



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Αναλυτικές μέθοδοι και τεχνικές  
προσδιορισμού ποιότητας νερού πιλοτικής  
μονάδας αντίστροφης ώσμωσης**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

της

**ΘΕΩΝΗΣ ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΥ**

**Επιβλέπων καθηγητής: Νικόλαος Τζαμτζής**

**Αθήνα, Ιανουάριος 2011**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Αναλυτικές μέθοδοι και τεχνικές  
προσδιορισμού ποιότητας νερού πιλοτικής  
μονάδας αντίστροφης ώσμωσης**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

της

**ΘΕΩΝΗ ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΥ**

**Επιβλέπων καθηγητής: Νικόλαος Τζαμτζής**

**Αθήνα, Ιανουάριος 2011**

.....  
**ΘΕΩΝΗ ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΥ**

Διπλωματούχος Χημικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.  
© 2011 - All rights reserved

## Περίληψη

Το νερό αποτελεί ένα από τα πιο πολύτιμα στοιχεία, που είναι απαραίτητο για τη διατήρηση της ζωής στον πλανήτη μας. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται τόσο στα επιφανειακά όσο και στα υπόγεια νερά που προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση, ώστε το νερό να είναι αβλαβές και πόσιμο. Προς αυτή την κατεύθυνση έχουν οριστεί δείκτες ποιότητας του νερού, που καθορίζουν εάν το νερό είναι κατάλληλο ή όχι. Επιπλέον έχουν βρεθεί μέθοδοι επεξεργασίας για να βελτιώνουν την ποιότητα του νερού, ακόμα και να βοηθούν στην παραγωγή επεξεργασμένου νερού ανώτερης ποιότητας.

Στην παρούσα εργασία θα γίνει παρουσίαση της μεθόδου της αντίστροφης ώσμωσης, που χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο στις μέρες μας ως κύρια μέθοδος επεξεργασίας του νερού, αλλά ακόμα και συνδυαστικά με άλλες μεθόδους. Συγκεκριμένα μελετώνται οι αναλυτικές μέθοδοι και τεχνικές προσδιορισμού της ποιότητας νερού σε μια πιλοτική μονάδα αντίστροφης ώσμωσης. Γι' αυτό το σκοπό γίνεται πλήρη αναφορά των οργάνων και υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές τις μεθόδους, καθώς γίνεται και περιγραφή των τεχνικών προσδιορισμού. Στο τέλος της εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη πιλοτική μονάδα αντίστροφης ώσμωσης με την απεικόνισή τους σε διαγράμματα και πίνακες.

Η εργασία αυτή αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου της αντίστροφης ώσμωσης, ειδικότερα όταν στη μονάδα συνδυάζονται και άλλες μέθοδοι που βελτιώνουν την ποιότητα του νερού.

Λέξεις- κλειδιά: Αντίστροφη ώσμωση, νερό, μέθοδοι επεξεργασίας νερού.

## **Abstract**

The quality of drinking water is a vital element of public health and wellbeing. Yet it derives from rivers, reservoirs and groundwater, which are subject to many different sources of potential contamination. The aim of this project is to describe the systems that are used in order to improve water quality. It mainly focuses on the system of reverse osmosis. There is a detailed description of this system and its parts. Moreover there is a thorough explanation of the methods that were used so as to determine the water quality. At the end of this project, conclusions are discussed.

Ευχαριστίες: Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή μου κ.Νικόλαο Τζαμιτζή για την υποστήριξη και υπομονή του και τους κοντινούς μου φίλους Λίντα Ρόντο, Θεόδωρο Τσούτσουρα και Δημήτριο Τσουράπα για την αμέριστη συμπαράσταση και συνεχή παρότρυνση. Σας ευχαριστώ θερμά!

Περίληψη .....	4
Abstract.....	5
1. Εισαγωγή .....	10
1.1 Δείκτες ποιότητας νερού .....	14
1.1.1 Φυσικοχημικοί δείκτες .....	15
1.1.2 Βιοχημικοί δείκτες.....	21
1.1.3 Μικροβιολογικά χαρακτηριστικά.....	23
1.2 Μέθοδοι επεξεργασίας του νερού .....	24
1.2.1 Προκαταρκτική εσχάρωση .....	25
1.2.2 Αερισμός.....	25
1.2.3 Κροκίδωση .....	25
1.2.4 Συσσωμάτωση .....	26
1.2.5 Καθίζηση .....	27
1.2.6 Διήθηση .....	27
1.2.7 Προσρόφηση .....	28
1.2.8 Ιοντοεναλλαγή.....	30
1.2.9 Απολύμανση.....	32
1.2.10 Απόσταξη .....	34
1.3 Αντίστροφη όσμωση .....	35
1.3.1 Ιστορική αναδρομή.....	35
1.3.2 Το φαινόμενο της αντίστροφης όσμωσης.....	36
1.3.3 Ερμηνεία της αντίστροφης όσμωσης.....	38
1.4 Μεμβράνες και υλικά .....	41
1.4.1 Τύποι των μεμβρανών .....	43
1.4.2 Στοιχεία μεμβρανών (modules).....	45
1.4.3 Σπειροειδώς τυλιγμένες μεμβράνες.....	45
1.4.4 Μεμβράνες διατάξεως λεπτών πορωδών ινών .....	47
1.4.5 Σωληνωτού τύπου μεμβράνες .....	48
1.4.6 Στοιχεία μεμβρανών με δίσκους και πλαίσια .....	50
1.5 Κύριες κατηγορίες μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης.....	50
1.5.1 Μεμβράνες αφαλάτωσης θαλασσινού και υφάλμυρου νερού.....	51
1.5.2 Μεμβράνες Νανοδιήθησης.....	51
1.5.3 Μεμβράνες Υπερδιήθησης.....	52

1.5.4 Επιλεκτικότητα μεμβράνης .....	53
1.5.5 Παραδείγματα μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης.....	53
<b>1.6 Το σύστημα της αντίστροφης όσμωσης .....</b>	<b>54</b>
1.6.1 Ερμηνεία του συστήματος της αντίστροφης όσμωσης.....	54
1.6.2 Λειτουργία μονάδας αντιστρεπτής όσμωσης .....	58
1.6.3 Στάδια επεξεργασίας νερού με τη μέθοδο της αντίστροφης όσμωσης.....	59
<b>2. Πειραματικό μέρος.....</b>	<b>66</b>
2.1 Σκοπός.....	66
2.2 Υλικά και μέθοδοι ανάλυσης.....	67
2.2.1 Δειγματοληψία .....	67
2.2.2 Θολερόμετρο .....	70
2.2.3 Αγωγιμόμετρο .....	72
2.2.4 Ανακλασίμετρο (Reflectometer) .....	74
2.2.5 Αυτόματος Τιτλοδότης.....	75
2.2.6 Φασματοφωτόμετρα απλής δέσμης για την περιοχή ορατού-υπεριώδους.....	77
2.2.7 Θερμοαντιδραστήρας .....	79
2.2.8 Μέτρηση Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (COD) .....	80
2.2.9 Προσδιορισμός TOC .....	82
2.2.10 Προσδιορισμός pH .....	83
2.2.11 Προσδιορισμός σκληρότητας κα χλωριόντων με χρήση αυτόματου τιτλοδότη και ηλεκτρόδιο REDOX (δυναμομετρία).....	84
<b>3. Αποτελέσματα .....</b>	<b>87</b>
3.1 Προσδιορισμός σκληρότητας.....	87
3.2 Προσδιορισμός συγκέντρωσης Χλωριόντων .....	107
3.3 Μέτρηση αγωγιμότητας .....	122
3.4 Μέτρηση αλατότητας.....	123
3.5 Μέτρηση COD .....	124
3.6 Μέτρηση TOC.....	125
3.7 Μέτρηση ολικών στερεών .....	125
3.8 Μέτρηση $\text{NO}_3^-$ .....	126
3.9 Μέτρηση $\text{NO}_2^-$ .....	128
3.10 Μέτρηση $\text{Ca}^{+2}$ .....	130
3.11 Μέτρηση $\text{Mg}^{+2}$ .....	131
3.12 Μέτρηση $\text{NH}_4^+$ .....	132
3.13 Μέτρηση $\text{SO}_4^{-2}$ .....	133
3.14 Μέτρηση $\text{SO}_3^{-2}$ .....	133

3.15 Μέτρηση $K^+$ .....	134
3.16 Μέτρηση $PO_4^{-3}$ .....	135
4. Συμπεράσματα .....	138
5. Βιβλιογραφία .....	140





## 1. Εισαγωγή

Το νερό αδιαμφισβήτητα είναι το πιο πολύτιμο αγαθό που διαθέτουμε πάνω στη γη. Συσχετίζεται με την ίδια μας την ύπαρξη, αφού στο ανθρώπινο σώμα περιέχεται σε ποσοστό 70%. Εάν κάποιος προσπαθήσει να αναλογιστεί τις συνέπειες της παντελής έλλειψης του νερού, τότε μόνο ίσως συνειδητοποιήσει τον πραγματικό ρόλο που αυτό κατέχει στην καθημερινή μας ζωή. Όμως, ο σύγχρονος τρόπος ζωής έχει οδηγήσει σε μια αλόγιστη σπατάλη αυτού του πολύτιμου αγαθού και η μελλοντική πιθανότητα λειψυδρίας έχει κινητοποιήσει μια σειρά ενεργειών και προσπαθειών που σαν στόχο έχουν να περιορίσουν αυτή την σπατάλη. Προς αυτή την κατεύθυνση, έχουν πραγματοποιηθεί προσπάθειες να βρεθούν τρόποι ανακύκλωσης του νερού όπως για παράδειγμα μέσω της αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού.

Το νερό κατανέμεται στη γη σε ποσοστό περίπου 97% στους ωκεανούς και 3% ως γλυκό νερό (Cunningham-Saigo, 2001). Μόλις το 1% από το γλυκό νερό είναι προσβάσιμο σε εμάς μέσω των ποταμών και των λιμνών, αφού το μεγαλύτερο ποσοστό αποτελεί τους παγετώνες και τα υπόγεια νερά. Από αυτό το 1%, μόνο ένα μικρό ποσοστό καταλήγει να είναι πόσιμο νερό (πίνακας 1.1). Τα υπόγεια και τα επιφανειακά ύδατα, αποτελούν μέχρι σήμερα την πρώτη επιλογή για παροχή πόσιμου νερού. Τις τελευταίες δεκαετίες, όμως, παρατηρείται μια διαρκής μείωση των αποθεμάτων αυτών, η οποία έχει αντίκτυπο στην ζωή εκατομμυρίων ανθρώπων στον πλανήτη.

Στις μέρες μας το νερό εξυπηρετεί διάφορες ανάγκες όπως οι μεταφορές αγαθών, των ρυπαντικών φορτίων και της θερμότητας, τη δημιουργία πρώτης ύλης, ενέργειας και προϊόντων ή ακόμη και για άλλες δραστηριότητες ψυχαγωγίας. Ένας κάτοικος του νότιου ημισφαιρίου καταναλώνει περίπου 15-50 λίτρα νερού την ημέρα, ενώ ένας μέσος κάτοικος του βορείου ημισφαιρίου έχει μέση κατανάλωση νερού από 150 λίτρα ημερησίως τα οποία γίνονται 500, αν προστεθούν οι ανάγκες της βιομηχανίας (Γεωργόπουλος, 2001). Όσο ο πληθυσμός της γης αυξάνεται, οι ανάγκες για νερό θα είναι ολοένα και μεγαλύτερες.

