 0,2-0,5 mg/L (Ζανάκη, 2001).

Πειραματική διαδικασία

Στόχος του συγκεκριμένου πειράματος ήταν η απομάκρυνση υπολειμματικού χλωρίου από νερό δικτύου ύδρευσης. Αυτό πραγματοποιήθηκε μετά από διέλευσή του νερού από την ανιονική ρητίνη A-510, με συνθήκες που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2, δηλαδή αναγέννηση με διάλυμα NaOH 8%, πλύση με απιονισμένο νερό, διέλευση διαλύματος και πλύση πάλι με απιονισμένο νερό. Ο προσδιορισμός πραγματοποιήθηκε πριν και μετά από την διέλευση με το kit προσδιορισμού υπολειμματικού χλωρίου, 1.14801.0001 της Merck.

Προσδιορισμός συγκέντρωσης υπολειμματικού χλωρίου

Στηρίζεται στην αντίδραση της χημικής ένωσης N,N-διαίθυλ-p-φαινυλοδιαμίνη (DPD) καταρχήν με το ελεύθερο υπολειμματικό χλώριο και τη δημιουργία χαρακτηριστικού κόκκινου χρώματος, η ένταση του οποίου είναι ανάλογη της συγκέντρωσης του ελεύθερου χλωρίου (Ζανάκη, 2001).

Στη συνέχεια, η προσθήκη διαλύματος ιωδιούχου καλίου απελευθερώνει το δεσμευμένο υπολειμματικό χλώριο (που βρίσκεται με μορφή χλωραμινών) το οποίο αντιδρά με την ένωση DPD που προϋπάρχει στο διάλυμα και το οποίο αναπτύσσει πιο έντονο κόκκινο χρώμα που η έντασή του είναι ανάλογη του ολικού υπολειμματικού χλωρίου.

Αντιδραστήρια

- Cl₂-1B: ρυθμιστικό διάλυμα φωσφορικών αλάτων για ρύθμιση του pH
- Cl₂-2B: Διάλυμα δείκτη DPD
- Cl₂-3B: Διάλυμα ιωδιούχου καλίου για αποδέσμευση του δεσμευμένου χλωρίου και μετατροπής του σε ελεύθερο.

Για τον προσδιορισμό του υπολειμματικού χλωρίου ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

1. Ξεπλύθηκαν καλά τα δύο φιαλίδια με απιονισμένο νερό.
2. Προστέθηκαν 3 σταγόνες αντιδραστηρίου Cl₂-1B στο άδειο δεξί φιαλίδιο.
3. Προστέθηκε 1 σταγόνα αντιδραστηρίου Cl₂-2B στο ίδιο δεξί φιαλίδιο, και ακολουθήθηκε ελαφρά ανάδευση.
4. Χρησιμοποιώντας τη σύριγγα προστέθηκαν 6 ml νερό προς μέτρηση σε κάθε φιαλίδιο. Στη συνέχεια αναδεύτηκε το δεξί φιαλίδιο με τα αντιδραστήρια.
5. Συγκρίθηκε το χρώμα που έχει αναπτυχθεί στο δεξί φιαλίδιο με τα αντίστοιχα της κλίμακας και προσδιορίστηκε η συγκέντρωση του ελεύθερου υπολειμματικού χλωρίου.
6. Στη συνέχεια προστέθηκε 1 σταγόνα αντιδραστηρίου Cl₂-3B στο ίδιο δεξί φιαλίδιο και ακολούθησε ανάδευση.
7. Μετά από ένα λεπτό συγκρίθηκε το χρώμα που είχε αναπτυχθεί στο δεξί φιαλίδιο με τα αντίστοιχα της κλίμακας και προσδιορίστηκε η συγκέντρωση του ολικού υπολειμματικού χλωρίου.

Με την βοήθεια, λοιπόν του παραπάνω kit μετρήθηκε το ελεύθερο, το ολικό και το δεσμευμένο υπολειμματικό χλώριο, για το ένα δείγμα νερού δικτύου ύδρευσης, οι τιμές των οποίων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 15**.

Πίνακας 15. Αποτελέσματα ιοντοεναλλακτικής διαδικασίας απομάκρυνσης υπολειμματικού χλωρίου από υδατικό διάλυμα. Συγκέντρωση εισόδου (C_o) και εξόδου (C_e) από την ρητίνη

Συγκέντρωση υπολειμματικού χλωρίου (mg/L)		
Υπολειμματικό Χλώριο	Είσοδος (C_o)	Έξοδος (C_e)
Ελεύθερο	0,1	0,05
Ολικό	0,15	0,1
Δεσμευμένο	0,05	0,05

2.4. Απομάκρυνση μετάλλων από υδατικά διαλύματα

2.4.1. Αργίλιο

Γενικά

Το αργίλιο είναι το αφθονότερο μεταλλικό στοιχείο στη φύση, αποτελώντας το 18% του γήινου φλοιού. Συνεπώς, είναι ένα στοιχείο που βρίσκεται παντού, στο νερό, στο έδαφος και τις τροφές. Άλατα του αργιλίου χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις εγκαταστάσεις καθαρισμού του πόσιμου νερού, ως κροκιδωτικά για την καταβύθιση των αιωρούμενων ανόργανων και οργανικών συστατικών, των βακτηρίων και γενικότερα την απομάκρυνση της θολερότητας και του χρώματος. Για τον λόγο αυτό είναι αναγκαίος ο τακτικός έλεγχος της περιεκτικότητας τους στο νερό (WHO, 1998) που προορίζεται ως πόσιμο, σύμφωνα και με την οδηγία 98/83 ΕΚ της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Οδηγία 98/83 ΕΚ, 1998) η οποία επιβάλλει τα όρια του αργιλίου στο πόσιμο νερό να μη ξεπερνάνε τα 200 µg/L.

Πειραματική διαδικασία

Στόχος του συγκεκριμένου πειράματος ήταν η απομάκρυνση αργιλίου από το υδατικό διάλυμα $\text{AlK}_2\text{S}_2\text{O}_8 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Αυτό πραγματοποιήθηκε μετά από διέλευση του διαλύματος (1 L) από την κατιονική ρητίνη C-100H (**Εικ. 35**), με συνθήκες που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2, δηλαδή αναγέννηση με διάλυμα H_2SO_4 5%, πλύση με απιονισμένο νερό, διέλευση διαλύματος και πλύση πάλι με απιονισμένο νερό. Το συγκεκριμένο διάλυμα είχε συγκέντρωση σε ιόντα Al^{+3} 100 mg/L, δηλαδή ζυγίστηκαν 1,7552 g $\text{AlK}_2\text{S}_2\text{O}_8 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ και έπειτα διαλύθηκαν σε 1 L απιονισμένο νερό. Έτσι, γνωρίζοντας την συγκέντρωση των Al^{+3} στο αρχικό διάλυμα, πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός των ιόντων του συγκεκριμένου μετάλλου, μόνο στο κατεργασμένο δείγμα, συμπλοκομετρικά σε ελαφρά αλκαλικό περιβάλλον, $\text{pH} = 8$ (Ξένος, 1998).

Προσδιορισμός συγκέντρωσης Αργιλίου

Αντιδραστήρια

- Διάλυμα EDTA 0,01M
- Eriochrom black T δείκτης
- Διάλυμα NH_3
- Διάλυμα ZnSO_4 0,01M



Εικόνα 35. Το διάλυμα $\text{AlK}_2\text{O}_8\text{S}_2 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ πέρασε από την κατιονική ρητίνη

Αρχικά, αραιώθηκαν 25 ml δείγματος μέχρι τα 100 ml. Το διάλυμα αυτό μεταφέρθηκε σε κωνική φιάλη. Προστέθηκε με την προχοϊδα περίσσεια διαλύματος EDTA 0,01M, περίπου 20 ml. Ρυθμίστηκε το $\text{pH}=8$ με προσθήκη σταγόνων NH_3 . Στη συνέχεια, το διάλυμα θερμάνθηκε για 2 λεπτά, κατόπιν ψύχθηκε και διορθώθηκε η τιμή του pH στο 7-8. Ακολούθως, το διάλυμα ογκομετρήθηκε, παρουσία δείκτη, με ZnSO_4 0,01N μέχρι να μεταβληθεί το χρώμα από πράσινο σε κόκκινο (**Εικ. 36**). Σημειώθηκε η κατανάλωση του διαλύματος ZnSO_4 0,01N (Ξένος, 1998).

Τα ml ZnSO_4 που καταναλώθηκαν κατά την ογκομέτρηση παρουσιάζονται στον **Πίνακα 16**.

Πίνακας 16. Αποτελέσματα ογκομέτρησης

Ογκομέτρηση	ml ZnSO_4 που καταναλώθηκαν
1 ^η	25
2 ^η	26,1
3 ^η	24
	Μέσος όρος: 25,033 ml

Έτσι, λοιπόν, στο τελικό σημείο ισχύει:

$$N_{\text{Al}} V_{\text{Al}} = N_{\text{EDTA}} V_{\text{EDTA}} - N_{\text{Zn}} V_{\text{Zn}} \Leftrightarrow$$

$$\alpha_{\text{Al}} M_{\text{Al}} V_{\text{Al}} = \alpha_{\text{EDTA}} M_{\text{EDTA}} V_{\text{EDTA}} - \alpha_{\text{Zn}} M_{\text{Zn}} V_{\text{Zn}} \Leftrightarrow$$

$$3 \times M_{\text{Al}} V_{\text{Al}} = 2 \times 0,01 \text{ (moles/L)} \times V_{\text{EDTA}} - 2 \times 0,005 \text{ (moles/L)} \times V_{\text{Zn}} \Leftrightarrow$$

$$3 \times M_{\text{Al}} V_{\text{Al}} = 0,01 \text{ (moles/L)} \times (2 \times V_{\text{EDTA}} - V_{\text{Zn}}) \Leftrightarrow$$

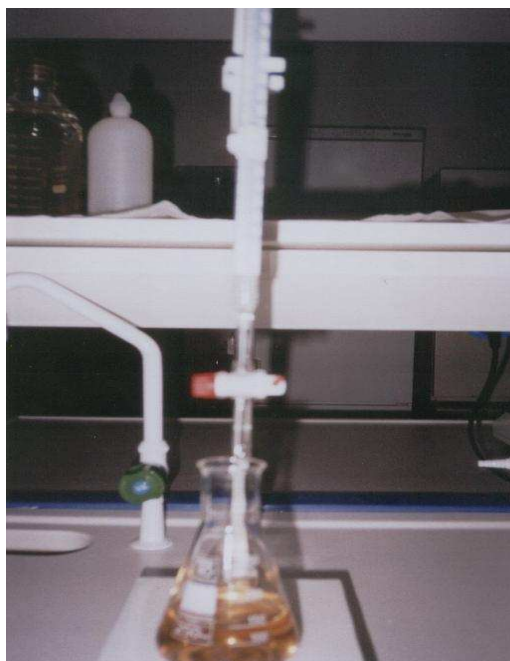
$$3 \times (m_{Al}/MB_{Al})/L = 0,01 \text{ (moles/L)} \times ((2 \times V_{EDTA} - V_{Zn})/V_{Al}) \Leftrightarrow$$

$$m_{Al}/L = 0,01 \times (27/3) \times ((2 \times 20 \text{ ml} - 25,033 \text{ ml})/25 \text{ ml}) \text{ (gr/L)} \Leftrightarrow$$

$$m_{Al} = 0,0528 \text{ gr} \text{ ή } m_{Al} = 52,8 \text{ mg}$$

όπου,

- V_{Al} = Ο όγκος του δείγματος = 25 ml
- V_{EDTA} = Ο όγκος του EDTA 0,01M που καταναλώθηκαν = 20 ml
- V_{Zn} = Ο όγκος του $ZnSO_4$ 0,01N που καταναλώθηκαν = 25,033 ml
- N_{Al} = Η κανονικότητα του δείγματος
- N_{EDTA} = Η κανονικότητα του EDTA
- N_{Zn} = Η κανονικότητα του $ZnSO_4$
- α_{Al} = Αριθμός σθένους Al
- α_{EDTA} = Αριθμός σθένους EDTA
- α_{Zn} = Αριθμός σθένους Zn
- M_{Al} = Μοριακότητα του δείγματος
- M_{EDTA} = Μοριακότητα EDTA
- M_{Zn} = Μοριακότητα του $ZnSO_4$
- m_{Al} = Μάζα ιόντων Αργιλίου στο δείγμα
- MB_{Al} = Μοριακό Βάρος Αργιλίου



Εικόνα 36. Το χρώμα του δείγματος, μετά την ογκομέτρηση, έγινε κόκκινο.

Μετά τους υπολογισμούς βρέθηκε ότι η συγκέντρωση των ιόντων αργιλίου στην έξοδο της ρητίνης ήταν 52,8 mg Al³⁺/L, ενώ στην είσοδο 100 mg Al³⁺/L, για το ένα δείγμα υδατικού διαλύματος που επεξεργάστηκε από την ρητίνη. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον **Πίνακα 17**.

Πίνακας 17. Αποτελέσματα Ιοντοεναλλακτικής διαδικασίας απομάκρυνσης ιόντων αργιλίου από υδατικό διάλυμα. Συγκέντρωση εισόδου (C_ο) και εξόδου (C_ε) από την ρητίνη

Συγκέντρωση Ιόντων Αργιλίου (mg Al ³⁺ /L)	
Είσοδος (C _ο)	Έξοδος (C _ε)
100	52,8

2.4.2. Σίδηρος (II)

Γενικά

Τα άλατα του σιδήρου δεν έχουν αυτά τα ίδια τοξικές ιδιότητες και δεν προκαλούν βλάβες στην υγεία. Εκείνο που κάνει ανεπιθύμητη την παρουσία του σιδήρου στο νερό, είναι η δυσμενής επίπτωση που έχει στις οργανοληπτικές ιδιότητές του. Στο νερό διαλύονται τα άλατα του δισθενούς σιδήρου. Αν αυτά οξειδωθούν στο δίκτυο προς τρισθενή, τότε αποβάλλονται ως οξειδία και προσδίδουν στο νερό χρώμα και θολερότητα. Είναι ακόμη χαρακτηριστική η ιδιάζουσα δυσάρεστη γεύση του νερού που περιέχει σίδηρο. Για τους λόγους αυτούς έχουν θεσπισθεί όρια στην περιεκτικότητα του νερού σε σίδηρο (200 mg/L), ώστε να ελέγχονται τόσο οι οργανοληπτικές ιδιότητες, όσο και η ανάπτυξη ανεπιθύμητων μικροοργανισμών (WHO, 1993; Οδηγία 98/83 ΕΚ).

Πειραματική διαδικασία

Στόχος του συγκεκριμένου πειράματος ήταν η απομάκρυνση σιδήρου από υδατικό διάλυμα $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ και ο προσδιορισμός της Λειτουργικής Δυναμικότητας της κατιονικής ρητίνης μετά από διέλευση δέκα διαλυμάτων σιδήρου ίδιου όγκου και συγκέντρωσης. Αυτό πραγματοποιήθηκε μετά από διέλευση των διαλυμάτων από την κατιονική ρητίνη C-100H, με συνθήκες που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2, δηλαδή αναγέννηση με διάλυμα H_2SO_4 5%, πλύση με απιονισμένο νερό, διέλευση διαλύματος και πλύση πάλι με απιονισμένο νερό. Το συγκεκριμένο διάλυμα είχε συγκέντρωση σε ιόντα Fe^{2+} 100 mg/L, δηλαδή ζυγίστηκαν 0,356 g $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ και έπειτα διαλύθηκαν σε 1 L απιονισμένο νερό. Έτσι, γνωρίζοντας την συγκέντρωση των Fe^{+2} στο αρχικό διάλυμα, πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός των ιόντων του συγκεκριμένου μετάλλου, μόνο στο κατεργασμένο δείγμα, φασματοφωτομετρικά (Ξένος, 1998).

Προσδιορισμός συγκέντρωσης Σιδήρου (II)

Αντιδραστήρια

- HCl 37% κ.β.
- KSCN 15 % κ.ο.
- $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

Προκειμένου να χαραχθεί η καμπύλη αναφοράς για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του αγνώστου διαλύματος παρασκευάστηκε πρώτα το μητρικό διάλυμα. Ζυγίστηκαν 0,712 g

$\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ και μεταφέρθηκαν σε ογκομετρική φιάλη των 500 ml. Το διάλυμα αυτό είχε συγκέντρωση σε ιόντα σιδήρου (Fe^{2+}) 400 mg/L (Ξένος, 1998).

Στη συνέχεια, σε τέσσερις ογκομετρικές φιάλες των 100 ml προστέθηκαν 1,25, 2,5, 5 και 10 ml από το μητρικό διάλυμα αντίστοιχα. Ακόμα, προστέθηκαν σε κάθε ογκομετρική 5 ml HCl αραιωμένο 1:1, 10 ml KSCN και συμπληρώθηκε με αποσταγμένο νερό μέχρι τη χαραγή. Έτσι παρασκευάστηκαν τέσσερα πρότυπα διαλύματα με συγκεντρώσεις 5, 10, 20 και 40 mg/L Fe^{2+} . Στη πέμπτη ογκομετρική φιάλη, προστέθηκαν μόνο 2,5 ml HCl 1:1, 5 ml KSCN και νερό μέχρι τη χαραγή. Αυτό ήταν το τυφλό διάλυμα. Το χρώμα που δημιουργήθηκε ήταν αιματέρυθρο ανοιχτό βαθύ.

Στη συνέχεια, μετρήθηκε στο φασματοφωτόμετρο η απορρόφηση των τεσσάρων προτύπων διαλυμάτων που παρασκευάστηκαν σε μήκος κύματος $\lambda=480$ nm. Με τα αποτελέσματα αυτά κατασκευάστηκε η καμπύλη αναφοράς.

Έπειτα, σε ποτήρι ζέσεως των 100 ml μεταφέρθηκαν με το σιφώνιο 30 ml του δείγματος που πήραμε από την στήλη και προστέθηκαν 5 ml HCl 1:1, 10 ml KSCN 15% και απιονισμένο μέχρι την χαραγή. Ακολούθησε ανακίνηση, μετά από δέκα λεπτά το δείγμα τοποθετήθηκε σε κυβελίδα χαλαζία πλάτους 1 cm και τέλος πραγματοποιήθηκε μέτρηση της απορρόφησης στα 480 nm στο φασματοφωτόμετρο (**Εικ. 37**). Η τιμή της απορρόφησης μεταφέρθηκε στην καμπύλη αναφοράς (**Σχ. 1**) και προσδιορίστηκε η συγκέντρωση του διαλύματος σε ιόντα σιδήρου.

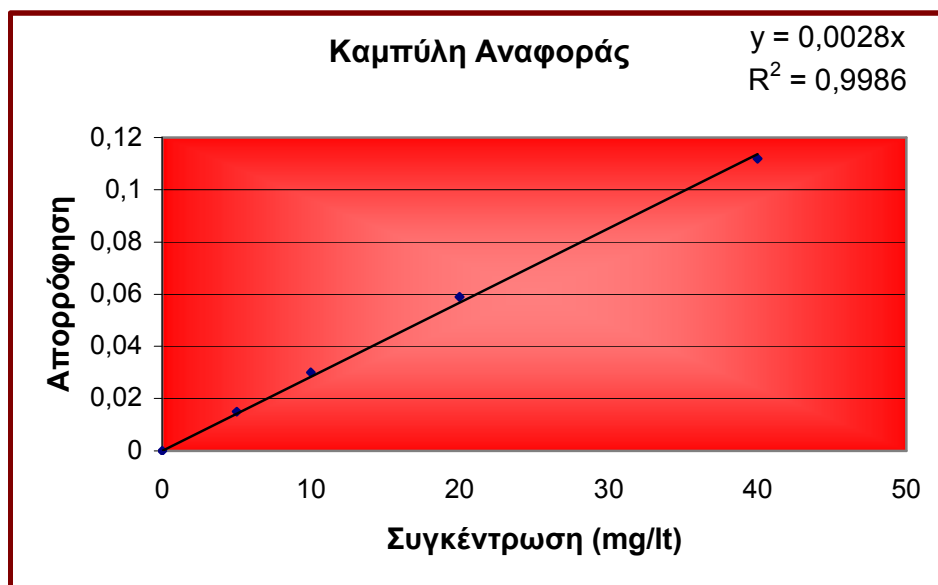


Εικόνα 37. Φασματοφωτόμετρο UV mini τύπου 1240 Shimadzu

Η απορρόφηση των πρότυπων διαλυμάτων, καθώς και των δέκα υδατικών διαλυμάτων που επεξεργάστηκαν από την κατιονική ρητίνη και που μετρήθηκαν στο φασματοφωτόμετρο της **Εικόνας 37**, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 18**. Με βάση τις τιμές της απορρόφησης για τα πρότυπα διαλύματα κατασκευάστηκε η καμπύλη αναφοράς που φαίνεται στο **Σχήμα 1**.

Πίνακας 18. Τιμές Απορρόφησης στο Ορατό

Συγκεντρώσεις (mg/L)	A
0 (τυφλό)	0
5	0,015
10	0,030
20	0,059
40	0,112
Δείγμα 1	0,045
Δείγμα 2	0,052
Δείγμα 3	0,063
Δείγμα 4	0,082
Δείγμα 5	0,100
Δείγμα 6	0,121
Δείγμα 7	0,161
Δείγμα 8	0,193
Δείγμα 9	0,218
Δείγμα 10	0,241



Σχήμα 1: Καμπύλη αναφοράς προτύπων διαλυμάτων σιδήρου

Με την βοήθεια της εξίσωσης $y = 0,0028x$ η οποία αντιστοιχεί στην παραπάνω καμπύλη αναφοράς, προκύπτει η συγκέντρωση σε ιόντα σιδήρου, για κάθε ένα από τα παραπάνω δείγματα. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον **Πίνακα 19**.

Πίνακας 19. Αποτελέσματα ιοντοεναλλακτικής διαδικασίας απομάκρυνσης ιόντων σιδήρου από υδατικό διάλυμα. Συγκέντρωση εισόδου (C_o) και εξόδου (C_e) από την ρητίνη

Αριθμός δείγματος	Συγκέντρωση Ιόντων Σιδήρου (II) (mg/L)	
	Είσοδος (C_o)	Έξοδος (C_e)
1	100	16,07
2	100	18,55
3	100	22,64
4	100	29,47
5	100	35,92
6	100	43,22
7	100	57,64
8	100	68,92
9	100	77,73
10	100	86,02

2.4.3. Ψευδάργυρος

Γενικά

Ο ψευδάργυρος ανήκει στα βασικά ιχνοστοιχεία και ανευρίσκεται σε όλες τις τροφές, καθώς και στο πόσιμο νερό, σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Η κύρια πηγή για τον οργανισμό είναι η τροφή, ενώ η συγκέντρωσή του στα επιφανειακά και υπόγεια νερά κυμαίνεται αντίστοιχα περίπου 50 µg/L, ενώ μπορεί να εμφανισθεί αρκετά υψηλότερη στο δίκτυο, από διάλυση ψευδαργύρου των γαλαβανισμένων σωληνώσεων (WHO, 1993).

Δεν έχουν διαπιστωθεί τοξικές επιπτώσεις από την πρόσληψη ψευδαργύρου μέσω του πόσιμου νερού, έχει διαπιστωθεί όμως ότι συγκεντρώσεις που υπερβαίνουν τα 3 mg/L επηρεάζουν αρνητικά τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του νερού (WHO, 1993). Συμπτώματα από την κατάποση μεγάλων ποσοτήτων (300 έως 12.000 mg) είναι ναυτία, έμετοι, διάρροια, στομαχικοί πόνοι, πονοκέφαλος και υπνηλία. Χρόνια δηλητηρίαση από ψευδάργυρο δεν έχει παρατηρηθεί (Σκληβανιώτης, 1995). Η Οδηγία 98/83 ΕΚ δεν δίνει ανώτατο όριο για την συγκέντρωση του ψευδαργύρου στο πόσιμο νερό.