Τόπος	Ποσοστό %
Ωκεανοί	97,5
Ατμόσφαιρα	0,001
Ποταμοί, λίμνες και υπόγεια νερά	0,8
Πολικοί πάγοι	1,7

**Πίνακας 1.1:** Η ποσοστιαία κατανομή του νερού στον πλανήτη

Πηγή: EnvironmentalScience, Cunningham-Saigo

Η ανεπάρκεια του νερού που εκφράζεται με το φαινόμενο της λειψυδρίας σε ορισμένες περιοχές, αποτελεί ένα παγκόσμιο πρόβλημα. Χώρες όπως η Βορειοδυτική Κίνα, η δυτική και νότια Ινδία, περιοχές του Πακιστάν και του Μεξικού, καθώς και οι δυτικές ακτές των ΗΠΑ και της Νότιας Αμερικής προβλέπεται ότι θα έχουν μεγάλη ανάγκη σε νερό. Ειδικά στη Μέση Ανατολή και στην Αφρική, η ανάγκη αυτή ενδέχεται να είναι η αιτία συνεργασιών αλλά και διενέξεων τα επόμενα χρόνια. Η λειψυδρία είναι και ένα από τα κύρια προβλήματα στην Περιοχή της Μεσόγειου. Οι κλιματολογικές συνθήκες, όπως το ξηρό κλίμα εντείνουν το πρόβλημα αυτό, καθώς και η αυξημένη κατανάλωση του νερού κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και τέλος η γεωργία. Ο σύγχρονος τρόπος ζωής φαίνεται να επιδεινώνει την κατάσταση σε συνδυασμό με την αλλαγή του τρόπου εκμετάλλευσης της γης και τις κοινωνικές-οικονομικές μεταβολές, αλλά και εξαιτίας της πιθανής μείωσης των βροχοπτώσεων, εξαιτίας των κλιματολογικών αλλαγών.

Το ζήτημα των περιορισμένων υδατικών αποθεμάτων απαιτεί, εκτός από σύμπραξη ανάμεσα στα κράτη σε πολιτικό επίπεδο και τη συνεργασία και ανταλλαγή απόψεων και επιστημονικών γνώσεων καθώς και τεχνολογική ανάπτυξη. Οι νέες εξελιγμένες τεχνολογίες εξοικονόμησης αλλά και παραγωγής νερού, σε συνδυασμό με τη συνετή και βιώσιμη χρήση των διαθέσιμων υδάτινων πόρων, γεννούν αισιοδοξία για την περιστολή του προβλήματος τα μετέπειτα χρόνια. Οι σύγχρονες μέθοδοι μπορούν να συμβάλλουν ώστε να μειωθούν οι ανάγκες για νερό στη γεωργία κατά 10-50% στις βιομηχανίες κατά 40-90% και στις πόλεις κατά το 1/3 χωρίς υποβίβαση του βιοτικού επιπέδου.

Το μείζον θέμα είναι να διαμορφώσει ο σημερινός άνθρωπος μια κουλτούρα-συνείδηση, ώστε να συμβάλλει ουσιαστικά στην αντιμετώπιση του προβλήματος της έλλειψης του νερού. Πέραν αυτού όμως έχουν ληφθεί μέτρα για την εξοικονόμηση του νερού και αφορούν, εκτός από την δημιουργία φραγμάτων και τον εκσυγχρονισμό των αρδευτικών συστημάτων, τα παρακάτω:

- ❖ Αφαλάτωση του θαλασσινού νερού
- ❖ Τεχνητή βροχή
- ❖ Ανακύκλωση του χρησιμοποιημένου νερού
- ❖ Υδατοδεξαμενές
- ❖ Περισσότερο αποτελεσματική κατανομή του διαθέσιμου νερού
- ❖ Χρήση της βιοτεχνολογίας
- ❖ Ανακύκλωση των νερών των υπονόμων για αρδευτικές χρήσεις
- ❖ Συλλογή των υδάτων των πλημμύρων
- ❖ Εκμετάλλευση των εποχιακά ρεόντων υδάτων.
- ❖ Επίσης μελετάται η περίπτωση της εισαγωγής νερού από άλλες χώρες μέσω αγωγών, υπερδεξαμενόπλοιων ή πλαστικών σάκων.
- ❖ Κατασκευή λιμνοδεξαμενών.
- ❖ Κατασκευή μονάδων αφαλάτωσης.
- ❖ Βελτίωση των υποδομών με αντικατάσταση των πεπαλαιωμένων δικτύων για περιορισμό των απωλειών.
- ❖ Ενημέρωση καταναλωτών για ορθότερη χρήση του νερού.
- ❖ Κατασκευή παράλληλου δικτύου κατώτερης ποιότητας νερού για χρήσεις στις οποίες δεν απαιτείται άριστης ποιότητας νερό.
- ❖ Επεξεργασία των λυμάτων και ανακύκλωση του νερού εξόδου του βιολογικού καθαρισμού για δευτερεύουσες χρήσεις (πότισμα, καθαριότητα, οικοδομικές εργασίες, πλυντήρια αυτοκινήτων, χρήση στα λιμάνια κ.λπ.).
- ❖ Μεταφορά νερού με πλοία από το πλησιέστερο γειτονικό νησί που διαθέτει νερό, ως λύση ανάγκης σε περιπτώσεις που οι άλλες λύσεις δεν εφαρμόζονται.

Στην προκειμένη εργασία η μέθοδος που θα μας απασχολήσει είναι οι μονάδες επεξεργασίας που ασχολούνται με την ποιότητα του νερού και βασίζονται στην μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης. Στον πίνακα 1.2,

παρατίθεται μια κατάσταση με τις εγκατεστημένες μονάδες αφαλάτωσης σε νησιά του Αιγαίου καθώς και κάποια σχετικά στοιχεία (όπως η δυνατή παραγωγή, το έτος εγκατάστασης).

Νησί	Περιοχή	Δυνατή παραγωγή (m <sup>3</sup> /d)	Έτος εγκατάστασης
Σύρος	Άνω Σύρος	120	1993
		250	2000
		500	2002
	Ερμούπολη	800	1993
		800	1997
		250 (2 μονάδες)	2001
		800 (4 μονάδες)	2002
	Ποσειδωνία	750 (3 μονάδες)	2002
Ίος	Μυλοπότας	1000	2001
Μύκονος	Κόρφος	1200 (2 μονάδες)	1989
		2250 (3 μονάδες)	2001
Πάρος	Νάουσα	1200	2002
Σίφνος	Καμάρες	500	2001
Τήνος	Τήνος	500	2001
Σαντορίνη	Οία	380	1995
		400	1994
		150	1998
Μεγίστη	Μεγίστη	50	1990
Νίσυρος	Νίσυρος	300	1991
		350	2002
Χίος	Ομηρούπολη	600	2000
Ιθάκη		500	1983
Μήλος		2600	2007
Ηρακλεία	Πλωτή μονάδα	70	2008

**Πίνακας 1.2:** Εγκατεστημένες μονάδες αφαλάτωσης στα νησιά του Αιγαίου και του Ιονίου (Karagiannis et al., 2007).

## 1.1 Δείκτες ποιότητας νερού

Η ποιότητα του νερού είναι ένα ζήτημα υψίστης σημασίας, αφού το νερό κατέχει εξέχοντα ρόλο στη διατροφή αλλά ακόμα και για τη σημασία που έχει στην ικανοποίηση των κοινωνικών αναγκών του ανθρώπου. Όλα τα φυσικά νερά περιέχουν αιωρούμενες ή αδιάλυτες ανόργανες ή οργανικές χημικές ουσίες σε κάποιο βαθμό. Ανεξάρτητα της υψηλής συγκέντρωσης τους ή μη πρέπει να θεωρούνται ως προσμείξεις ανάλογα τον τρόπο χρήσης του νερού. Οι ακαθαρσίες μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής (πίνακας 1.3):

<b>Ανόργανες</b>	<b>Οργανικές</b>	<b>Βιολογικά ενεργές</b>
Αιωρούμενες	Αιωρούμενες	Βακτήρια
Κολλοειδείς	Αμιγείς	Ιοί
Διαλυτές	Ανάμεικτες	Άλγη
	Ευδιάλυτες	Πρωτόζωα

**Πίνακας 1.3:** Ακαθαρσίες που απαντώνται στο νερό, ταξινομημένες ανά κατηγορία (Robert C. Rosaler, 2002).

Το τρεχούμενο νερό μπορεί να περιέχει από άμμο μέχρι και χαλίκια διαφόρου μεγέθους. Στο νερό επίσης μπορεί να βρίσκονται οργανικά στερεά, άλγη, και βακτήρια. Υπάρχουν συνήθως και διαλυμένα ανόργανα στερεά, όπως είναι τα διττανθρακικά, τα θειικά και χλωριούχα άλατα ασβεστίου, το μαγνήσιο, τα νάτριο, καθώς και ενώσεις του διοξειδίου του πυριτίου, του σιδήρου και του μαγγανίου. Μέταλλα και οργανικές ενώσεις χωρίς σίδηρο μπορούν να είναι παρόντες σε χαμηλές συγκεντρώσεις, τα οποία, ωστόσο, υπερβαίνουν τα προτεινόμενα όρια της EPA (Environmental Protection Agency). Η παρουσία του διαλυμένου ασβεστίου και ενώσεων του μαγνησίου (που ορίζεται ως σκληρότητα) οδηγεί σε προβλήματα λειτουργίας των λεβήτων και των συστημάτων ψύξης. Άλλα διαλυμένα στερεά μπορούν να θεωρηθούν ως προσμείξεις, ανάλογα με τις συγκεντρώσεις τους και την προβλεπόμενη χρήση του νερού.