Πειραματική διαδικασία

Στόχος του πειράματος ήταν η απομάκρυνση ψευδαργύρου από το υδατικό διάλυμα $ZnSO_4$. Αυτό πραγματοποιήθηκε μετά από διέλευση του διαλύματος από την κατιονική ρητίνη C-100H, με συνθήκες που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2, δηλαδή αναγέννηση με διάλυμα H_2SO_4 5%, πλύση με απιονισμένο νερό, διέλευση διαλύματος και πλύση πάλι με απιονισμένο νερό. Το συγκεκριμένο διάλυμα είχε συγκέντρωση σε ιόντα Zn^{2+} 100 mg/L, δηλαδή ζυγίστηκαν 0,24678 g $ZnSO_4 \cdot H_2O$ και έπειτα διαλύθηκαν σε 1 L απιονισμένο νερό. Έτσι, ξέροντας την συγκέντρωση των Zn^{2+} στο αρχικό διάλυμα, πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός των Zn^{2+} μόνο στο κατεργασμένο δείγμα, με ογκομέτρηση με EDTA 0,01M (Ξένος, 1998).

Προσδιορισμός συγκέντρωσης Ψευδαργύρου

Αντιδραστήρια

- Διάλυμα EDTA 0,01M
- Eriochrom black T (δείκτης)
- Ρυθμιστικό διάλυμα NH_3-NH_4Cl [Διαλύθηκαν 17,5 g NH_4Cl σε 142 ml NH_3 και συμπληρώθηκε απιονισμένο νερό μέχρι τα 250 ml]

Αρχικά, αραιώθηκαν 25 ml δείγματος μέχρι τα 100 ml. Το διάλυμα αυτό μεταφέρθηκε σε κωνική φιάλη. Προστέθηκαν 2 ml ρυθμιστικού διαλύματος (pH≈10). Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ογκομέτρηση με EDTA 0,01M, παρουσία δείκτη, μέχρι το χρώμα του διαλύματος από κόκκινο να γίνει πράσινο.

Τα ml EDTA που καταναλώθηκαν για τις τρεις ογκομετρήσεις που έγιναν στο ένα δείγμα που επεξεργάστηκε, φαίνονται στον **Πίνακα 20**.

Πίνακας 20. Αποτελέσματα ογκομέτρησης

Ογκομέτρηση	EDTA (ml)
1 ^η	0,1
2 ^η	0,05
3 ^η	0,05
	Μέσος όρος: 0,066

Έτσι, στο τελικό σημείο ισχύει:

$$N_{Zn} V_{Zn} = N_{EDTA} V_{EDTA} \Leftrightarrow$$

$$\alpha_{Al} M_{Zn} V_{Zn} = \alpha_{EDTA} M_{EDTA} V_{EDTA} \Leftrightarrow$$

$$2 \times M_{Zn} \times 25 \text{ ml} = 2 \times 0,01 \text{ (moles/L)} \times 0,066 \text{ ml} \Leftrightarrow$$

$$(m_{Zn}/MB_{Zn})/L = 0,01 \text{ (moles/L)} \times (0,066/25) \Leftrightarrow$$

$$m_{Zn}/L = 65,4 \text{ (gr/mole)} \times 0,01 \text{ (moles/L)} \times (0,066/25) \Leftrightarrow$$

$$m_{Al} = 0,001716 \text{ gr} \text{ ή } m_{Al} = 1,7 \text{ mg}$$

όπου,

$$V_{Zn} = \text{Ο όγκος του δείγματος} = 25 \text{ ml}$$

$$V_{EDTA} = \text{Ο όγκος του EDTA 0,01M που καταναλώθηκαν} = 0,066 \text{ ml}$$

$$N_{Zn} = \text{Η κανονικότητα του δείγματος}$$

$$N_{EDTA} = \text{Η κανονικότητα του EDTA}$$

$$A_{Zn} = \text{Αριθμός σθένους Zn}$$

$$\alpha_{EDTA} = \text{Αριθμός σθένους EDTA}$$

$$M_{Zn} = \text{Μοριακότητα του δείγματος}$$

$$M_{EDTA} = \text{Μοριακότητα EDTA}$$

$$M_{Zn} = \text{Μάζα ιόντων Zn στο δείγμα}$$

$$MB_{Zn} = \text{Μοριακό Βάρος Zn}$$

Μετά τους υπολογισμούς βρέθηκε ότι η συγκέντρωση των ιόντων ψευδαργύρου στην έξοδο της ρητίνης ήταν 1,7 mg Zn²⁺/L, ενώ στην είσοδο 100 mg Zn²⁺/L, για το ένα δείγμα υδατικού διαλύματος που επεξεργάστηκε από την ρητίνη. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον **Πίνακα 21**.

Πίνακας 21. Αποτελέσματα ιοντοεναλλακτικής διαδικασίας απομάκρυνσης ιόντων ψευδαργύρου από υδατικό διάλυμα. Συγκέντρωση εισόδου (C₀) και εξόδου (C_e) από την ρητίνη

Ιόντα Ψευδαργύρου (mg/L)	
Είσοδος (C ₀)	Έξοδος (C _e)
100	1,7

2.5. Απομάκρυνση ιόντων Cl⁻ από υδατικό διάλυμα

Γενικά

Το χλώριο υπό την μορφή χλωριόντων, αποτελεί ένα από τα βασικά ανόργανα ανιόντα των υδάτων και αποβλήτων. Στα φυσικά επιφανειακά και υπόγεια νερά, η συγκέντρωση των χλωριόντων διαφέρει και εξαρτάται κυρίως από τη χημική σύσταση των πετρωμάτων, από τα οποία διέρχεται το νερό. Στη χώρα μας, σε πολλές περιοχές, παρατηρούνται υψηλές τιμές χλωριόντων στα υπόγεια νερά. Υψηλές τιμές χλωριόντων παρατηρούνται και σε όλα σχεδόν τα υπόγεια νερά των παράκτιων περιοχών, λόγω των υπεραντλήσεων και της προέλασης του θαλάσσιου μετώπου.

Υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων, αλλοιώνουν τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του πόσιμου νερού, αυξάνουν το ρυθμό διάβρωσης μεταλλικών επιφανειών και έχουν βλαβερές συνέπειες στην ανάπτυξη των περισσότερων φυτών.

Το ανώτατο επιτρεπτό όριο χλωριόντων στο πόσιμο νερό, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή νομοθεσία (98/83/ΕΚ), είναι 200 mg/L.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για τον προσδιορισμό των χλωριόντων. Η μέθοδος νιτρικού αργύρου είναι η παλαιότερη και συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος, η οποία χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα και είναι κατάλληλη για σχετικά καθαρά νερά με συγκεντρώσεις χλωριόντων από 1,5 ως 100 mg/L.

Πειραματική διαδικασία

Στόχος του πειράματος ήταν η απομάκρυνση ιόντων Cl⁻ από το υδατικό διάλυμα NaCl και ο προσδιορισμός της Λειτουργικής Δυναμικότητας της ανιονικής ρητίνης μετά από διέλευση 15 διαλυμάτων χλωρίου ίδιου όγκου και συγκέντρωσης. Αυτό πραγματοποιήθηκε μετά από διέλευση του διαλύματος από την ανιονική ρητίνη A-510, με συνθήκες που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2, δηλαδή αναγέννηση με διάλυμα NaOH 8%, πλύση με απιονισμένο νερό, διέλευση διαλύματος και πλύση πάλι με απιονισμένο νερό. Το συγκεκριμένο διάλυμα είχε συγκέντρωση σε ιόντα Cl⁻ 100 mg/L, δηλαδή ζυγίστηκαν 0,163 g NaCl και έπειτα διαλύθηκαν σε 1 L απιονισμένο νερό. Έτσι, ξέροντας την συγκέντρωση των Cl⁻ στο αρχικό διάλυμα, πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός των Cl⁻ μόνο στο κατεργασμένο δείγμα, με την μέθοδο νιτρικού αργύρου (Ζανάκη, 2001).

Προσδιορισμός συγκέντρωσης Cl

Σε ουδέτερο ή ελαφρά αλκαλικό περιβάλλον (pH = 8,3) και παρουσία δείκτη χρωμικού καλίου, γίνεται καταβύθιση των χλωριόντων, με σχηματισμό χλωριούχου αργύρου και χρωμικού αργύρου. Ο χλωριούχος άργυρος έχει καταβυθιστεί ποσοτικά όταν αρχίζει να εμφανίζεται το κόκκινο χρώμα του χρωμικού αργύρου (Ζανάκη, 2001).

Αντιδραστήρια

- Πρότυπο διάλυμα νιτρικού αργύρου AgNO₃ 0,01N
- Δείκτης χρωμικού καλίου K₂CrO₄ 2%

Σε μία κωνική φιάλη των 250 ml, προστέθηκαν 25 ml από το δείγμα, 25 ml απιονισμένο νερό και 1 ml δείκτη K₂CrO₄. Στη συνέχεια, έγινε ογκομέτρηση με πρότυπο διάλυμα νιτρικού αργύρου AgNO₃ 0,01N, μέχρις ότου το χρώμα από κίτρινο να πάρει μια ελαφρά απόχρωση προς το κόκκινο. Για το τυφλό προστέθηκαν σε μία κωνική φιάλη 25 ml απιονισμένο νερό, 1 ml K₂CrO₄ και 0,25 g CaCO₃. Ακολούθως, έγινε ογκομέτρηση με πρότυπο διάλυμα νιτρικού αργύρου όπως παραπάνω. Το τυφλό προσδιορίστηκε μόνο μία φορά, ενώ η ογκομέτρηση των δειγμάτων τρεις φορές και υπολογιζόταν ο μέσος όρος. Η συγκέντρωση των χλωριόντων δίνεται από τη σχέση (Ζανάκη, 2001):

$$\text{mg/LCl} = \frac{(A - B) \times N \times 35.450}{C}$$

όπου:

A = ml διαλύματος AgNO₃ που καταναλώθηκαν για το δείγμα

B = ml διαλύματος AgNO₃ που καταναλώθηκαν για το τυφλό δείγμα

N = η κανονικότητα του διαλύματος AgNO₃

C = ml δείγματος

Η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου στην είσοδο της ρητίνης ήταν γνωστή, όπως έχει ήδη αναφερθεί και ίση με 100 mg/L. Με βάση τον παραπάνω τύπο, υπολογίστηκε η συγκέντρωση των χλωριόντων που πήραμε στην έξοδο της ρητίνης για τα 15 δείγματα που επεξεργάστηκαν. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον **Πίνακα 22**.

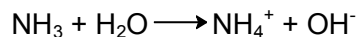
Πίνακας 22. Αποτελέσματα Ιοντοεναλλακτικής διαδικασίας απομάκρυνσης ιόντων χλωρίου από υδατικό διάλυμα. Συγκέντρωση εισόδου (C_o) και εξόδου (C_e) από την ρητίνη

Αριθμός δείγματος	Συγκέντρωση Cl^- (mg/L)	
	Είσοδος (C_o)	Έξοδος (C_e)
1	100	18,8
2	100	24,1
3	100	28,7
4	100	31,1
5	100	31,6
6	100	32
7	100	33
8	100	34
9	100	34,8
10	100	35,4
11	100	36
12	100	36,7
13	100	37,2
14	100	37,9
15	100	38,4

2.6. Απομάκρυνση Αμμωνιακών Ιόντων (NH₄⁺) από υδατικό διάλυμα

Γενικά

Το αμμωνιακό άζωτο μπορεί να βρίσκεται υπό την μορφή αμμωνιακών ιόντων (NH₄⁺) ή ελεύθερης αμμωνίας (NH₃), ανάλογα με το pH του διαλύματος, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση ισορροπίας (Ζανάκη, 2001):



Στα υπόγεια νερά η συγκέντρωση του αμμωνίου είναι χαμηλή και συνήθως κάτω από 0,5 mg/L. Ωστόσο, σε υπόγεια νερά όπου το υπέδαφος είναι πλούσιο σε χουμώδεις ουσίες ή περιέχει στρώματα πλούσια σε σίδηρο, το αμμώνιο μπορεί να ανέλθει στα 1- 3 mg/L και σε νερό από πολύ βαθείς υδροφόρους, έχουν παρατηρηθεί συγκεντρώσεις μέχρι και 50 mg/L (Σκληβανιώτης, 1995).

Η αμμωνία είναι προϊόν αποσύνθεσης των φυτικών και ζωικών πρωτεϊνών και απορριμμάτων. Σχηματίζεται ακόμα από την διάσπαση της ουρίας και του ουρικού οξέος. Με δεδομένο ότι πολλά λιπάσματα περιέχουν αμμωνία και ενώσεις αμμωνίας, η έκπλυση των χωραφιών μπορεί να συμβάλλει στην αύξηση συγκέντρωσης αμμωνίας στο νερό. Μελετώντας κάποιος τον κύκλο του αζώτου σε ένα φυσικό οικοσύστημα καταλαβαίνει και τον ρόλο της αμμωνίας.

Το αμμώνιο δεν επηρεάζει την υγεία στις συνήθεις συγκεντρώσεις που απαντάται στο πόσιμο νερό (συνήθως κάτω από 0,5 mg/L) αλλά ούτε και σε υψηλότερες. Συνήθως αυξημένες συγκεντρώσεις γίνονται αντιληπτές με την οσμή. Εν τούτοις, είναι ιδιαίτερης σημασίας για το πόσιμο νερό επειδή είναι δείκτης κοπρανώδους μόλυνσης και αντιδρά με το χλώριο που τυχόν προστίθεται για απολύμανση και μειώνει την αποτελεσματικότητά του. Η ύπαρξη αυξημένων συγκεντρώσεων αμμωνίου ευνοεί την ανάπτυξη αυτοχθόνων βακτηριδίων και φυκιών στο νερό επειδή αποτελεί βασικό θρεπτικό στατικό των συστατικών αυτών. Επίσης, το αμμώνιο συμβάλλει σημαντικά στη διάβρωση του χαλκού και των κραμάτων αυτού (Σκληβανιώτης, 1995).

Σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία (98/83/EK), στη χώρα μας, η ανώτατη παραδεκτή συγκέντρωση αμμωνιακών στο πόσιμο νερό είναι 0,50 mg/L, ενώ το ανώτατο επιτρεπτό όριο στα γλυκά νερά για τη διαβίωση της πέστροφας και ειδών της οικογένειας των Σαλμονίδων και Κυπρινίδων, είναι 0,025 mg/L. Στα απόβλητα που εκβάλλουν στα επιφανειακά νερά η τιμή της ολικής αμμωνίας, δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 15 mg/L (Ζανάκη, 2001).

Πειραματική διαδικασία

Στόχος του πειράματος ήταν η απομάκρυνση NH_4^+ από το υδατικό διάλυμα NH_4Cl και ο προσδιορισμός της λειτουργικής δυναμικότητας της κατιονικής ρητίνης μετά από διέλευση 20 διαλυμάτων NH_4Cl . Αυτό πραγματοποιήθηκε μετά από διέλευση των διαλυμάτων από την κατιονική ρητίνη C-100H, με συνθήκες που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2, δηλαδή αναγέννηση με διάλυμα H_2SO_4 5%, πλύση με απιονισμένο νερό, διέλευση διαλύματος και πλύση πάλι με απιονισμένο νερό. Το συγκεκριμένο διάλυμα είχε συγκέντρωση σε ιόντα NH_4^+ 100 mg/L, δηλαδή ζυγίστηκαν 0,294 g NH_4Cl και έπειτα διαλύθηκαν σε 1 L απιονισμένο νερό. Έτσι, ξέροντας την συγκέντρωση των NH_4^+ στο αρχικό διάλυμα, πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός των ιόντων μόνο στο κατεργασμένο δείγμα, με το Ammonium test NH_4^+ της Merck 1.14752.0001. Το εύρος μέτρησης του τεστ είναι 0,010-3,00 mg/L $\text{NH}_4\text{-N}$ και 0,010-3,86 mg/L NH_4^+ .

Προσδιορισμός της συγκέντρωσης NH_4^+

Αντιδραστήρια

- Αντιδραστήριο $\text{NH}_4\text{-1B}$
- Αντιδραστήριο $\text{NH}_4\text{-2B}$
- Αντιδραστήριο $\text{NH}_4\text{-3B}$

Με την βοήθεια μίας πιπέτας ακριβείας τοποθετήθηκαν 5 ml του δείγματος σε έναν δοκιμαστικό σωλήνα των 20 ml. Στη συνέχεια, προστέθηκαν 0,6 ml από το αντιδραστήριο $\text{NH}_4\text{-1B}$ και ακολούθησε ανάδευση. Έπειτα, προστέθηκε 1 μπλε μικροκουταλιά από το αντιδραστήριο $\text{NH}_4\text{-2B}$ και ακολούθησε ξανά ανάδευση, μέχρι να διαλυθεί το ίζημα. Ο χρόνος αντίδρασης των παραπάνω ήταν 5 λεπτά. Μετά το χρονικό αυτό διάστημα προστέθηκαν 4 σταγόνες από το αντιδραστήριο $\text{NH}_4\text{-3B}$ και ακολούθησε ξανά ανάδευση. Ο χρόνος αντίδρασης ήταν 5 λεπτά. Τέλος, έγινε η φωτομετρική μέτρηση του διαλύματος με την βοήθεια κυψελίδας.

Η συγκέντρωση των αμμωνιακών ιόντων στην είσοδο της ρητίνης ήταν γνωστή, όπως έχει ήδη αναφερθεί και ίση με 100 mg/L. Με την βοήθεια λοιπόν του παραπάνω kit βρέθηκαν οι

συγκεντρώσεις σε ιόντα αμμωνίου των 20 δειγμάτων στην έξοδο της ρητίνης. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον **Πίνακα 23**.

Πίνακας 23. Αποτελέσματα Ιοντοεναλλακτικής διαδικασίας απομάκρυνσης ιόντων αμμωνίου από υδατικό διάλυμα. Συγκέντρωση εισόδου (C_o) και εξόδου (C_e) από την ρητίνη

Αριθμός δείγματος	Συγκέντρωση ιόντων αμμωνίου (mg/L)	
	Είσοδος (C_o)	Έξοδος (C_e)
1	100	0,01
2	100	0,01
3	100	0,01
4	100	0,01
5	100	0,01
6	100	0,02
7	100	0,02
8	100	0,03
9	100	0,03
10	100	0,03
11	100	0,05
12	100	0,06
13	100	0,09
14	100	0,1
15	100	0,4
16	100	0,8
17	100	1,2
18	100	1,5
19	100	1,8
20	100	2,1

Συζήτηση
Συμπεράσματα

Όπως αναφέρθηκε και στο πειραματικό μέρος, γίνεται καταρχήν μια μελέτη της εκλεκτικότητας των ρητινών σε σχέση με τα ιόντα που δέσμευσαν. Αυτή η μελέτη αφορά μόνο ένα δείγμα για κάθε ιόν. Έτσι λοιπόν στον **Πίνακα 24** παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου και οι μάζες που κατακρατήθηκαν για το πρώτο δείγμα από κάθε παράμετρο και αυτό για να μπορεί να γίνει μια άμεση σύγκριση μεταξύ των εκλεκτικοτήτων (αποτελεσματικότητας) των ρητινών ως προς διαφορετικά ιόντα, σε διαλύματα ίσης συγκέντρωσης (εκτός από την σκληρότητα, αλκαλικότητα και υπολειμματικό χλώριο, όπου έχουμε πόσιμο νερό και όχι τεχνητό υδατικό διάλυμα).

Πίνακας 24. Αποτελέσματα ιοντοεναλλακτικής διαδικασίας απομάκρυνσης διαφόρων παραμέτρων από νερό δικτύου ύδρευσης και από υδατικά διαλύματα. Συγκεντρώσεις εισόδου (C_o) και εξόδου (C_e).

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	Συγκέντρωση εισόδου (C_o)	Συγκέντρωση εξόδου (C_e)	Απόδοση (%)	Μάζα που δεσμεύτηκε	
	mg/L	mg/L		mg	meq
Κατιονική ρητίνη					
Σκληρότητα (κύκλος υδρογόνου)	136 (pH = 7,78)	2 (pH = 5,84)	98,53	134	2,68
Σκληρότητα (κύκλος νατρίου)	132 (pH = 7,8)	2,8 (pH = 7,5)	97,87	129,2	2,58
Σίδηρος	100	16,07	83,93	83,93	2,99
Ψευδάργυρος	100	1,7	98,3	98,3	3,09
Αργίλιο	100	52,8	47,2	47,2	5,24
Αμμωνιακά	100	0,01	99,99	99,99	5,555
Ανιονική ρητίνη					
Ολική αλκαλικότητα	115	7,5	93,47	107,5	2,15
Χλωριόντα	100	18,8	81,2	81,2	2,287
Υπολειμματικό χλώριο (Ολικό)	0,15	0,1	33,3	0,05	$9,7 \times 10^{-4}$

Παρατηρώντας τον παραπάνω Πίνακα, συμπεραίνουμε ότι η ποσότητα των ιόντων που δεσμεύει η κατιονική ρητίνη στην περίπτωση της αποσκλήρυνσης του νερού δικτύου ύδρευσης σε κύκλο υδρογόνου είναι περίπου η ίδια με αυτήν που δεσμεύει και όταν λειτουργεί σε κύκλο νατρίου. Αυτό που είναι αξιοσημείωτο, είναι η διαφορά που παρουσιάζει η τιμή του pH στην έξοδο της ρητίνης από αυτήν της εισόδου, στην περίπτωση της επεξεργασίας σε κύκλο υδρογόνου. Το όξινο διάλυμα

που προέκυψε οφείλεται στα ιόντα H^+ που απελευθερώνουν οι ενεργές ομάδες για να δεσμεύσουν τα ιόντα Ca^{2+} και Mg^{2+} . Αυτό βέβαια διορθώνεται εάν ρίξουμε λίγη ποσότητα βάσης στο επεξεργασμένο δείγμα. Στην περίπτωση της αποσκληρυνσης σε κύκλο νατρίου δεν φαίνεται να υπάρχει κάποιο πρόβλημα στην τιμή του pH. Αυτό που πρέπει να σημειωθεί, είναι ότι το επεξεργασμένο δείγμα, είναι πλούσιο σε ιόντα νατρίου (Μήτρακας, 2001; Benefield, 1982). Η λειτουργία της ρητίνης στην περίπτωση της απομάκρυνσης της σκληρότητας είναι πολύ καλή, όπως φαίνεται και από την μάζα των ιόντων που δεσμεύτηκαν. Η απόδοση της ρητίνης όταν λειτουργεί σε κύκλο υδρογόνου είναι ίση με 98,53%, ενώ όταν λειτουργεί σε κύκλο νατρίου φτάνει στο 97,87%.

Για τον σίδηρο και τον ψευδάργυρο φαίνεται να έχει κατακρατηθεί αρκετή μάζα ιόντων σε σχέση με την αρχική. Οι τιμές των συγκεντρώσεων των δύο αυτών παραμέτρων, στην έξοδο, είναι περίπου οι ίδιες είτε αυτές είναι εκφρασμένες σε mg είτε σε meq. Άρα, η λειτουργία της κατιονικής ρητίνης C-100H στην απομάκρυνση ιόντων σιδήρου και ψευδαργύρου είναι πολύ καλή. Η απόδοση της ρητίνης στην περίπτωση της επεξεργασίας ιόντων σιδήρου είναι ίση με 83,93%, ενώ όταν απομακρύνει ιόντα ψευδαργύρου φτάνει το 98,3%.