Η εμπειρία έχει αποδείξει ότι ποικίλοι παράγοντες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη πριν παρθεί μια απόφαση σχετικά με την ποιότητα των υδάτων. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να πραγματοποιούνται μετρήσεις και έλεγχος των συγκεντρώσεων των διαλυμένων ανόργανων και οργανικών ουσιών. Ο έλεγχος αυτός πρέπει να επεκταθεί και σε άλλα συστατικά, όπως βαρέα μέταλλα, απορρυπαντικά, φυτοφάρμακα κ.α. Προς την ποιοτική προσέγγιση του πόσιμου νερού έχουν τεθεί κάποια όρια στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού προς ανθρώπινη κατανάλωση. Τα ποιοτικά όρια ορίζονται με βάση χημικές και βιοχημικές και μικροβιολογικές παραμέτρους. Παρακάτω παρουσιάζονται επιγραμματικά οι δείκτες ποιότητας του νερού (πίνακας 1.4):

Ποιοτικά χαρακτηριστικά	Παράμετρος
<b>Φυσικοχημικά</b>	Θερμοκρασία Οξύτητα – Αλκαλικότητα Αγωγιμότητα – Αλατότητα Θολότητα Οσμή Χρώμα Στερεές ουσίες Άλατα – Σκληρότητα Διάφορα κατιόντα ( $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{NH}_4^+$ ) Διάφορα ανιόντα ( $\text{NO}_2^-$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{Cl}^-$ ) Θρεπτικά συστατικά (N, P, S, Si) Ιχνοστοιχεία και μέταλλα
<b>Βιοχημικά</b>	Διαλυμένο οξυγόνο (DO) Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD) Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD) Ολικός Οργανικός Άνθρακας (TOC)
<b>Μικροβιολογικά</b>	Ιοί Βακτήρια Μύκητες Φύκια Πρωτόζωα Έλμινθες Μαλακόστρακα

Πίνακας 1.4: Ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού (Νταρακάς Ε., 2009)

### 1.1.1 Φυσικοχημικοί δείκτες

- Θερμοκρασία νερού

Η θερμοκρασία νερού είναι μια σημαντική παράμετρος καθότι συμμετέχει σε μια πληθώρα φυσικοχημικών και βιοχημικών αντιδράσεων. Το νερό σε ένα υδάτινο περιβάλλον έχει σχέση με την ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου και είναι αυτό που δρα σαν καταλύτης των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα αυτό. Η μέτρησή της θερμοκρασίας είναι μια εύκολη διαδικασία, αλλά και ενδεικτική για τον έλεγχο ενός υδάτινου συστήματος. Όλες οι μονάδες επεξεργασίας νερού έχουν αυτόματες ρυθμίσεις μέτρησης και καταγραφής της θερμοκρασίας στις διάφορες φάσεις της επεξεργασίας. Το πόσιμο νερό πρέπει να διαθέτει επιτρεπτά όρια ανάμεσα στους 5 και 12° C, άνω αυτών των ορίων το νερό παύει να είναι αισθητικά και γευστικά ικανοποιητικό. Πάνω από τους 12°C το νερό καθίσταται λιγότερο κατάλληλο για ορισμένες χρήσεις, διότι ευνοεί τον πολλαπλασιασμό των μικροοργανισμών.

- Χρώμα

Το νερό χαρακτηρίζεται ως άχρωμο. Οποιαδήποτε υποψία ή παρουσία χρώματος είναι συνδεδεμένη με υποβαθμισμένη ποιότητα του νερού, αλλά όχι απαραίτητα και επικίνδυνου προς κατανάλωση νερού. Το χρώμα αυτό μπορεί να προκαλείται από διαλυμένες ή κolloειδείς οργανικές ύλες, ή ανόργανες ουσίες. Προκειμένου να αναγνωρισθεί η προέλευση του χρώματος, θα πρέπει να γίνει χημικός έλεγχος.

- Οσμή και Γεύση

Το νερό είναι άγευστο και άχρωμο ή καλύτερα έχει τη δική του χαρακτηριστική οσμή και γεύση. Τα ιδιαίτερα αυτά χαρακτηριστικά αποδίδονται στην παρουσία χημικών ουσιών όπως οι φαινόλες, το χλώριο, η αμμωνία, το υδρόθειο, κ.λπ. Επίσης η ιδιάζουσα αυτή γεύση αποδίδεται στα διαλυμένα άλατα (ασβεστίου, νατρίου, μαγνησίου κ.λπ.) καθώς και στα διαλυμένα αέρια (οξυγόνο ή CO<sub>2</sub>) που εμπεριέχονται σ' αυτό. Ενώ αντίθετα όταν η οσμή και η γεύση είναι ιδιαίτερα έντονη ή ακόμα και αποκρουστική,



αυτό πιθανόν οφείλεται στην παρουσία μικροοργανισμών. Σ' αυτήν την περίπτωση πρέπει να πραγματοποιηθούν έλεγχοι στο νερό καθότι υπάρχει η υποψία ρύπων.

- Θολότητα

Η θολότητα οφείλεται σε αιωρούμενα σωματίδια τα οποία μπορεί να είναι ανόργανες ουσίες, όπως πηλίνα, άλευρα πετρωμάτων, βούρκος, ανθρακικό ασβέστιο, πυρίτιο, σίδηρο, μαγγάνιο, θείο, ή βιομηχανικά απόβλητα. Ακόμα, η θόλωση μπορεί να προκληθεί από οργανικές ουσίες όπως τα διάφορων μικροοργανισμών, πολύ λεπτής φυτική ή ζωική ύλη, γράσο, λίπος, λάδι, και άλλα. Ενώ η θολερότητα μπορεί να οφείλεται σε μια ενιαία εξωτερική ουσία στο νερό, μπορεί στην πραγματικότητα να είναι ένα μίγμα πολλών ουσιών. Το μέγεθος τους μπορεί να ποικίλει από μικρά κολλοειδή σώματα μέχρι χονδροειδή σιτάρια της άμμου που παραμένουν αιωρούμενα για όσο διάστημα το νερό ανακινείται.

Το θολό νερό πρέπει να εξεταστεί για ρύπανση. Η κατανάλωση του μπορεί να καταστεί επικίνδυνη καθότι η απολύμανση του πόσιμου νερού δεν είναι αρκετή. Αυτό συμβαίνει γιατί οι παθογόνοι οργανισμοί εγκλωβίζονται στα σωματίδια που αιωρούνται και με αυτόν τον τρόπο προστατεύονται από το απολυμαντικό. Η δομή αυτών των σωματιδίων επιτρέπει την απορρόφηση επιβλαβών οργανικών ή ανόργανων ουσιών.

- Ολικά στερεά

Τα ολικά στερεά αφορούν τις ουσίες που παραμένουν αφού το νερό εξατμιστεί στους 105°C. Διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: τα διαλυμένα ολικά στερεά, τα οποία δεν είναι ορατά με γυμνό μάτι (μόρια και ιόντα με μέγεθος μικρότερο από 1 nm), τα κολλοειδή, τα οποία δεν είναι εμφανή εξαιτίας του μεγέθους τους και σε αδιάλυτα τα οποία είναι ορατά (μέγεθος μεγαλύτερο από 1μm). Επιπλέον τα αδιάλυτα ολικά στερεά χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες σε συνάρτηση με το ειδικό τους βάρος: στις καθιζάνουσες, τις αιωρούμενες και τις επιπλέουσες (Νταρακάς Ε., 2009).

- pH

Η παράμετρος του pH προσδίδει κάποια μοναδικά γνωρίσματα στο νερό και έχει περισσότερο σχέση με τη διαβρωτικότητα του. Αναφέρεται σαν τιμή στη συγκέντρωση των κατιόντων υδρογόνου ( $H^+$ ) του διαλύματος. Το καθαρό νερό είναι ιονισμένο σε κατιόντα υδρογόνου ( $H^+$ ) και ανιόντα υδροξυλίου ( $OH^-$ ) σύμφωνα με την εξίσωση:



Ως pH ορίζεται «ο αρνητικός δεκαδικός λογάριθμος της συγκέντρωσης των κατιόντων υδρογόνου» ( $pH = -\log[H^+]$ ). Το pH μπορεί να πάρει τιμές από 0-14. Η περιοχή 0-7 αφορά τα όξινα διαλύματα, ενώ από 7-14 είναι τα αλκαλικά. Τα περισσότερα νερά στη φύση έχουν pH μεταξύ 6 και 9. Το πόσιμο νερό το οποίο έχει τιμές pH μεγαλύτερες από 10 ή τιμές μικρότερες του 4, έχει αποδειχθεί ότι προκαλεί ερεθισμό στα μάτια και στο δέρμα. Η παραμετρική τιμή για το pH είναι:  $6,5 < pH < 9,5$ .

Η τιμή του pH του νερού αντικατοπτρίζει τη χημική του σύσταση. Το pH δρα ως ρυθμιστής των χημικών αντιδράσεων επιταχύνοντας ή παρεμποδίζοντας τες. Το pH των φυσικών νερών παρότι υφίστανται ποικίλες μεταβολές παραμένει αμετάβλητο εξαιτίας της μεγάλης ρυθμιστικής ικανότητας των νερών. Σε περιπτώσεις όπου εξωγενείς παράγοντες παρεμβαίνουν, τότε το pH υφίσταται αξιόλογες και σχετικώς μόνιμες μεταβολές. Η όξινη βροχή, τα αστικά και βιομηχανικά απόβλητα ακόμα και η σύσταση του υπεδάφους της λεκάνης απορροής συμβάλλουν ουσιαστικά στη διαμόρφωση του pH. Τιμές του pH άνω του 7 παρατηρούνται σε φαινόμενα έντονης φωτοσυνθετικής δραστηριότητας-ευτροφισμός, αλλά και σε αυξημένες συγκεντρώσεις ασβεστίου, νατρίου και μαγνησίου.

- Αγωγιμότητα

Η αγωγιμότητα, δηλαδή η ικανότητα του να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των διαλυμένων ιόντων στο διάλυμα. Επιπλέον παίζει ρόλο το σθένος και το είδος των ιόντων. Επίσης η αγωγιμότητα επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και συγκεκριμένα η άνοδος της

θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της. Η παραμετρική τιμή είναι 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  στους 20°C .

- Σκληρότητα

Η έννοια της σκληρότητας είναι ίσως από τις πιο γνωστές έννοιες όσον αφορά το νερό. Θεωρείται ανεπιθύμητο χαρακτηριστικό, γιατί προσδίδει ιδιάζουσα γεύση στο νερό, καθυστερεί το βράσιμο των τροφίμων και αποτρέπει το σχηματισμό αφρού με τη χρήση σαπουνιού, ακόμα είναι υπεύθυνο για το σχηματισμό επικαθίσεων στις σωληνώσεις και τις ηλεκτρικές συσκευές. Βιομηχανίες όπως βυρσοδεψίας, βαφείας, χημικών και φαρμακευτικών προϊόντων διαθέτουν ειδικές εγκαταστάσεις, ώστε να μειώσουν τη σκληρότητα του νερού, αφού το σκληρό νερό είναι επιζήμιο τόσο στην κατεργασία, όσο και στο τελικό προϊόν. Εν αντίθεση στην ζυθοποιία και στην αρτοποιία είναι επιθυμητή γιατί βοηθάει στην ενζυμική δράση.

Όσον αφορά την υγεία του ανθρώπου οι υψηλές τιμές σκληρότητας του νερού δεν είναι επικίνδυνες ενώ έχει τεκμηριωθεί ότι υπάρχει μια σημαντική αλληλοεπίδραση ανάμεσα στην αυξημένη σκληρότητα και τη μείωση των καρδιαγγειακών παθήσεων. Νερό με σκληρότητα μέχρι και 500 mg/l  $\text{CaCO}_3$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πόσιμο, αλλά οι πιο καλές τιμές είναι μεταξύ 80 και 150 mg/l (Νταρακάς Ε., 2009).