Συγκρίνοντας την ποσότητα των αμμωνιακών ιόντων που είχαμε στην είσοδο, με αυτήν που πήραμε στην έξοδο, παρατηρούμε ότι η κατιονική ρητίνη C-100H, κατακράτησε σχεδόν όλη την ποσότητα των ιόντων. Η C-100H λειτουργεί πολύ θετικά στην περίπτωση αυτή, αφού η απόδοσή της φτάνει το 99,99%. Ακόμα, από την έκφραση της μάζας που δεσμεύτηκε σε meq (5,555 meq) συμπεραίνουμε ότι έχει γίνει δέσμευση αμμωνιακών ιόντων από ένα μεγάλο αριθμό ενεργών ομάδων (Benefield, 1982; Μήτρακας, 2001).

Για το αργίλιο, αν και φαίνεται ότι η μάζα που έχει δεσμευτεί σε σχέση με την αρχική είναι περίπου η μισή, η έκφρασή της σε meq μας δείχνει ότι έχει γίνει δέσμευση αργιλίου από ένα μεγάλο αριθμό ενεργών ομάδων. Η απόδοση της ρητίνης στην περίπτωση αυτή είναι ίση με 47,2%.

Στον **Πίνακα 24**, επίσης, παρατηρούμε ότι η ανιονική ρητίνη με ενεργή ομάδα τεταρτοταγή αμίνη που λειτουργεί σε κύκλο χλωρίου, κάνει ικανοποιητική απαλκαλίωση, δηλαδή απομάκρυνση ιόντων CO_3^{2-} και HCO_3^- . Η απαλκαλίωση του νερού είναι μια σημαντική εφαρμογή των ρητινών. Ακόμα, τα ιόντα χλωρίου απομακρύνονται ικανοποιητικά σε κύκλο OH^- (Benefield, 1982). Η απόδοση της A-510 στην περίπτωση της απαλκαλίωσης είναι ίση με 93,47%, ενώ στην απομάκρυνση των ιόντων χλωρίου 81,2%.

Τέλος, παρατηρούμε ότι η ρητίνη A-510, δεν είναι αρκετά κατάλληλη για την απομάκρυνση του υπολειμματικού χλωρίου, αφού απομάκρυνε μόλις 0,05 mg από τα 0,15 mg που είχε το δείγμα στην είσοδο, δηλαδή η απόδοση της ρητίνης έφτασε μόλις το 33,3%. Αυτό συμβαίνει γιατί οι μορφές του υπολειμματικού χλωρίου είναι το HOCl και το OCl⁻. Άρα, η ρητίνη είναι σε θέση να συκρατήσει μόνο το OCl⁻ αφού είναι το μόνο σε μορφή ιόντος. Επίσης, οι μορφές αυτές του υπολειμματικού χλωρίου είναι πτητικές ουσίες, άρα η μικρή αυτή μείωση που παρατηρείται μετά την επεξεργασία του δείγματος από την ρητίνη, είναι πιθανό να οφείλεται στην εξάτμιση των ουσιών αυτών. Γι' αυτό τον λόγο, συνηθίζεται η απομάκρυνση του υπολειμματικού χλωρίου να πραγματοποιείται με ενεργό άνθρακα ή με άλλες μεθόδους (Benefield, 1982; Μήτρακας, 2001).

Στον **Πίνακα 25** φαίνεται ο θεωρητικός συντελεστής εκλεκτικότητας για τα ιόντα τα οποία μελετήσαμε (Μήτρακας, 2001; Benefield, 1982). Επίσης, παρατίθενται οι ατομικοί αριθμοί των στοιχείων, που δείχνουν έμεσα το μέγεθος του ιόντος και τα σθένη. Είναι γνωστό από την θεωρία, (Benefield, 1982) ότι ο συντελεστής εκλεκτικότητας αυξάνει ανάλογα με το μέγεθος του ιόντος αλλά και με την απόλυτη τιμή του σθένους (αυτό βέβαια χωρίς αυστηρότητα, γιατί βλέπουμε ότι ενώ το ασβέστιο έχει μικρότερο μέγεθος από τον σίδηρο και τον ψευδάργυρο, έχει μεγαλύτερο συντελεστή εκλεκτικότητας).

Πίνακας 25: Συντελεστής εκλεκτικότητας, ατομικός αριθμός, σθένος και μάζα που δεσμεύτηκε.

ΙΟΝΤΑ	Συντελεστής Εκλεκτικότητας (a)	Ατομικός Αριθμός (Z)	Σθένος (n)	Μάζα που δεσμεύτηκε	
				mg	meq
Κατιονική Ρητίνη					
Αμμωνιακά - NH₄⁺	1,6	7 (N)	+1	99,99	5,555
Σίδηρος - Fe²⁺	2,4	24	+2	83,93	2,99
Ψευδάργυρος - Zn²⁺	2,6	28	+2	98,3	3,09
Ασβέστιο - Ca²⁺	3,4	18	+2	134	2,68
Αργίλιο - Al³⁺	-	10	+3	47,2	5,24

Στον **Πίνακα 25** βλέπουμε, όσον αφορά τον σίδηρο, τον ψευδάργυρο και το ασβέστιο και σε σχέση με τις μάζες των συγκεκριμένων ιόντων που δεσμεύτηκαν από την ρητίνη, ότι επαληθεύεται η σειρά εκλεκτικότητας, δηλαδή έγινε πλήρης αποσκλήρυνση (δεσμεύτηκαν 134 mg CaCO₃ από τα 136 mg

που πέρασαν), στην συνέχεια ένα μικρότερο (σε σχέση με την σκληρότητα) ποσοστό (αλλά ουσιαστικά μεγάλο 98,3%) μάζας ιόντων ψευδαργύρου και τέλος ένα μικρότερο ποσοστό 83,9% μάζας ιόντων σιδήρου. Άρα, φαίνεται λοιπόν, να διατηρείται η σειρά εκλεκτικότητας που είναι γνωστή από την θεωρία, δηλαδή $Fe^{2+} < Zn^{2+} < Ca^{2+}$. Οι μάζες που κατακρατήθηκαν σε μεq είναι περίπου οι ίδιες και αυτό είναι αναμενόμενο από την στιγμή που τα ιόντα έχουν το ίδιο σθένος και παραπλήσια ατομικά βάρη. Αυτό μας δείχνει ότι δεσμεύτηκαν από περίπου ίσο αριθμό ενεργών ομάδων (Benefield, 1982; Μήτρακας, 2001).

Όσο για το αργίλιο, αν και φαίνεται να δεσμεύεται η μισή ποσότητα περίπου, δηλαδή ο συντελεστής εκλεκτικότητας είναι αρκετά μικρός, το σχετικά μεγάλο του σθένος (+3) αντικατοπτρίζεται στον αυξημένο αριθμό ενεργών ομάδων πάνω στις οποίες δεσμεύεται.

Τέλος, για τα κατιόντα του αμμωνίου, το μεγάλο ποσοστό δέσμευσης (σχεδόν όλη η ποσότητα, 99,99%) αντιβαίνει στην σειρά των συντελεστών εκλεκτικότητας και δείχνει ότι η ισχυρά κατιονική ρητίνη, λειτουργεί πολύ αποτελεσματικά σε σχέση με την απομάκρυνση των αμμωνιακών ιόντων .

Τέλος, όσον αφορά τα ανιόντα, δεν μπορούμε να κάνουμε σύγκριση μεταξύ τους, σε σχέση με τους συντελεστές εκλεκτικότητας, γιατί από την μια πλευρά η αλκαλικότητα εκφράζεται ταυτόχρονα από τα ιόντα OH^- , CO_3^{2-} και HCO_3^- , ενώ για το υπολειμματικό χλώριο δεν έχουμε συντελεστή εκλεκτικότητας, γιατί δεν απομακρύνεται με ιοντοεναλλαγή (Benefield, 1982; Μήτρακας, 2001).

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων, όσον αφορά την σκληρότητα, τον σίδηρο, τα αμμωνιακά και τα χλωριόντα των οποίων, ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης, πραγματοποιήθηκε σε ένα μεγάλο αριθμό δειγμάτων που πέρασαν διαδοχικά από τις στήλες, με σκοπό να μελετηθεί η Λειτουργική Δυναμικότητα των ρητινών, άρα να έχουμε και μια εικόνα της συμπεριφοράς τους σε σχέση με κάθε ιόν.

Η Λειτουργική Δυναμικότητα, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο θεωρητικό μέρος και με βάση τον αριθμό των δειγμάτων, δίνεται από τον τύπο (1) (Benefield L. D. *et al.*, 1982).

$$X = \frac{C_o V_{op}}{V_r} - \frac{C_o}{V_r} \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i)(V_i) \quad (1)$$

όπου,

X = Λειτουργική δυναμικότητα (meq/ml)

C_o = Συγκέντρωση ιόντος στην είσοδο (meq/L)

C_e = Συγκέντρωση ιόντος στην έξοδο (meq/L)

C_e/C_o = Λόγος συγκέντρωσης ιόντος στην έξοδο προς την είσοδο ή «διαρροή»

V_r = Όγκος της ρητίνης (ml) (Bed Volume)

V_i = Ο όγκος δείγματος που προσθέτουμε κάθε φορά (L)

V_{op} = Συνολικός όγκος διαλύματος που πέρασε από την ρητίνη (L)

Y_i = Ο λόγος C_e/C_o κάθε φορά που προσθέτουμε δείγμα όγκου V_i

Σκληρότητα

Για την μελέτη της ισχυρά κατιονικής ρητίνης, σε σχέση με την αποσκληρυνση του νερού σε κύκλο νατρίου, έγινε διέλευση 25 δειγμάτων νερού βρύσης της ίδιας σκληρότητας από τον ίδιο όγκο ρητίνης και προσδιορισμός της σκληρότητας σε κάθε δείγμα μετά την διέλευση. Υπενθυμίζεται ότι μεταξύ των δειγμάτων δεν πραγματοποιήθηκε πλύση και αναγέννηση. Οι τιμές της σκληρότητας αναφέρονται στο πειραματικό μέρος. Στον **Πίνακα 26** παρουσιάζονται οι τιμές της σκληρότητας εισόδου (C_o) και εξόδου (C_e) για κάθε δείγμα, εκφρασμένο όμως σε mg/L όπως απαιτεί ο τύπος (1), η διαρροή (Y_i) και ο όγκος κάθε δείγματος (V_i).

Πίνακας 26: Τιμές σκληρότητας εισόδου και εξόδου σε mg/L, διαρροή και όγκος κάθε δείγματος.

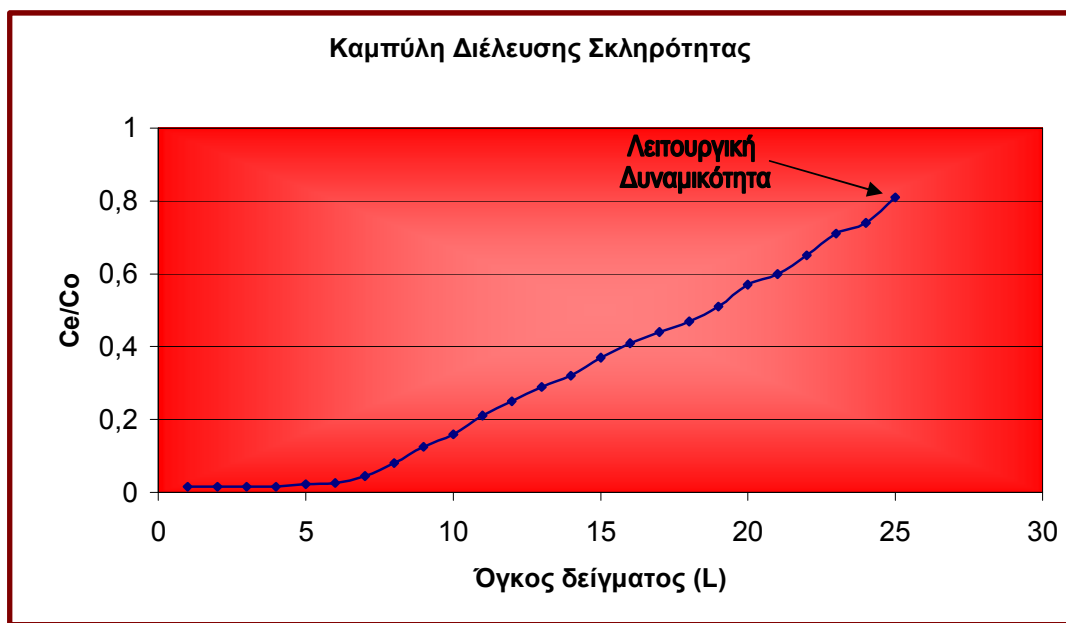
Αριθμός δειγματος	C_o	C_e	$Y_i = C_e/C_o$	V_i	$(Y_i) \times (V_i)$
1	2,72	0,04	0,015	1	0,015
2	2,72	0,04	0,015	1	0,015
3	2,72	0,04	0,015	1	0,015
4	2,72	0,044	0,016	1	0,016
5	2,72	0,06	0,022	1	0,022
6	2,72	0,068	0,025	1	0,025
7	2,72	0,12	0,044	1	0,044
8	2,72	0,22	0,08	1	0,08
9	2,72	0,34	0,125	1	0,125
10	2,72	0,44	0,16	1	0,16
11	2,72	0,58	0,21	1	0,21
12	2,72	0,68	0,25	1	0,25
13	2,72	0,8	0,29	1	0,29
14	2,72	0,88	0,32	1	0,32
15	2,72	1	0,37	1	0,37
16	2,72	1,12	0,41	1	0,41
17	2,72	1,2	0,44	1	0,44
18	2,72	1,28	0,47	1	0,47
19	2,72	1,4	0,51	1	0,51
20	2,72	1,56	0,57	1	0,57
21	2,72	1,64	0,6	1	0,6
22	2,72	1,76	0,65	1	0,65
23	2,72	1,92	0,71	1	0,71
24	2,72	2	0,74	1	0,74
25	2,72	2,2	0,81	1	0,81
$\Sigma (Y_i \times V_i)$					7,867

Έτσι, κάνοντας αντικατάσταση στον τύπο (1) τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 22** έχουμε:

$$X = \frac{C_o V_{op}}{V_r} - \frac{C_o}{V_r} \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i)(V_i) = \frac{0,68 \times 25}{70} - \frac{0,68}{70} \sum_{i=1}^{i=25} (0,015 \times 1) + (0,015 \times 1) + \dots + (0,81 \times 1) \Rightarrow$$

$$X = 0,164 \text{ meq/ml.}$$

Από τα αποτελέσματα, προκύπτει η παρακάτω καμπύλη που μας δείχνει την Λειτουργική Δυναμικότητα της ρητίνης ανάλογα με τον όγκο του διαλύματος που έχει περάσει από αυτήν, όπως επίσης και την διαρροή Y στο σημείο αυτό. Η διαρροή εκφράζει τον λόγο μάζας εξόδου προς αυτήν της εισόδου.



Σχήμα 2: Καμπύλη διέλευσης σκληρότητας

Όταν ο λόγος C_e/C_o , γίνει ίσος με 1, τότε η ρητίνη έχει κορεστεί από τα αντίστοιχα ιόντα που δεσμεύει, άρα δεν κατακρατά τίποτα πλέον και η συγκέντρωση του ιόντος στην έξοδο είναι ίδια με αυτήν στην είσοδο. Στο σημείο αυτό έχουμε την «Οριακή Λειτουργική Δυναμικότητα» (Benefield, 1982).

Παρατηρώντας την καμπύλη διέλευσης για την σκληρότητα, βλέπουμε ότι μετά από 25 δείγματα συνολικού όγκου $V = 25 \text{ L}$ (σκληρότητας 136 mg CaCO_3) που πέρασαν από την κατιονική ρητίνη, ο

λόγος C_e/C_o είναι ίσος με 0,81. Ο μεγάλος αριθμός δειγμάτων δείχνει ότι η ρητίνη έχει κατακρατήσει σημαντική ποσότητα ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου. Όπως παρατηρούμε όμως και από τον **Πίνακα 26**, μετά από την διέλευση δώδεκα δειγμάτων, δεν κατακρατείται ικανοποιητική ποσότητα ιόντων. Άρα, η κατιονική ρητίνη C-100H στην περίπτωση της αποσκλήρυνσης νερού μέσης σκληρότητας, μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά. Στο **Σχήμα 2** φαίνεται ότι η διαρροή (Y) είναι περίπου 0,8 όταν η ρητίνη έχει κατακρατήσει αρκετά μεγάλη «μάζα» σκληρότητας (2.333 mg).

Σίδηρος

Για την μελέτη της ισχυρά κατιονικής ρητίνης, σε σχέση με την απομάκρυνση ιόντων σιδήρου από υδατικό διάλυμα $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ (100 mg Fe^{2+}/L), έγινε διέλευση 10 δειγμάτων από τον ίδιο όγκο ρητίνης και προσδιορισμός της συγκέντρωσης των ιόντων σε κάθε δείγμα μετά την διέλευση. Στον **Πίνακα 27** παρουσιάζονται οι τιμές της συγκέντρωσης των ιόντων σιδήρου στην είσοδο (C_o) και στην έξοδο (C_e) για κάθε δείγμα, εκφρασμένες σε meq/L, η διαρροή (Y_i) και ο όγκος κάθε δείγματος (V_i).

Πίνακας 27: Τιμές σιδήρου εισόδου και εξόδου σε meq/L, διαρροή και όγκος κάθε δείγματος.

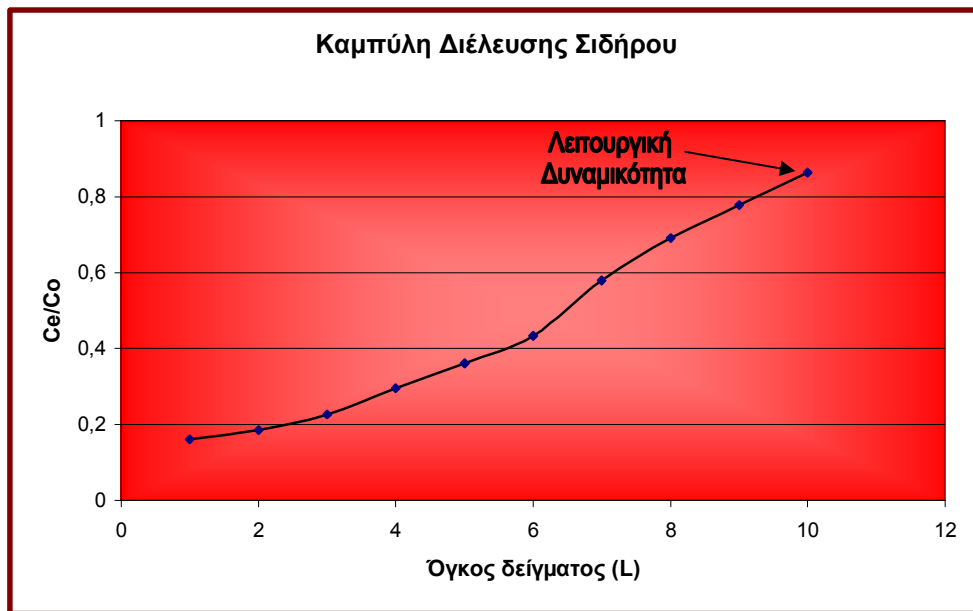
Αριθμός δειγματος	C_o	C_e	$Y_i = C_e/C_o$	V_i	$(Y_i) \times (V_i)$
1	3,57	0,572	0,161	1	0,161
2	3,57	0,66	0,185	1	0,185
3	3,57	0,808	0,227	1	0,227
4	3,57	1,052	0,295	1	0,295
5	3,57	1,284	0,361	1	0,361
6	3,57	1,544	0,434	1	0,434
7	3,57	2,06	0,579	1	0,579
8	3,57	2,46	0,691	1	0,691
9	3,57	2,776	0,779	1	0,779
10	3,57	3,072	0,863	1	0,863
$\Sigma (Y_i \times V_i)$					4,575

Κάνοντας αντικατάσταση στον τύπο (1) τις προαναφερόμενες τιμές, για τα δέκα διαλύματα σιδήρου που επεξεργάστηκαν, έχουμε:

$$X = \frac{C_o \cdot V_{op}}{V_r} - \frac{C_o}{V_r} \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i)(V_i) = \frac{0,89 \times 10}{70} - \frac{0,89}{70} \sum_{i=1}^{i=10} (0,161 \times 1) + (0,185 \times 1) + \dots + (0,863 \times 1) \Rightarrow$$

$$X = 0,069 \text{ meq/ml.}$$

Από τα στοιχεία του Πίνακα 23, προκύπτει η καμπύλη διέλευσης για τον σίδηρο, η οποία δείχνει την Λειτουργική Δυναμικότητα της ρητίνης ανάλογα με τον συνολικό όγκο του διαλύματος που έχει περάσει από αυτήν, σε σχέση και με την διαρροή Υ.



Σχήμα 3: Καμπύλη διέλευσης σιδήρου

Με βάση την μορφή της καμπύλης, παρατηρούμε ότι μετά από την διέλευση 10 δειγμάτων συνολικού όγκου 10 L, ο λόγος C_e/C_0 είναι ίσος με 0,86. Η συγκεκριμένη λοιπόν ισχυρά κατιονική ρητίνη δεν φαίνεται να κατακρατεί σχετικά μεγάλη ποσότητα ιόντων σιδήρου. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε πολλούς λόγους, όπως ο ρυθμός της ροής του διαλύματος, το μέγεθος του ιόντος, το σθένος, ο συντελεστής εκλεκτικότητας, η συγκέντρωση του διαλύματος κ.α., όπως προαναφέρθηκε (Benefield, 1982). Είναι γνωστό ότι η ασθενώς κατιονική ρητίνη (ενεργή ομάδα $-\text{COO}^-$) παρουσιάζει μεγαλύτερη εκλεκτικότητα εναλλαγής με δισθενή κατιόντα (όπως ο Fe^{2+}) παρά με μονοθενή, (Μήτρακας, 2001), άρα και προτιμάται σε αυτές τις περιπτώσεις. Επίσης, ο συντελεστής διαχωρισμού στην ανταλλαγή δισθενούς ή μονοσθενούς εξαρτάται από την συγκέντρωση του διαλύματος. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή, τόσο μικραίνει ο συντελεστής διαχωρισμού και η εκλεκτικότητα τείνει να αντιστραφεί υπέρ του μονοσθενούς ιόντος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ηλεκτροεκλεκτικότητα (Benefield, 1982; Μήτρακας, 2001).

Αμμωνιακά

Για την μελέτη της ικανότητας της ισχυρά κατιονικής ρητίνης C-100H, σε σχέση με την απομάκρυνση αμμωνιακών ιόντων από υδατικό διάλυμα NH_4Cl ($100 \text{ mg NH}_4^+/\text{L}$), έγινε διέλευση 20

δειγμάτων από τον ίδιο όγκο ρητίνης και προσδιορισμός της συγκέντρωσης εξόδου σε κάθε δείγμα. Στον **Πίνακα 28** παρουσιάζονται οι τιμές της συγκέντρωσης των αμμωνιακών ιόντων στην είσοδο (C_o) και στην έξοδο (C_e) για κάθε δείγμα, εκφρασμένες σε mg/L, η διαρροή (Y_i) και ο όγκος κάθε δείγματος (V_i).

Πίνακας 28: Τιμές αμμωνιακών ιόντων εισόδου και εξόδου σε mg/L, διαρροή και όγκος κάθε δείγματος.