Ουσιαστικά η σκληρότητα εκφράζει το σύνολο των διαλυμένων αλάτων και έχει άμεση συσχέτιση με τις γεωλογικές παραμέτρους του εδάφους από όπου προέρχεται το νερό, καθώς επηρεάζεται και από το pH και τη θερμοκρασία. Η σκληρότητα διακρίνεται σε δυο τύπους:

- την ανθρακική (ή παροδική) σκληρότητα που οφείλεται στα όξινα ανθρακικά (διπτανθρακικά) άλατα. Αυτού του είδους η σκληρότητα μπορεί να ξεπεραστεί με την άνοδο της θερμοκρασίας στο σημείο βρασμού του νερού. Κατά τη διάρκεια της αντίδρασης αυτής τα διαλυμένα όξινα ανθρακικά άλατα των δύο μετάλλων καταβυθίζονται ως αδιάλυτα ανθρακικά άλατα, ενώ ταυτόχρονα απελευθερώνεται διοξειδίου του άνθρακα, σύμφωνα με τα παρακάτω:



- τη μη ανθρακική (μόνιμη) σκληρότητα που οφείλεται στα υπόλοιπα άλατα ( χλωριούχα, θειικά, νιτρικά, ανθρακικά) και δεν αίρεται με βρασμό.
- Η ολική σκληρότητα είναι η παροδική και μόνιμη οφείλεται στα κατιόντα ασβεστίου ( $\text{Ca}^{2+}$ ) και μαγνησίου ( $\text{Mg}^{2+}$ ) που εκφράζεται με τη μορφή του ανθρακικού ασβεστίου ( $\text{CaCO}_3$ ) και ανθρακικού μαγνησίου ( $\text{MgCO}_3$ ). Σε αρκετές περιπτώσεις περιέχονται και άλλα κατιόντα όπως του στροντίου, του βαρίου, του μαγγανίου, του ψευδαργύρου, του σιδήρου και του αργιλίου.

- Υπολειμματικό χλώριο

Η παράμετρος αυτή είναι σημαντική γιατί αποδεικνύει εάν η χλωρίωση ήταν αποτελεσματική και επαρκής. Υπολειμματικό χλώριο είναι το ενεργό χλώριο υπό τη μορφή υποχλωριώδους οξέως ( $\text{HOCl}$ ) και υποχλωριωδών ιόντων ( $\text{OCl}^-$ ). Ενεργό χλώριο είναι όλες οι ενώσεις χλωρίου που ανιχνεύονται στο νερό και έχουν απολυμαντική δράση.

- Χημικά στοιχεία-συστατικά του νερού

Στο νερό αποτελούν σημαντικούς παραμέτρους η παρουσία και η συγκέντρωση διάφορων κατιόντων, όπως τα  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ , διάφορων ανιόντων, όπως τα  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ . Επίσης σημασία έχει η μέτρηση και διάφορων θρεπτικών συστατικών όπως το N, P, S, Si, καθώς και η μέτρηση της συγκέντρωσης των ιχνοστοιχείων και μετάλλων.

α/α	Παράμετρος	Μονάδα έκφρασης αποτελεσμάτων	Παραμετρική τιμή*
1	Ιόντα υδρογόνου	μονάδα	pH 6.5≤pH≤9.5

2	Αγωγιμότητα	μS/cm	2500
3	Χλωριούχα άλατα	mg/l	250
4	Θειικά άλατα	mg/l	250
5	Νάτριο	g/l	200
6	Αργίλιο	μg/l	200
7	Νιτρικά άλατα	mg/l	50
8	Νιτρώδη άλατα	mg/l	0,50
9	Βρωμικά άλατα	mg/l	10
10	Κυανιούχα άλατα	μg/l	50
11	Αμμώνιο	mg/l	0,50
12	Φθοριούχα άλατα	mg/l	1,5
13	Σίδηρος	μg/l	200
14	Μαγγάνιο	μg/l	50
15	Χαλκός	mg/l	2,0
16	Αρσενικό	μg/l	10
17	Χρώμιο	μg/l	50
18	Υδράργυρος	μg/l	1,0
19	Μόλυβδος	μg/l	10
20	Νικέλιο	μg/l	20
21	Κάδμιο	μg/l	5,0

**Πίνακας 1.5:** Ενδεικτικές παράμετροι του πόσιμου νερού(Οδηγία 98/83/ΕΚ του Συμβουλίου της 3ης/11/1998).

\*Η παραμετρική τιμή, με βάση την Οδηγία 98/83/ΕΚ, αναφέρεται στη συγκέντρωση καταλοίπων μονομερούς στο νερό, όπως υπολογίζεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές περί μέγιστης μετανάστευσης εκ του αντιστοίχου πολυμερούς, όταν βρίσκεται σε επαφή με το νερό.

### 1.1.2 Βιοχημικοί δείκτες

- Διαλυμένο οξυγόνο

Το διαλυμένο οξυγόνο (DO) αναφέρεται στο οξυγόνο που βρίσκεται στο νερό. Το οξυγόνο αυτό προέρχεται από τη διάχυση του ατμοσφαιρικού αέρα, αλλά και ως προϊόν της φωτοσύνθεσης. Ένα απλουστευμένο παράδειγμα δίνεται παρακάτω:

Φωτοσύνθεση (με την παρουσία του φωτός και της χλωροφύλλης)



Τα επίπεδα του διαλυμένου οξυγόνου ποικίλλουν ανάλογα με παράγοντες όπως η θερμοκρασία του νερού, την ώρα της ημέρας, την εποχή, το βάθος, το υψόμετρο και την ταχύτητα ροής. Νερό σε υψηλότερες θερμοκρασίες και μεγαλύτερα υψόμετρα θα έχουν λιγότερο διαλυμένο οξυγόνο. Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου φτάνει στο αποκορύφωμά της κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τη νύχτα μειώνεται, καθώς η φωτοσύνθεση έχει σταματήσει, ενώ οι διαδικασίες που καταναλώνουν οξυγόνο όπως η αναπνοή, την οξειδωση και η αναπνοή συνεχίζονται.

Το διαλυμένο οξυγόνο είναι απαραίτητο για την υδρόβια ζωή. Μια χαμηλή ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου (μικρότερη από 2 mg/l) θα υποδήλωνε την κακή ποιότητα του νερού. Η μικρή αυτή ποσότητα θα αποτελούσε ένα εμπόδιο στην διατήρηση πολλών ευαίσθητων οργανισμών στην υδρόβια ζωή. Η παρουσία του οξυγόνου αποτελεί ένα δείκτη της παρουσίας και ανάπτυξης των μικροοργανισμών καθώς είναι απαραίτητο σε διάφορες αντιδράσεις απαραίτητες για την επιβίωση τους, όπως η καύση των οργανικών ουσιών.

Οι ανθρώπινοι παράγοντες που επηρεάζουν την ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου περιλαμβάνουν την προσθήκη οργανικών αποβλήτων που καταναλώνουν οξυγόνο, την προσθήκη θρεπτικών ουσιών, την αλλαγή της ροής του νερού, την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού, και την προσθήκη χημικών ουσιών.

- Οργανικές ουσίες

Οι οργανικές ουσίες που ανιχνεύονται στο νερό ενδέχεται να έχουν φυσική προέλευση, δηλαδή από τη διάσπαση των οργανικών ενώσεων που συμβαίνουν φυσικά, μπορεί να προέρχονται από τις οικιακές, γεωργικές και βιομηχανικές απορροές, αλλά ακόμα είναι πιθανόν να προέρχονται από τις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την επεξεργασία και μεταφορά του νερού.

- COD

Ο όρος COD (Chemical Oxygen Demand) αναφέρεται στη συνολική ποσότητα των χημικών διαθέσιμων προς οξείδωση ουσιών που περιέχονται στο δείγμα προς εξέταση. Συνήθως η οξείδωση των

οργανικών ουσιών σε CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O πραγματοποιείται με την επίδραση ενός ισχυρού οξειδωτικού μέσου. Ένα τέτοιο παράδειγμα οξειδωτικού είναι το διχρωμικό κάλιο(K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) σε όξινο περιβάλλον.

➤ BOD (Biochemical Oxygen Demand)

Το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο, BOD, είναι η πιο διαδεδομένη παράμετρος για την αξιολόγηση του οργανικού φορτίου των λυμάτων και των ρυπασμένων νερών. Το BOD ορίζεται ως η ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται από τους μικροοργανισμούς για την αεροβική αποδόμηση των οργανικών υλών. Η ταχύτητα της αντίδρασης έχει σχέση με το είδος της οργανικής ύλης που υπάρχει στο δείγμα. Ένα μεγάλος αριθμός οργανικών ουσιών συμμετέχουν σε αντιδράσεις βιολογικής οξείδωσης, όπου μετατρέπονται σε άλλες απλές ενώσεις με ανάλογα προϊόντα όπως η αμμωνία (NH<sub>3</sub>), το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και νερό (H<sub>2</sub>O). Συνεπώς όσο οι τιμές του BOD είναι υψηλές, τόσο το οργανικό φορτίο θα είναι και αυτό υψηλό. Έτσι το BOD λαμβάνεται ως δείκτης της οργανικής ρύπανσης των νερών.

### 1.1.3 Μικροβιολογικά χαρακτηριστικά

- Μικροβιολογικοί παράμετροι

Η ανίχνευση και ο προσδιορισμός της μικροβιακής μόλυνσης του νερού είναι μια χρονοβόρα και πολύπλοκη εργασία. Η κατανάλωση πόσιμου νερού μολυσμένου νερού από παθογόνους μικροοργανισμούς μπορεί να καταστεί επικίνδυνη για τον άνθρωπο. Προς την κατεύθυνση του ελέγχου του νερού έχουν προσδιοριστεί μικροβιολογικοί δείκτες, που είναι οργανισμοί οι οποίοι πιστοποιούν την ύπαρξη παθογόνων μικροοργανισμών και διαθέτουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Σχεδόν κανένας μικροοργανισμός δεν πληροί τις προϋποθέσεις για την ανίχνευση ενός μεγάλου εύρους ειδών και έτσι επιπλέον εξετάσεις εργαστηρίου αποδεικνύουν τυχόν παρουσίες μικροοργανισμών.

## 1.2 Μέθοδοι επεξεργασίας του νερού

Το νερό αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινής μας ζωής. Η κατανάλωση του και η χρήση χωρίς προηγούμενη επεξεργασία είναι άκρως επικίνδυνη για τον άνθρωπο. Το νερό για να αποκτήσει τις κατάλληλες προδιαγραφές υφίσταται διάφορων ειδών και σταδίων επεξεργασίες. Το φυσικό κυρίως το επιφανειακό νερό περιέχει πλήθος ανεπιθύμητων συστατικών από διάφορους παθογόνους ή μη μικροοργανισμούς ως και διάφορα στοιχεία όπως χρώμα και διάφορα άλλα αιωρούμενα σωματίδια. Τα επικίνδυνα απόβλητα των νοικοκυριών, των σηπτικών συστημάτων, ακόμα χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στο γρασίδι και τον κήπο, καύσιμα προερχόμενα από διαρροές δεξαμενών αποθήκευσης, ζωικά απόβλητα, γεωργικά χημικά προϊόντα, οι χώροι υγειονομικής ταφής, καθώς και η έκπλυση των μετάλλων από υδραυλικές εγκαταστάσεις μπορούν να μολύνουν το νερό. Συνεπώς είναι μείζονος σημασίας να γίνει απομάκρυνση κάποιων ανεπιθύμητων συστατικών του νερού ή διαφορετικά να καταστούν αβλαβή με κατάλληλες φυσικές ή χημικές διεργασίες, οι οποίες πραγματοποιούνται στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού.

Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας του νερού αξιοποιώντας διάφορα φυσικοχημικά φαινόμενα και ιδιότητες του νερού επιτυγχάνουν μέσω των διεργασιών τους την απομάκρυνση των ανεπιθύμητων συστατικών του νερού. Παραδείγματα μεθόδων που κυρίως χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό είναι η καθίζηση, η επίπλευση, η χημική κατακρήμνιση, η θρόμβωση, η ιζηματοποίηση, η διήθηση, η απολύμανση, η ιοντοεναλλαγή, η αντίστροφη όσμωση, η προσρόφηση κ.λ.π. Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται μόνες τους ή συνδυαστικά ώστε να επιτευχθεί το καλύτερα αποδεκτό αποτέλεσμα (Khawajiet. al., 2008). Στην περίπτωση που το νερό περιέχει αιωρούμενα σωματίδια, η απομάκρυνση τους μπορεί να πραγματοποιηθεί με καθίζηση εάν το ειδικό βάρος των αιωρουμένων σωματιδίων που περιέχει το νερό είναι μεγαλύτερο από αυτό του νερού, ενώ όταν το ειδικό βάρος είναι μικρότερο του νερού η απομάκρυνση μπορεί να επιτευχθεί με επίπλευση. Όταν υπάρχουν σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους ο διαχωρισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορα κόσκινα, ενώ για σωματίδια πολύ μικρότερου μεγέθους



(κολλοειδή) ο διαχωρισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί με θρόμβωση, όπου θα συμμετέχουν και διάφορες χημικές ουσίες όπως τα θρομβωτικά υλικά που βοηθούν στη συνένωση των αιωρούμενων κολλοειδών με απώτερο σκοπό αυτά να απομακρυνθούν με καθίζηση (CheremisinoffN., 2002).

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου προϋποθέτει λεπτομερή σχεδιασμό της μονάδας επεξεργασίας του νερού και μελέτη του κόστους κατασκευής και λειτουργίας, με προϋπόθεση να γίνει λεπτομερέστατος ποιοτικός έλεγχος (πλήρης χημική και μικροβιολογική εξέταση) του προς επεξεργασία νερού. Είναι σημαντικό να υπάρξει ένα προκαταρκτικό στάδιο κατά το οποίο θα πραγματοποιηθεί σχεδιασμός και εξέταση των φυσικοχημικών λεπτομερειών (Pilot Plant). Παρακάτω παρατίθενται τα κυριότερα στάδια που επεξεργασίας του νερού.

### **1.2.1 Προκαταρκτική εσχάρωση**

Σε αυτό το στάδιο απομακρύνονται ανεπιθύμητα επιπλέοντα στοιχεία που βρίσκονται στο νερό, καθώς κατακρατούνται άλγη και πλαγκτόν. Στόχος αυτού του σταδίου είναι η συγκράτηση σωματιδίων που ενδεχομένως θα προκαλούσαν φράξιμο ή φθορά της μονάδας επεξεργασίας. Η εσχάρωση πραγματοποιείται είτε με χειροκίνητο τρόπο ή με μηχανοκίνητες σχάρες.

### **1.2.2 Αερισμός**

Σε αυτή τη φάση του αερισμού στόχος είναι η καλύτερευση της ποιότητας του νερού, αυτό επιτυγχάνεται επί το πλείστον με την απομάκρυνση των πτητικών οργανικών και διαλυμένων αερίων, στα οποία οφείλεται η δυσάρεστη οσμή και γεύση στο νερό.

### **1.2.3 Κροκίδωση**

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την προσθήκη θειικού αργιλίου στο νερό με σκοπό το σχηματισμό κροκιδωμάτων. Τα κροκιδώματα είναι τα στερεά σωματίδια που με την επίδραση του θειικού αργιλίου

συσσωματώνονται μεταξύ τους και καταβυθίζονται εξαιτίας του μεγαλύτερου βάρους τους. Η όλη διαδικασία πραγματοποιείται σε δύο στάδια, τα οποία διαφοροποιούνται ανάλογα με την ορμή του νερού που αναμειγνύεται. Το νερό μπορεί να αναμειχθεί με μηχανικό τρόπο (χρήση αναδευτήρων), είτε με υδραυλικό τρόπο (μέσω του σχεδιασμού των δεξαμενών) (Cheremisinoff N., 2002, Robert C., 2002) (εικόνα 1.2.3.1).



Εικόνα 1.2.3.1: Συσκευή κροκίδωσης ( Νταρακάς Ε., 2009).

#### 1.2.4 Συσσωμάτωση

Στο στάδιο αυτό τα κολλοειδή σωματίδια που σχημάτισαν μικρές κροκίδες μέσω της αποσταθεροποίησής τους, σχηματίζουν μεγάλες κροκίδες. Παράλληλα έχουν χάσει το χρώμα και τη θολότητα τους. Η συσσωμάτωση επιτυγχάνεται με προσθήκη μεταλλικών οξειδίων, με προσθήκη απλών ή πολύ-ηλεκτρολυτών, με την προσθήκη μακρομορίων και τη χρήση αδιάλυτων υδροξειδίων των μετάλλων (Cheremisinoff N., 2002, Robert C., 2002).

Στηρίζεται στη χρήση διαφόρων χημικών αντιδραστηρίων, στις αντιδράσεις της οξείδωσης και τις μεταβολές του pH, επεμβαίνοντας και αλλάζοντας τη διαλυτότητα των διαφόρων ουσιών προς απομάκρυνση. Σημαντικό ρόλο έχει η ιονική ισχύς του νερού και ο βαθμός οξείδωσης των στοιχείων. Χρησιμοποιείται για την απαλλαγή του νερού από μέταλλα, όξινα ανθρακικά, φθοριούχα και φωσφορικά ιόντα, αλλά και ως μέθοδος μείωσης της σκληρότητας του νερού.

### 1.2.5 Καθίζηση

Τα προς διαχωρισμό σωματίδια (στερεά, μικροοργανισμοί, άργιλος κ.ά.) λόγω του φαινομένου της βαρύτητας κατακάθονται ή επιπλέουν στην επιφάνεια (εικόνα 1.2.5.1). Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε σωματίδια με μέσο μέγεθος μεγαλύτερο από 100  $\mu\text{m}$ . Διαθέτουν ειδικό βάρος μεγαλύτερο από του νερού και βρίσκονται σε συγκέντρωση άνω των 50 mg/l.

Αποτελεί μια διαδομένη μέθοδο εξαιτίας της απλότητας της καθώς και της κατανάλωσης μικρών ποσών ενέργειας που η εφαρμογή της απαιτεί. Ωστόσο υπάρχουν και ορισμένα κριτήρια για να είναι η μέθοδος αποτελεσματική. Τέτοια κριτήρια αποτελούν χαρακτηριστικά όπως το μέγεθος, το ειδικό βάρος και το σχήμα των σωματιδίων. Σε αυτά τα χαρακτηριστικά πρέπει να αναφερθεί καθώς και η πυκνότητα του υγρού, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία, τη συγκέντρωση αλάτων κτλ. Με αυτόν τον τρόπο το νερό καθαρίζεται σε ποσοστό 80%. Μετά το στάδιο της καθίζησης, η επεξεργασία του νερού συνεχίζεται με τη διήθηση (Robert C., 2002).



Εικόνα 1.2.5.1 : Καθίζηση σε κώνο Imhoff (Νταρακάς Ε., 2009).

### 1.2.6 Διήθηση

Σε αυτό το στάδιο απομακρύνονται τα στερεά σωματίδια που περιέχονται στο νερό. Είναι μια χημική διαδικασία κατά την οποία διαλυτά χημικά προϊόντα απομακρύνονται με την προσθήκη αντιδραστηρίου με το οποίο αντιδρούν και σχηματίζουν (στερεό) ίζημα. Η απομάκρυνση αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός φίλτρου που διαθέτει πολύ μικρές οπές και

επιτρέπει την συγκράτηση των στερεών σωματιδίων. Πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας κοκκώδη υλικά για την απομάκρυνση αργίλων, μικροοργανισμών και προϊόντων ιζηματοποίησης (Robert C., 2002, Νταρακάς Ε., 2009).

### 1.2.7 Προσρόφηση

Η προσρόφηση είναι μια διαδικασία κατά την οποία χρησιμοποιούνται στερεά μέσα με σκοπό την προσκόλληση υγρών ή αέριων συστατικών στην επιφάνεια του στερεού. Οι δυνάμεις που είναι υπεύθυνες για αυτό το φαινόμενο είναι οι ηλεκτροστατικές και διευκολύνουν την έλξη μεταξύ του προσροφούμενου και της επιφάνειας του προσροφητικού μέσου. Ο τρόπος με τον οποίο ασκούνται αυτές οι δυνάμεις μπορεί να είναι είτε φυσικός ή χημικός. Ουσιαστικά δεν υφίστανται διαχωρισμός ανάμεσα στις φυσικές και χημικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις που εμφανίζονται κατά την προσρόφηση. Ως προσροφητικά μέσα χρησιμοποιούνται συνήθως η λεπτή άργιλος, η ενεργός αλουμίνα και ο ενεργός άνθρακας. Το πιο δεδομένο μέσο αποτελεί ο ενεργός άνθρακας που εφαρμόζεται για την απομάκρυνση οργανικών ενώσεων και ιχνοστοιχείων (Νταρακάς Ε., 2009).

Συγκεκριμένα ο άνθρακας είναι ένα στοιχείο το οποίο διαθέτει μια εξαιρετικά μεγάλη ικανότητα κατακράτησης οργανικών ουσιών (ενώσεις άνθρακα), με αποτέλεσμα να τις απομακρύνει σχεδόν παντελώς από το νερό. Η διαδικασία αυτή παρατηρείται στη φύση, όπου η γη μέσω του άνθρακα (πετρώματα και χώμα) φιλτράρει τα νερά της βροχής, το οποίο καταλήγει στο υπέδαφος. Παραδείγματα ουσιών που κατακρατούνται από τον άνθρακα είναι οι διοξίνες, οι υδρογονάνθρακες, τα υπολείμματα πετρελαιοειδών, πλαστικών, εντομοκτόνων κλπ, οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC's), η βενζίνη και άλλα στοιχεία.