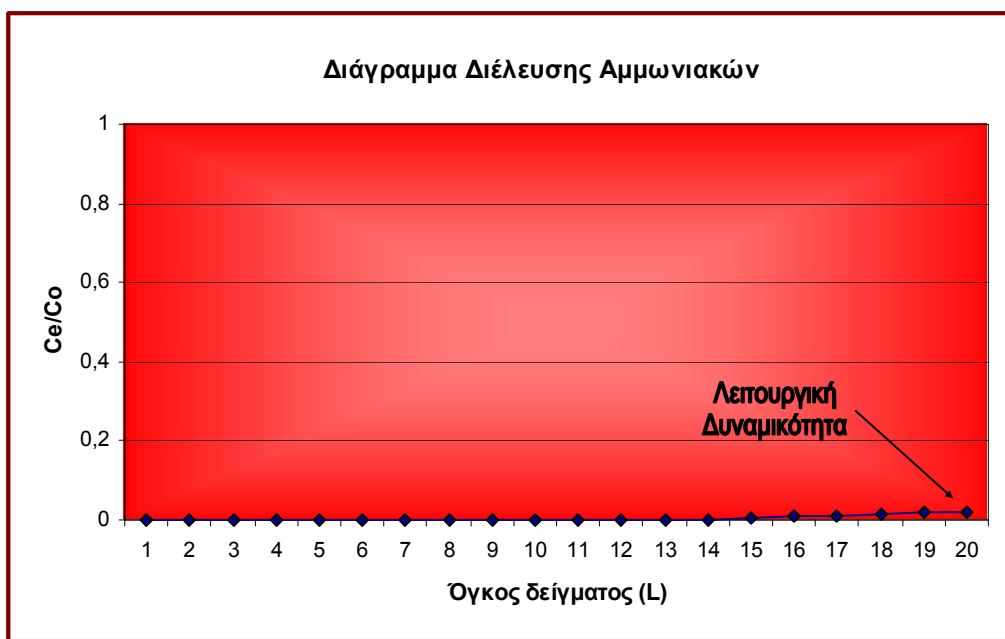
Αριθμός δείγματος	C_o	C_e	$Y_i = C_e/C_o$	V_i	$(Y_i) \times (V_i)$
1	5,55	0,0005	0,00009	1	0,00009
2	5,55	0,0005	0,00009	1	0,00009
3	5,55	0,0005	0,00009	1	0,00009
4	5,55	0,0005	0,00009	1	0,00009
5	5,55	0,0005	0,00009	1	0,00009
6	5,55	0,001	0,00018	1	0,00018
7	5,55	0,001	0,00018	1	0,00018
8	5,55	0,0016	0,00028	1	0,00028
9	5,55	0,0016	0,00028	1	0,00028
10	5,55	0,0016	0,00028	1	0,00028
11	5,55	0,003	0,00054	1	0,00054
12	5,55	0,0033	0,00072	1	0,00072
13	5,55	0,005	0,0009	1	0,0009
14	5,55	0,0055	0,0028	1	0,0028
15	5,55	0,022	0,0068	1	0,0068
16	5,55	0,044	0,0109	1	0,0109
17	5,55	0,066	0,0158	1	0,0158
18	5,55	0,083	0,02	1	0,02
19	5,55	0,1	0,0239	1	0,0239
20	5,55	0,116	0,029	1	0,029
$\Sigma (Y_i \times V_i)$					0,08207

Κάνοντας αντικατάσταση στον τύπο (1), έχουμε:

$$X = \frac{C_o V_{op}}{V_r} - \frac{C_o}{V_r} \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i)(V_i) = \frac{5,55 \times 20}{70} - \frac{5,55}{70} \sum_{i=1}^{i=20} (0,00009 \times 1) + (0,00009 \times 1) + \dots + (0,029 \times 1) \Rightarrow$$

$$X = 1,5795 \text{ mg/ml.}$$

Από τα αποτελέσματα, προκύπτει η παρακάτω καμπύλη που δείχνει την Λειτουργική Δυναμικότητα της ρητίνης ανάλογα με τον συνολικό όγκο του διαλύματος που έχει περάσει από αυτήν, όπως επίσης και την διαρροή Y στο τελικό σημείο.



Σχήμα 4: Καμπύλη διέλευσης αμμωνιακών

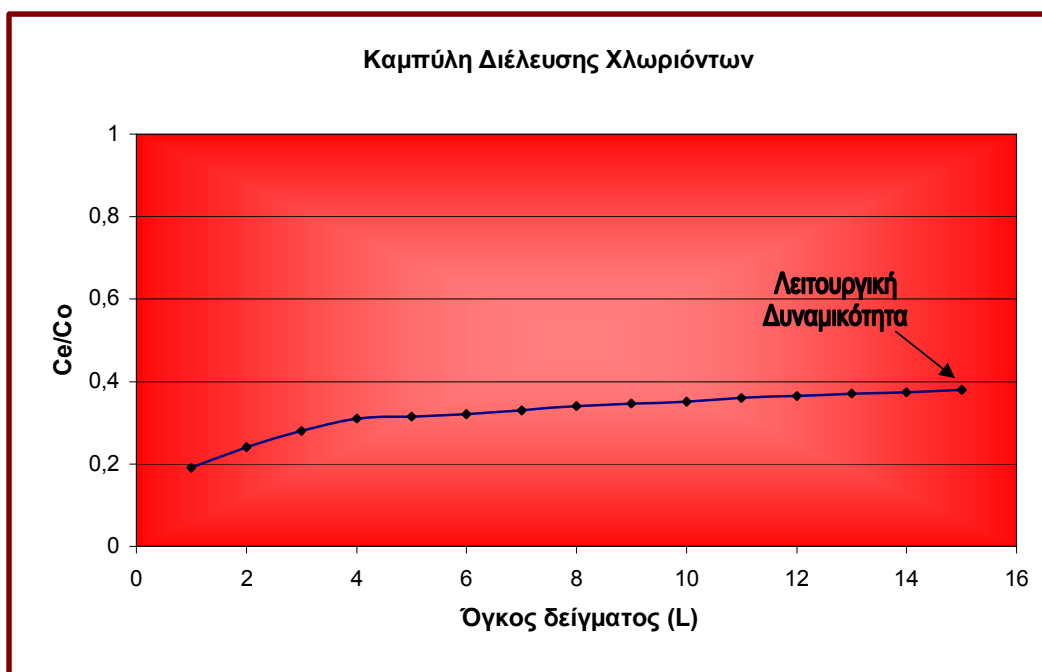
Φαίνεται λοιπόν, ότι παρόλο τον μεγάλο αριθμό δειγμάτων που πέρασαν από την ρητίνη, η διαρροή κρατιέται σε πολύ χαμηλά επίπεδα (0,029) και αυτό δείχνει την μεγάλη κατακράτηση αμμωνιακών ιόντων.

Χλωριόντα

Για την μελέτη της ικανότητας της ανιονικής ρητίνης A-510, σε σχέση με την απομάκρυνση ιόντων χλωρίου από υδατικό διάλυμα NaCl (100 mg Cl⁻/L), έγινε διέλευση 15 δειγμάτων από τον ίδιο όγκο ρητίνης και προσδιορισμός της συγκέντρωσης εξόδου σε κάθε δείγμα. Στον **Πίνακα 29** παρουσιάζονται οι τιμές της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου στην είσοδο (C_o) και στην έξοδο (C_e) για κάθε δείγμα, εκφρασμένες σε mg/L, η διαρροή (Y_i) και ο όγκος κάθε δείγματος (V_i).

Πίνακας 29: Τιμές χλωριόντων εισόδου και εξόδου σε mg/L, διαρροή και όγκος κάθε δείγματος.

Αριθμός δείγματος	C_o	C_e	$Y_i = C_e/C_o$	V_i	$(Y_i) \times (V_i)$
1	2,82	0,53	0,19	1	0,19
2	2,82	0,68	0,24	1	0,24
3	2,82	0,81	0,28	1	0,28
4	2,82	0,88	0,31	1	0,31
5	2,82	0,89	0,315	1	0,315
6	2,82	0,90	0,32	1	0,32
7	2,82	0,93	0,33	1	0,33
8	2,82	0,96	0,34	1	0,34
9	2,82	0,98	0,347	1	0,347
10	2,82	0,99	0,351	1	0,351
11	2,82	1,01	0,36	1	0,36
12	2,82	1,03	0,365	1	0,365
13	2,82	1,05	0,37	1	0,37
14	2,82	1,07	0,373	1	0,373
15	2,82	1,08	0,38	1	0,38
$\Sigma (Y_i \times V_i)$					4,871



Σχήμα 5: Καμπύλη διέλευσης χλωριόντων

Κάνοντας αντικατάσταση στον τύπο (1), έχουμε:

$$X = \frac{C_o V_{op}}{V_r} - \frac{C_o}{V_r} \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i)(V_i) = \frac{2,82 \times 15}{70} - \frac{2,82}{70} \sum_{i=1}^{i=15} (0,19 \times 1) + (0,24 \times 1) + \dots + (0,38 \times 1) \Rightarrow$$

$$X = 0,408 \text{ meq/ml.}$$

Από τα αποτελέσματα, προκύπτει η πιο πάνω καμπύλη (**Σχ. 5**) που δείχνει την Λειτουργική Δυναμικότητα της ρητίνης ανάλογα με τον συνολικό όγκο του διαλύματος που έχει περάσει από αυτήν, όπως επίσης και την διαρροή Y στο τελικό σημείο. Βλέπουμε ότι ο λόγος C_e/C_o , για τα 15 δείγματα νερού (15 L) που επεξεργάστηκαν από την ανιονική ρητίνη, είναι ίσος με 0,38. Άρα, η ανιονική ρητίνη, στην περίπτωση της απομάκρυνσης ιόντων χλωρίου από το νερό, μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά για αρκετά μεγάλο αριθμό δειγμάτων.

Στον **Πίνακα 30** παρουσιάζονται ο συνολικός όγκος κάθε δείγματος που επεξεργάστηκε η C-100H, η ολική μάζα ιόντος που κατακρατήθηκε, η Λειτουργική Δυναμικότητα της ρητίνης στο συγκεκριμένο σημείο και η διαρροή.

Πίνακας 30: Συνολικός όγκος δείγματος, ολική μάζα ιόντος που κατακρατήθηκε, Λειτουργική Δυναμικότητα και διαρροή.

	Συνολικός Όγκος Δείγματος (L)	Ολική μάζα παραμέτρου που κατακρατήθηκε		Λειτουργική Δυναμικότητα (meq/ml)	Διαρροή
		mg	meq		
Σκληρότητα (κύκλος H⁺)	25	2.333	46,66	0,164	0,81
Σίδηρος	10	543,82	19,42	0,069	0,86
Αμμωνιακά	20	2.190,87	121,715	1,5795	0,029

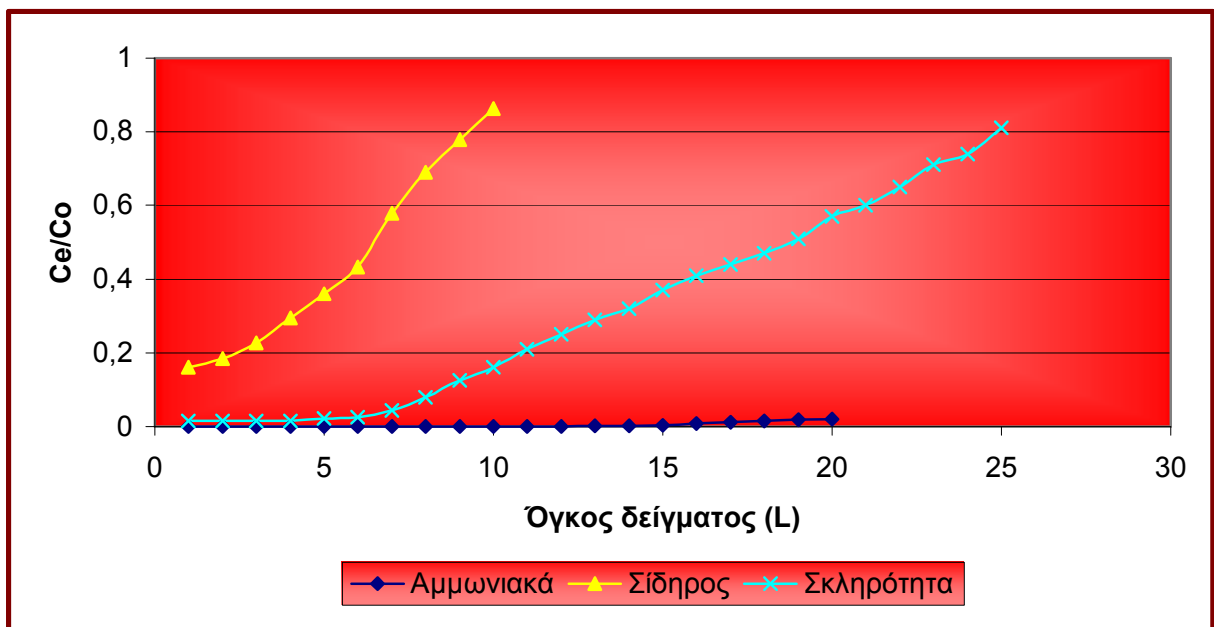
Η διαρροή μας δείχνει μια εικόνα της φόρτισης της ρητίνης ως προς τα ιόντα που δεσμεύει. Όσο πλησιάζει την τιμή 1, τόσο πιο πολύ φορτισμένη είναι. Όταν η τιμή γίνει ίση με 1, τότε όσα ιόντα μπαίνουν στην είσοδο, τόσα βγαίνουν από την έξοδο, οπότε η ρητίνη παύει να λειτουργεί. Στο σημείο αυτό έχουμε την Οριακή Λειτουργική Δυναμικότητα (Benefield L. D. *et. al.*, 1982).