Ο άνθρακας παράγεται από την καύση οργανικών ουσιών, που περιέχουν άνθρακα, όπως κόκαλα, ξύλο, ή άλλα φυτικά στοιχεία. Ο ενεργός άνθρακας προέρχεται από την καύση που πραγματοποιείται σε περιβάλλον με θερμοκρασία μεταξύ 600 και 900 βαθμών Κελσίου απουσία οξυγόνου ή από την καύση στην οποία συμμετέχει διοξείδιο του άνθρακα, οξυγόνο, ή ατμός, σε περίπου 1.000 βαθμούς Κελσίου, ή με συνδυασμό των δύο αυτών

διαδικασιών. Οι διαδικασίες αυτές αφαιρούν μη ανθρακικά κατάλοιπα και παράγουν τη πορώδη εσωτερική μικροδομή του. Ο ενεργός άνθρακας χωρίζεται σε δυο κατηγορίες, την κοκκώδη (GAC) και την συμπαγή (στερεός άνθρακας ή carbon block). Η κάθε μορφή έχει τα πλεονεκτήματά της. Η κοκκώδης μορφή έχει την ικανότητα να συγκρατεί τη μεγαλύτερη ποσότητα ουσιών, ενώ η συμπαγής μορφή εμφανίζει μεγαλύτερη επιλεκτική προσροφητικότητα δηλαδή φιλτράρει το νερό και συγκρατεί διαφορετικά στοιχεία που περιέχονται στο νερό, όπως ιζήματα και μερικά βαρέα μέταλλα. Ο συνδυασμός και των δύο φίλτρων με το φίλτρο ενεργού άνθρακα κοκκώδης μορφής να προηγείται εγγυάται τα καλύτερα και ασφαλέστερα αποτελέσματα στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού.

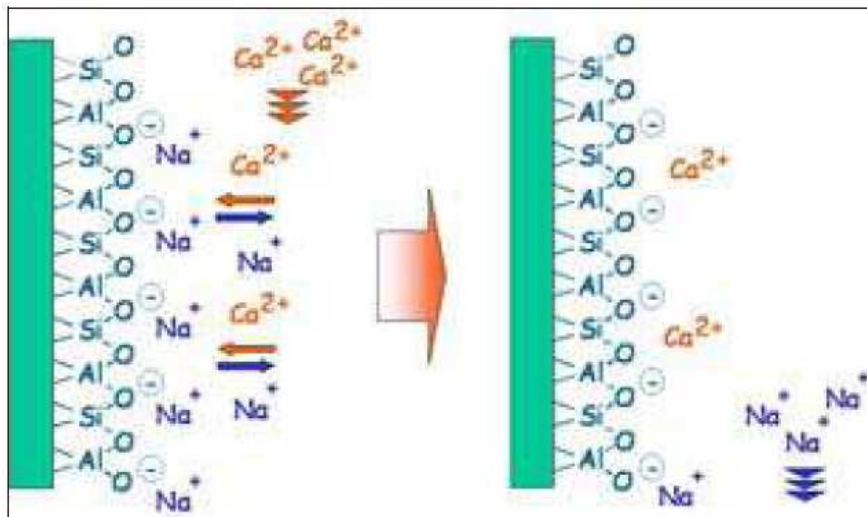
Τα φίλτρα ενεργού άνθρακα συνήθως χρησιμοποιούνται για τη συγκράτηση της χλωρίνης, καθώς προσδίδουν διαύγεια και ευχάριστη γεύση στο νερό, και παράλληλα ελαττώνουν χαρακτηριστικά όπως μη ευχάριστη οσμή και γεύση καθώς και ανεπιθύμητους χρωματισμούς. Υπάρχει όμως ένα μειονέκτημα από τη χρήση των φίλτρων ενεργού άνθρακα που χρησιμεύουν για να συγκρατούν τη χλωρίνη. Τα φίλτρα αυτά συχνά αποτελούν πηγή ανάπτυξης βακτηρίων στο εσωτερικό τους, και πιο συγκεκριμένα όταν πρόκειται για νερό στάσιμο για μεγάλο χρονικό διάστημα. Για την αποφυγή τέτοιων καταστάσεων συνιστάται η λήψη προστατευτικών αντιμικροβιακών μέτρων, όπως η χρήση UV, UF ή ανάστροφης ώσμωσης) ή με περαιτέρω συνδυασμό αντιβακτηριδιακών μέσων όπως το KDF.

Το KDF αποτελεί ένα συνδυασμό των ηλεκτροχημικών και οξειδοαναγωγικών αρχών. Συντίθεται από ένα ειδικό μείγμα κραμάτων δύο ανόμοιων μετάλλων μεταξύ χαλκού και ψευδάργυρου (KDF55-D και KDF85-D). Το KDF απομακρύνει τη χλωρίνη από το νερό μέσω αντιδράσεων οξείδωσης. Παρουσιάζει ποσοστό απόρριψης του χλωρίου που φτάνει το 99%, αφού έχουν διέλθει 76 μ<sup>3</sup> νερού, σε σύγκριση με την προσρόφηση σε φίλτρα άνθρακα που οδηγούν σε ποσοστό 90%, αφού έχουν διέλθει 15 μ<sup>3</sup>. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό των KDF είναι ότι έχουν αντιβακτηριδιακές ιδιότητες και οδηγούν στη μείωση της ανάπτυξης των βακτηρίων σε ποσοστό ως 90%. Τα φίλτρα αυτά όταν συνδυαστούν με φίλτρα ενεργού άνθρακα συντελούν στη δημιουργία συστημάτων υψηλής απόδοσης επεξεργασίας

νερού. Βρίσκουν εφαρμογή στην απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων και άλλων διαλυμένων μετάλλων μέσω ηλεκτροχημικών μεθόδων.

### 1.2.8 Ιοντοεναλλαγή

Επιτυγχάνεται με τη χρήση στερεών συνθετικών ρητινών με κύριο στόχο την αποσκλήρυνση (απιονισμό) του νερού. Η ανταλλαγή ιόντων είναι μια διαδικασία όπου τα ιόντα ενός συγκεκριμένου είδους ανταλλάσσονται με τα ιόντα ενός άλλου είδους. Όταν το νερό που περιέχει άλατα του ασβεστίου και του μαγνησίου περνά μέσω ενός εναλλάκτη νατρίου, τα ιόντα νατρίου της κλίνης αντικαθιστούν τα ιόντα του ασβεστίου και του μαγνησίου με στόχο την παραγωγή ενός εκλυόμενου υγρού με σκληρότητα κοντά στο μηδέν (εικόνα 1.2.8.1). Εκτός τους ιοντοεναλλάκτες νατρίου που χρησιμοποιούνται για την αποσκλήρυνση του νερού, υπάρχουν ιοντοεναλλάκτες και άλλων κατιόντων και ανιόντων που χρησιμοποιούνται σε σειρά και σε συνδυασμούς (ανταλλαγή ιόντων μικτών κλινών), ώστε να μειώσουν τη συγκέντρωση όλων των διαλυμένων στερεών, και με αυτό τον τρόπο να αυξηθεί η καθαρότητα του νερού. Οι όροι της αφαλάτωσης και απιονισμού του νερού αναφέρονται στην άρση όλων των κατιόντων και των ανιόντων από το νερό. Για την αφαλάτωση, ένας κατιονικός εναλλάκτης αντικαθιστά ιόντα υδρογόνου για κατιόντα (όπως τα  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  και  $\text{Na}^+$ ), και ένας ανιονικός εναλλάκτης αντικαθιστά τα ανιόντα (όπως το  $\text{Cl}^-$  και  $\text{SO}_4^{2-}$ ) με υδροξείδιο, μειώνοντας με αυτό το τρόπο νερό τη συνολική συγκέντρωση των διαλυμένων αλάτων. Όπου απαιτείται υψηλής καθαρότητας νερό χρησιμοποιούνται ρητίνες κατιόντων ανιόντων μικτών κλινών (Venkateswarlu K. S., 1996).



**Εικόνα 1.2.8.1:** Απομάκρυνση ιόντων ασβεστίου μέσω ιοντοεναλλαγής (ΝταρακάςΕ., 2009).

Όταν μια ρητίνη ανταλλαγής ιόντων έχει εξαντληθεί, η ρητίνη αναγεννιέται. Για τον κατιονικό ιοντοεναλλάκτη, ένα διάλυμα άλατος χρησιμοποιείται για αναγέννηση. Ο ρυθμός και η αποδοτικότητα της αναγέννησης είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης του αναγεννημένου διαλύματος άλατος και του χρόνου επαφής με τη ρητίνη. Για παράδειγμα, η θεωρητική απαίτηση άλατος για την ανταλλαγή ιόντων νατρίου είναι περίπου 0,08 kg για κάθε 1000 gr άλατος που αφαιρούνται από τη σκληρότητα, καθώς και η τυπική απόδοση είναι 40 με 60 τοις εκατό. Για τις βιομηχανικές εφαρμογές ο μέσος όρος της ποσότητας του άλατος που χρησιμοποιείται για αναγέννηση στους κατιονικούς εναλλάκτες με ρητίνες υψηλής χωρητικότητας είναι συνήθως 0,18 kg/1000 gr (Robert C., 2002).

Για τους άλλους κατιονικούς εναλλάκτες, χρησιμοποιείται είτε θειικό ή υδροχλωρικό οξύ. Το θειικό οξύ χρησιμοποιείται γενικά λόγω του χαμηλού κόστους του, αλλά το υδροχλωρικό οξύ πρέπει να χρησιμοποιείται όταν η ρητίνη θα έχει υπερφορτωθεί από ασβέστιο με αποτέλεσμα την καθίζηση του θειικού ασβεστίου και το παραγέμισμα της ρητίνης. Οι ανιονικοί εναλλάκτες ρητίνης συνήθως αναγεννώνται με υδροξείδιο του νατρίου. Η αναγέννηση των μικτών κλινών συνιστά το διαχωρισμό των ανιόντων από τα κατιόντα της ρητίνης και εν συνεχεία την αναγέννησης ξεχωριστά.

Οι κατιονικές και ανιονικές εναλλάκτες ρητίνης μπορεί να είναι ασθενείς ή ισχυροί. Οι ρητίνες των ασθενών οξέων είναι σε θέση να αφαιρούν μέταλλα

που συνδέονται με την αλκαλικότητα των ανθρακικών και διττανθρακικών. Οι ρητίνες των ισχυρών οξέων δεν είναι επιλεκτικές, και μπορούν να ανταλλάξουν ένα ευρύ φάσμα κατιόντων. Οι ρητίνες των ασθενών βάσεων αφαιρούν τα ισχυρά ιονισμένα οξέα, αλλά όχι τα ασθενώς ιονισμένα. Το εκλυόμενο υγρό περιέχει την ίδια ποσότητα διοξειδίου του πυριτίου, όπως το εισερχόμενο νερό καθώς και διοξείδιο του άνθρακα που ισοδυναμεί με την αλκαλικότητα του διττανθρακικού και ελεύθερου διοξειδίου του άνθρακα. Οι ρητίνες των ισχυρών βάσεων αφαιρούν τόσο τα ισχυρά όσο και τα ασθενώς ιονισμένα οξέα.

Η επιλογή του κατάλληλου ιοντοεναλλάκτη βασίζεται στους ακόλουθους παράγοντες. Πρώτον στα χαρακτηριστικά του ακατέργαστου νερού. Δεύτερον από τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται να έχει το επεξεργασμένο νερό. Τρίτον στο λειτουργικό κόστος: τα χημικά προϊόντα, την ενέργεια, τη διάθεση αποβλήτων, το εξειδικευμένο λειτουργικό κόστος εργασίας, και τη συντήρηση. Επίσης εξαρτάται από κεφαλαιουχικές δαπάνες και τέλος από το διαθέσιμο χώρο.

Είναι σημαντικό το εισερχόμενο νερό στους ιοντοανταλλακτές να είναι απαλλαγμένο από αιωρούμενα στερεά. Θα πρέπει επίσης να είναι απαλλαγμένο από ιλύος και οργανικές ουσίες, δεδομένου ότι τα υλικά αυτά μπορούν να κατακαθίσουν στις κλίνες των εναλλακτών και να μειώσουν την απόδοση των μονάδων. Αυτό μπορεί να αποτραπεί εάν οι ρητίνες επικαλυφθούν με ταινίες που είτε προλαμβάνουν ή επιβραδύνουν την κυκλοφορία των ανιόντων και των κατιόντων μέσω των ρητινών. Το εισερχόμενο νερό ενδέχεται να απαιτεί την προκαταρκτική επεξεργασία του μέσω της καθίζησης ή / και διήθησης.

### **1.2.9 Απολύμανση**

Η απολύμανση βασίζεται στη χρήση διαφόρων απολυμαντικών μέσων (χλώριο, όζον, UV κ.α.) και χρησιμοποιείται για την εξουδετέρωση ή αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών, βακτηρίων και ιών. Συνήθως η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται στα τελευταία στάδια της επεξεργασίας του νερού.



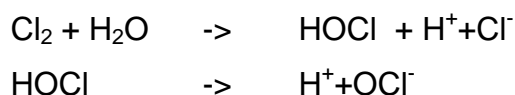
Η αποδοτικότητα κάθε μεθόδου εξαρτάται από το είδος του απολυμαντικού, το χρονικό διάστημα που εφαρμόζεται κάθε μέθοδος, αλλά και από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του, που σχετίζονται με την ποιότητα του (π.χ. pH, θερμοκρασία, κ.α.).

Τα απολυμαντικά πρέπει να κατέχουν ορισμένες ιδιότητες, όπως να έχουν ευρύ φάσμα δράσης και να είναι αποτελεσματικό έναντι πολλών μικροοργανισμών, αποτρέποντας την ανάπτυξη τους. Ωστόσο να μην είναι επιβλαβές για το σύστημα. Τέλος να είναι ασφαλές για το προσωπικό και το περιβάλλον.

Τα απολυμαντικά μέσα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα μη χημικά και χημικά απολυμαντικά. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει όλες τις μεθόδους που δεν περιλαμβάνουν τη χρήση χημικών, όπως είναι η υπεριώδης ακτινοβολία (UV), η ραδιενεργός ακτινοβολία, η αποστειρωτική διήθηση και η θερμότητα. Ενώ η δεύτερη κατηγορία εμπεριέχει όλα τις χημικές ουσίες με απολυμαντική δράση, τα οποία ταξινομούνται σε δυο υποκατηγορίες, τα οξειδωτικά (π.χ. χλώριο, υπεροξείδιο του υδρογόνου, όζον) και τα μη οξειδωτικά (μεθυλενοδιθειοκυάνιο, χλωριωμένες φαινόλες) (Νταρακάς Ε., 2009).

- Χλώριο

Η χλωρίωση αφορά την προσθήκη μικρών ποσοτήτων (ppm) χλωρίου ελεύθερου ή μη. Το χλώριο αντιδρά με διάφορες ενώσεις και τις οξειδώνει. Το ανιόν του χλωρίου  $\text{Cl}^-$  αντιδρά με ιόντα, όπως  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{CN}^-$  κ.ά. που βρίσκονται στο νερό, μετατρέποντας του στα αντίστοιχα οξειδιά τους ενώ διασπά τις οργανικές ουσίες και παράλληλα καταστρέφει τους παθογόνους μικροοργανισμούς. Το χλώριο στο νερό αντιδρά σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις:



Το pH παίζει καθοριστικό ρόλο, αφού καθορίζει την παρουσία των ιόντων στο νερό. Όσο η τιμή του pH αποκτά χαμηλές τιμές επικρατεί το HOCl, ενώ σε μεγαλύτερες τιμές επικρατεί το OCl<sup>-</sup>. Οι χαμηλότερες τιμές του pH συνήθως προτιμώνται, αφού απαιτείται μικρότερη ποσότητα χλωρίου και πιο

έντονη βακτηριοκτόνο δράση σε συνδυασμό με χαμηλότερη θερμοκρασία (Νταρακάς Ε., 2009).

- Φίλτρα UV

Η χρήση των φίλτρων UV βασίζεται στη χρήση μιας λάμπας υπεριώδους φωτός, η οποία την ιδιότητα να εξουδετερώνει τους μικροοργανισμούς που υπάρχουν στο νερό, παράγοντας ακτινοβολία με μήκος κύματος 254nm. Η ακτινοβολία δρα καταστροφικά έναντι του DNA των ιών και των βακτηριδίων εμποδίζοντας την αναπαραγωγή τους. Η δράση τους ενισχύεται όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με φίλτρα ενεργού άνθρακα, επιτυγχάνοντας την ταυτόχρονη συγκράτηση των ξένων σωματιδίων και ανεπιθύμητων στοιχείων.

- Όζον

Τα συστήματα που χρησιμοποιούν όζον παραλαμβάνουν το οξυγόνο της ατμόσφαιρας και το αποθηκεύουν στο νερό υπό τη μορφή  $O_3$  (όζοντος). Το εμπλουτισμένο αυτό νερό είναι γνωστό ότι κατέχει οξειδωτικές ιδιότητες, είναι ιαματικό δίχως παθογόνους μικροοργανισμούς. Το μειονέκτημα του είναι ότι δεν είναι απαλλαγμένο από το χλώριο ή άλλα μη επιθυμητά συστατικά, γι' αυτό είναι απαραίτητος ο συνδυασμός με άλλα φίλτρα (Νταρακάς Ε., 2009). Μερικά από τα πλεονεκτήματα του όζοντος περιλαμβάνουν την παραγωγή λιγότερων επικίνδυνων υποπροϊόντων (σε σύγκριση με τη χλωρίωση), καθώς και την έλλειψη γεύσης και οσμής στο νερό που παράγεται από την οζονοποίηση. Αν και σχηματίζονται λιγότερα υποπροϊόντα, έχει ανακαλυφθεί ότι η χρήση του όζοντος παράγει μια μικρή ποσότητα του υπόπτου άλατος του βρωμικού οξέος, που έχει κατηγορηθεί ως καρκινογόνο.

### **1.2.10 Απόσταξη**

Η μέθοδος αυτή επεξεργάζεται το νερό διαμέσου διαδικασιών εξάτμισης και υγροποίησης, και το επεξεργασμένο νερό καταλήγει να μην έχει γεύση, αλλά και άλλα πολύτιμα στοιχεία. Για το λόγο αυτό η μέθοδος αυτή απορρίπτεται από πολλούς και συνιστάται μόνο σε περιπτώσεις, όπου το νερό είναι ακατάλληλο προς πόσιν. Είναι η παλαιότερη μέθοδος επεξεργασίας

του νερού. Τα μειονεκτήματα της είναι η παρουσία προσμίξεων στο νερό, η χρήση μεγάλων ποσοτήτων νερού και απαιτεί τεράστια ποσά ενέργειας.

### **1.3 Αντίστροφη όσμωση**

Η αντίστροφη όσμωση είναι μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδος επεξεργασίας του νερού που βασίζεται στη χρήση ημιπερατών μεμβρανών και πίεσης. Η μέθοδος αυτή είναι αποτελεσματική στην απαλλαγή του νερού από τα διαλυτά άλατα και οργανικούς ρύπους.

Οι μεμβράνες αυτές είναι συνήθως οξικής κυτταρίνης και διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος των ρύπων και το pH. Σε αρκετές περιπτώσεις είναι απαραίτητη η προεπεξεργασία των ρύπων με σκοπό την απομάκρυνση των κολλοειδών σωματιδίων, ώστε να μειωθεί το φράξιμο των πόρων της μεμβράνης και περαιτέρω να αποφευχθεί η θολερότητα και η ύπαρξη ορισμένων μετάλλων (π.χ. σίδηρος).

Η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης βρίσκει εφαρμογή για την απομάκρυνση πληθώρας ουσιών. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν οργανικές ουσίες μεγάλου μοριακού βάρους οργανικά συστατικά και όχι τα ελεύθερα πτητικά οξέα. Υπερτερεί έναντι άλλων μεθόδων επεξεργασίας νερού καθότι επιτυγχάνει απόρριψη μεγάλων τιμών ρυπαντικού φορτίου. Επιπλέον οι εγκαταστάσεις δεν απαιτούν πολύ χώρο, κρατώντας το κόστος χαμηλό. Η μέθοδος αυτή θα αναλυθεί λεπτομερώς στις επόμενες ενότητες.

#### **1.3.1 Ιστορική αναδρομή**

Οι έννοιες της όσμωσης και της αντίστροφης όσμωσης είναι γνωστές εδώ και πάρα πολλά χρόνια. Το 1748 ο Γάλλος επιστήμονας Nollet πραγματοποίησε τις πρώτες μελέτες σχετικά με την όσμωση και ακολούθησαν πολλοί άλλοι ερευνητές κατά τη διάρκεια των επόμενων δύο αιώνων. Το 1877, οι βοτανολόγοι Wilhelm Pfeffer και Hugo de Vries ήταν αυτοί που ουσιαστικά αναφέρθηκαν στην ωσμωτική πίεση χρησιμοποιώντας παράλληλα την έννοια της υδροστατικής πίεσης. Τα πειράματα του Pfeffer

έθεσαν τις βάσεις για την ερμηνεία του φαινομένου της οσμωτικής πίεσης διαμέσου του νόμου του van't Hoff (Williams M., 2003ii).

Ωστόσο, η χρήση της αντίστροφης όσμωσης (RO) ως μια διαδικασία διαχωρισμού είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία. Στην πραγματικότητα, στα τέλη της δεκαετίας του 1950 ο Reid χρησιμοποιώντας οξική κυτταρίνη ως μεμβράνη αντίστροφης όσμωσης απέδειξε ότι η μεμβράνη αυτή είναι ικανή να διαχωρίζει το αλάτι από το νερό, ακόμα κι αν η ροή του νερού που υπάρχει είναι πολύ μικρή ώστε να είναι πρακτικό. Στη συνέχεια, στις αρχές της δεκαετίας του 1960, οι Loeb και Sourirajan ανέπτυξαν μια μέθοδο για την παραγωγή ασύμμετρων μεμβρανών οξικής κυτταρίνης με σχετικά υψηλή ικανότητα διαχωρισμού και υψηλή ροή νερού, καθιστώντας έτσι τους διαχωρισμούς με RO εφικτούς και χρήσιμους (S. Loeband, S. Sourirajan, 1963).