Στον **Πίνακα 30** φαίνεται άμεσα ότι η ρητίνη παρουσιάζει σχεδόν ίδια διαρροή (0,81-0,86) για τετραπλάσια περίπου μάζα ιόντων Ca^{2+} και Mg^{2+} (2.333 mg) σε σχέση με αυτήν των ιόντων Fe^{2+}

(543,82 mg). Επίσης, έχει κατακρατήσει σχεδόν την τετραπλάσια μάζα αμμωνιακών ιόντων (2.190,87 mg) σε σχέση με την μάζα των ιόντων σιδήρου (543,82 mg), ενώ η διαρροή στην περίπτωση των αμμωνιακών είναι ακόμα ελάχιστη, μόλις 0,029. Συγκρίνοντας την σκληρότητα με τα αμμωνιακά ιόντα, βλέπουμε ότι ενώ η μάζα των ιόντων που απομάκρυνε η ρητίνη είναι περίπου ίδια, η διαρροή παρουσιάζει μεγάλη διαφορά (0,81 – 0,029). Αυτό σημαίνει ότι η ρητίνη έχει την δυνατότητα να κατακρατήσει ακόμα μια μεγάλη ποσότητα αμμωνιακών ιόντων, με την διαρροή να παραμένει σε χαμηλές τιμές. Ακόμα, παρατηρούμε ότι ενώ η μάζα των ιόντων Ca^{2+} και Mg^{2+} σε mg που κατακράτησε η ρητίνη είναι σχεδόν η ίδια με αυτήν των αμμωνιακών (2.333 mg – 2.190,87 mg), οι αντίστοιχες ποσότητες σε meq διαφέρουν πολύ (46,6 meq – 121,715 meq).

Η θεωρητική Ολική Δυναμικότητα για την κατιονική ρητίνη είναι 1,9 meq/ml (Purolite Technical Data C-100H, 1999). Η Λειτουργική Δυναμικότητα που προσδιορίστηκε από τα πειράματα που έγιναν, βρέθηκε μικρότερη σε όλες τις περιπτώσεις, για τους όγκους και τις συγκεντρώσεις των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Αυτό βέβαια εξαρτάται από τις εκάστοτε συνθήκες του πειράματος, όπως είναι η ροή, η συγκέντρωση και η σύσταση του δείγματος, το μέγεθος και το σθένος των ιόντων, το ύψος της στήλης, η θερμοκρασία κ.ά. (Benefield, 1982). Φαίνεται ότι η θεωρητική ολική δυναμικότητα και η λειτουργική, πρακτικά να απέχουν πολύ.

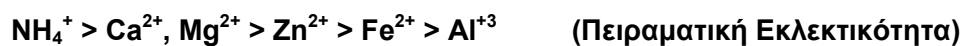
Στο **Σχήμα 6** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά, οι καμπύλες διέλευσης για τα αμμωνιακά, τον σίδηρο και την σκληρότητα.



Σχήμα 6. Καμπύλες Διέλευσης για τα αμμωνιακά, τον σίδηρο και την σκληρότητα.

Όσο πιο μεγάλη είναι η κλίση της ευθείας, τόσο τείνει η διαρροή να γίνει ίση με 1, άρα να φορτιστεί πλήρως η ρητίνη, δηλαδή η απότομη κλίση δείχνει και την γρήγορη φόρτιση της ρητίνης. Έτσι, λοιπόν, βλέπουμε πως μόνο με τα δέκα δείγματα σιδήρου που πέρασαν από την κατιονική ρητίνη, η διαρροή έχει τιμή πάνω από 0,8. Η σκληρότητα έχει φτάσει περίπου την ίδια διαρροή, αλλά μετά από την διέλευση 25 δειγμάτων. Όσο για τα αμμωνικά, βλέπουμε ότι παρά τα 20 δείγματα που επεξεργάστηκε η ρητίνη, η διαρροή έχει πολύ μικρή τιμή.

Με βάση τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, πιο κάτω παρουσιάζεται η σειρά εκλεκτικότητας των ρητινών σε σχέση με τα ιόντα, όπως επίσης και η αντίστοιχη θεωρητική εκλεκτικότητα.



ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι η κατιονική ρητίνη C-100H της Purolite, λειτουργεί πολύ ικανοποιητικά όσον αφορά την δέσμευση ιόντων Ca^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} και NH_4^+ . Δεν συνιστάται η χρήση της για την απομάκρυνση ιόντων Fe^{2+} και Al^{+3} από πόσιμο νερό ή υδατικά διαλύματα.

Η ανιονική ρητίνη A-510 της Purolite, λειτουργεί πολύ καλά όταν δεσμεύει ιόντα Cl^- , OH^- , CO_3^- και HCO_3^- . Δεν συνιστάται η χρήση της για την απομάκρυνση του υπολειμματικού χλωρίου από το πόσιμο νερό. Εξάλλου, όπως έχει ήδη αναφερθεί η απομάκρυνσή του συνηθίζεται να γίνεται με άλλες μεθόδους, όπως είναι η προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα.

Μία πολύ καλή εφαρμογή των δύο αυτών ρητινών, μπορεί να είναι η ανάμιξή τους και η ταυτόχρονη απομάκρυνση όλων αυτών των χημικών μορφών από το πόσιμο νερό ή από υδατικά διαλύματα. Η εφαρμογή αυτή θα εξοικονομούσε χώρο, για παράδειγμα, σε ένα εργαστήριο, αφού θα χρειαζόταν μία μόνο στήλη για την επεξεργασία των δειγμάτων. Με την ανάμιξη των δύο ρητινών το δείγμα δύναται να επεξεργαστεί μία μόνο φορά από μία στήλη, και όχι να περάσει πρώτα από την κατιονική και στην συνέχεια από την ανιονική όπως θα απαιτούνταν στην περίπτωση που θα υπήρχαν οι δύο ρητίνες χωριστά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ζανάκη Κ., (2001). “Έλεγχος ποιότητας νερού”, Εκδόσεις: ΙΩΝ, Αθήνα.
- Κουϊμτζής Θ., Φυτιάνος Κ., Σαμαρά–Κωνσταντίνου Κ., (1998). “Χημεία Περιβάλλοντος”, Εκδόσεις: University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Κουϊμτζής Θ., Σαμαρά–Κωνσταντίνου Κ., (1994). “Έλεγχος Ρύπανσης Περιβάλλοντος”, Εκδόσεις: ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.
- Λέκκας Δ.Θ., (1996). “Περιβαλλοντική Μηχανική1-Διαχείριση Υδατικών Πόρων”, Μυτιλήνη.
- Μαλεφάκης Γ., (1998). “Ποιότητα Επιφανειακών και Υπόγειων Υδάτων”, Αθήνα.
- Μεγαλόπουλος Α., (1977). “Χημεία και Τεχνολογία του Νερού”, Έκδοση από τον συγγραφέα, Αθήνα.
- Μήτρακας Μ., (2001). “Ποιοτικά Χαρακτηριστικά και Επεξεργασία Νερού”, Εκδόσεις: Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- Ξένος Δ.Κ., (1998). “Εργαστηριακές Ασκήσεις Αναλυτικής Χημείας”, Εκδόσεις: Μακεδονικές, Μεσολόγγι.
- Ξένος Δ.Κ., (1998). “Εργαστηριακές Ασκήσεις Γενικής Χημείας”, Εκδόσεις: Μακεδονικές, Μεσολόγγι.
- Οδηγία 98/83/ΕΚ (σχετικά με την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης), (1998).
- Σαββάκης Ε.Κ., (2002). “Χημική Τεχνολογία, Εισαγωγή στην Περιβαλλοντική Τεχνολογία”, Εκδόσεις: Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Σκληβανιώτης Μ., (1995). “Βασικές Παράμετροι Ποιότητας του Πόσιμου Νερού”, Εκδόσεις: Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Πάτρας, Πάτρα.
- Τσόγκας Ερ. Χ., (1998). “Δίκτυα Αποχέτευσης & Επεξεργασία Λυμάτων”, Εκδόσεις: Ίων, Αθήνα.
- Benefit L., Judkins J.F. and Weand B.L., (1982). “Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment”, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J.
- Degremont, (1979). “Water Treatment Handbook” 5th Ed. Halsted Press, New York, USA.
- Merck 1.14752.0001, Ammonium test NH_4^+ .
- Merck 1.14801.0001, Chlorine test for swimming pools.
- Purolite, International Limited, Technical Data (C-100H), Wales, CF78YL, 1999.
- Purolite, International Limited, Technical Data (A-510), Wales, CF78YL, 1999.
- World Health Organization, (1993), Guidelines for drinking-water quality, 2nd ed. Vol. 1. Recommendations. Geneva, pp. 40, 45, 48-49, 50, 57.
- World Health Organization, (1998), Guidelines for drinking-water quality, 2nd ed. Vol. 1. Recommendations. Geneva, pp. 3-4.

ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ

1. <http://www.aquaticreefsystems.com/About Reverse Osmosis.htm>
2. <http://www.bartleby.com/61/imagepages/A4reosmo.html>
3. <http://www-ceg.eng.ohio-state.edu/~hwalker/CE812 Web/CE812 Tour.htm>
4. http://155.207.18.1/~chemtech/foititika/eisxt/kef_10_nero.pdf
5. <http://www.coffeyville.com/images/Water%20Plant%20Basin%20071802.jpg>

6. <http://www.elbalero.gob.mx/kids/bio/html/especies/micro/micro5.html>
7. <http://www.ionresins.com/top.htm>
8. <http://www.micrographia.com/specbiol/bacteri/bacter/bact0100/bactfw06.htm>
9. http://www.microlab.gr/water/water_apolimansi.htm
10. http://www.microlab.gr/water/water_methodoi.htm
11. <http://www.nad.usace.army.mil/Essayons/Aug00/capwa.htm>
12. http://www.orange.nsw.gov.au/z_water_supply/water1.htm#water%20filtration
13. <http://www.projectsmonitor.com/Library/Water%20Treatment.jpg>
14. <http://www.sewer-overflow.com/>
15. <http://www.slic2.wsu.edu:82/hurlbert/micro101/pages/Chap17.html#!>
16. <http://wunmr.wustl.edu/EduDev/LabTutorials/Water/PublicWaterSupply/PublicWaterSupply.html>
17. <http://wunmr.wustl.edu/EduDev/LabTutorials/Water/FreshWater/hardness.html>