### **1.3.2 Το φαινόμενο της αντίστροφης όσμωσης**

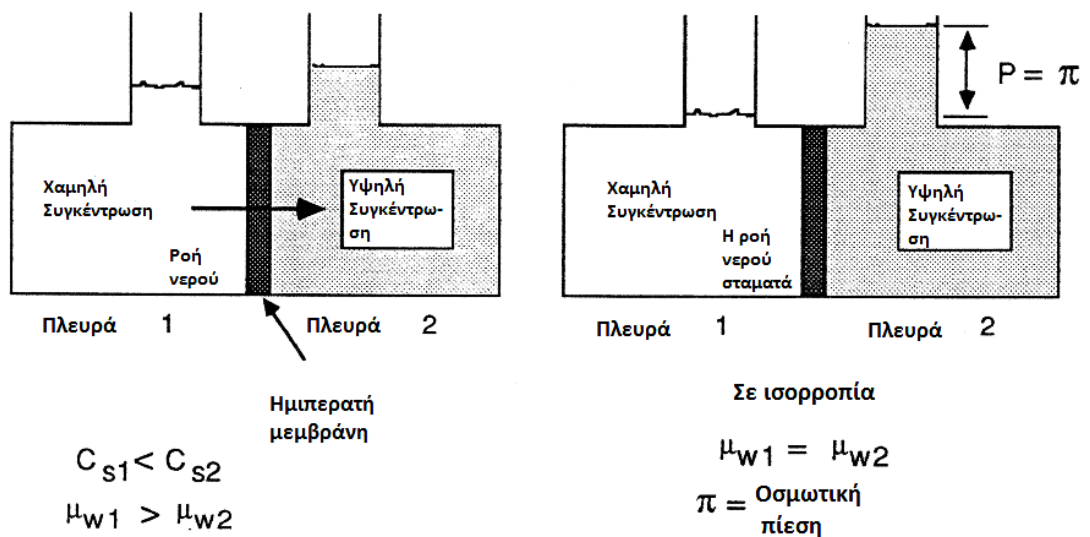
Η αντιστρεπτή όσμωση είναι μια διαδικασία ιδιαίτερης σημασίας όσον αφορά τις μεθόδους αφαλάτωσης. Η τεχνική αυτή βρίσκει εφαρμογές από τις πιο μικρές έως τις μεγάλες εγκαταστάσεις ύδρευσης. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου έναντι άλλων μεθόδων επεξεργασίας νερού, όπως της απόσταξης είναι ότι το κόστος λειτουργίας της είναι μικρότερο για την παραγωγή μικρών ποσοτήτων γλυκού νερού.

Η αντίστροφη όσμωση είναι μια διαδικασία, η οποία έχει σαν κύριο χαρακτηριστικό τη χρήση των ημιπερατών μεμβρανών. Οι ημιπερατές μεμβράνες είναι διαπερατές από το νερό, αλλά ουσιαστικά αδιαπέραστες από το αλάτι, δηλαδή λειτουργούν ως μέσον διαχωρισμού που επενεργεί στην όλη διαδικασία σαν φίλτρο καθαρισμού του νερού.

Το φαινόμενο της αντιστρεπτής όσμωσης μπορεί να περιγραφεί με ένα δοχείο που χωρίζεται σε δύο διαμερίσματα με μια μεμβράνη (Αλεξάκης Α., 2003). Η μεμβράνη αποτελείται από πορώδες υλικό, με πολύ μικρούς πόρους. Στο ένα διαμέρισμα (διαμέρισμα Α), υπάρχει διάλυμα καθαρού, αποσταγμένου νερού. Στο άλλο διαμέρισμα (διαμέρισμα Β), υπάρχει διάλυμα (ίδιας ποσότητας σε σχέση με αυτήν του Α), αλλά στην οποία περιέχονται άλατα (γραμμάρια χλωριούχου νατρίου, NaCl). Οι στάθμες τους βρίσκονται

στο ίδιο επίπεδο. Όσο περνάει η ώρα παρατηρείται ότι ανεβαίνει η στάθμη του διαλύματος B, αυτού που περιέχει το διάλυμα άλατος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα μόρια του νερού του A διαμερίσματος, διαπερνούν τη λεπτή διαχωριστική μεμβράνη και εισέρχονται στο διάλυμα B. Συνεπώς ο όγκος διαλύματος στο διαμέρισμα B αυξάνεται (Καραϊσκάκης Γ., 1998).

Η μετακίνηση αυτή που εκτελείται ανάμεσα στα δυο διαλύματα αποτελεί ουσιαστικά ένα φυσικό φαινόμενο. Σκοπός αυτής της διέλευσης των μορίων είναι η εξίσωση των συγκεντρώσεων στα δυο επικοινωνούντα δοχεία. Το φαινόμενο τερματίζεται όταν ο όγκος του διαλύματος στο πυκνότερο διάλυμα έχει αυξηθεί από την είσοδο του διαλύτη, οπότε και μεταβάλλεται η υδροστατική πίεση. Όταν όμως χρησιμοποιηθεί ένας πλωτήρας στην επιφάνεια του υγρού B με τέτοιο τρόπο που να εφαρμόζει στα τοιχώματα του δοχείου και ασκηθεί πίεση, τότε το διάλυμα B παύει να έχει ανοδική πορεία και εμφανίζεται αντίσταση στην πορεία του νερού από το A προς το B. Η ροή νερού παύει να υπάρχει, ενώ υπάρχει ισορροπία πιέσεων ανάμεσα στα δύο διαλύματα. Η πίεση που προκλήθηκε για να σταματήσει αυτή η άνοδος της στάθμης του διαλύματος B, είναι η οσμωτική πίεση (εικόνα 1.3.2.1).

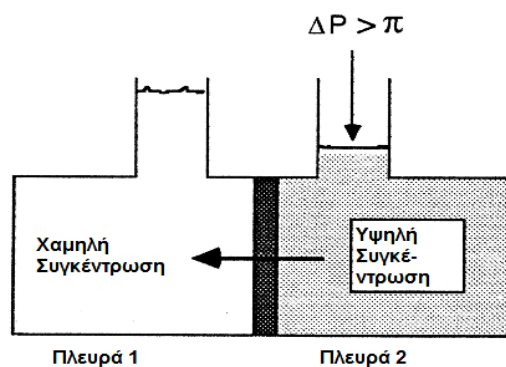


**Εικόνα 1.3.2.1:** Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της ώσμωσης (WilliamsM., 2003ii).

Όσο η ασκούμενη πίεση προς το διάλυμα B αυξάνεται, το νερό σταματά να διαπερνά τη μεμβράνη και παρατηρείται αναστροφή του φαινομένου. Συγκεκριμένα παρατηρείται ροή νερού που υπάρχει στο διάλυμα B προς το

διαμέρισμα A, με αποτέλεσμα η στάθμη του A να ανυψώνεται και, φυσικά, του B να κατεβαίνει. Ουσιαστικά πραγματοποιείται διέλευση μόνο του καθαρού νερού από τους πόρους της μεμβράνης, ενώ το άλας (NaCl) δεν διέρχεται και παραμένει στο χώρο του διαμερίσματος B.

Συνέπεια αυτού του φαινομένου είναι η αύξηση της πίεσης στο διαμέρισμα B, ενώ ο όγκος του νερού στην πλευρά A να αυξάνεται με νέο καθαρό νερό από την πλευρά B. Παρατηρείται επίσης άνοδος της στάθμης του νερού του A, που είναι υψηλότερη σε σχέση με του B, ενώ στο B υπάρχει ακόμα μια μικρή ποσότητα συμπυκνωμένου διαλύματος NaCl. Στην πλευρά A θα υπάρχει περισσότερη ποσότητα καθαρού νερού σε σχέση με την αρχική ποσότητα (εικόνα 1.3.2.2).



$$C_{s1} < C_{s2}$$

$$\mu_{w1} < \mu_{w2}$$

**Εικόνα 1.3.2.2 :** Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της αντίστροφης ώσμωσης (Williams M., 2003ii).

### 1.3.3 Ερμηνεία της αντίστροφης ώσμωσης

Η κίνηση του μορίου του διαλύτη σε ένα διάλυμα μετριάζεται από τα μόρια του διαλύματος που το περιβάλλουν. Η κίνηση του διαλύτη καθορίζεται ολοκληρωτικά από τις θερμικές του συγκρούσεις με τα μόρια του διαλύματος που το περιβάλλουν. Ωστόσο, η μέση θερμική ταχύτητα του μορίου του διαλύτη είναι ίδια με αυτή που θα είχε αν ήταν ελεύθερο σε αέρια φάση, χωρίς να υπάρχουν κοντά του άλλα διαλυτά μόρια.

Κάθε φορά η κίνηση του διαλύτη παρεμποδίζεται από τη μεμβράνη, θα μεταφέρει ορμή, και, κατά συνέπεια, θα δημιουργεί μια πίεση προς αυτήν. Δεδομένου ότι η ταχύτητα είναι η ίδια με εκείνη ενός ελεύθερου μορίου, η πίεση θα είναι η ίδια με την πίεση ενός ιδανικού αερίου της ίδιας μοριακής συγκέντρωσης. Ως εκ τούτου, η οσμωτική πίεση  $\pi$ , δίνεται από τον τύπο van't Hoff, η οποία είναι ταυτόσημη με τον τύπο πίεσης ενός ιδανικού αερίου:

$$\pi = cRT$$

Όπου,

C: η μοριακή συγκέντρωση του.

R: η σταθερά των αερίων.

T: η θερμοκρασία.

Η οσμωτική πίεση δεν εξαρτάται από το είδος της διαλυτής ουσίας, ή το μοριακό μέγεθος, αλλά μόνο από τη μοριακή συγκέντρωση του, όπως αναφέρει ο τύπος.

$$C = n/V$$

$$\pi = cRT = (n/V)RT$$

$$\pi V = nRT$$

Όπου V: ο όγκος του διαλύματος και n: ο αριθμός των μορίων του διαλύτη.

Σύμφωνα με τους νόμους διατήρησης της ενέργειας και της ορμής κάθε φορά που τα σωματίδια συγκρούονται με έναν κινούμενο τοίχο, θα αλλάξουν κατεύθυνση και θα αυξήσουν ή θα μειώσουν την ταχύτητά τους. Έτσι, μεταφέρουν τόσο ορμή όσο και ενέργεια στον τοίχο. Ως εκ τούτου, η διαδικασία των ελαστικών συγκρούσεων με κινούμενο τοίχο είναι ο μηχανισμός με τον οποίο η μικροσκοπική κινητική ενέργεια των σωματιδίων μετατρέπεται σε μακροσκοπικό μηχανικό έργο. Ο νόμος διατήρησης της ορμής απαιτεί τα μόρια της διαλυτής ουσίας, που δημιουργούν οσμωτική πίεση στην ημιπερατή μεμβράνη, να μπορούν να παράγουν, μέσω του όγκου του διαλύματος, την ίδια οσμωτική πίεση σε όλα τα όρια του διαλύματος, περιλαμβάνοντας την ελεύθερη επιφάνειά του. Από την άποψη αυτή η οσμωτική πίεση ενεργεί σύμφωνα με το νόμο Pascal. Η αρχή του Pascal δηλώνει ότι «η αλλαγή της πίεσης ενός κλειστού ασυμπιέστου ρευστού μεταφέρεται αμείωτη σε κάθε μέρος του ρευστού και προς όλες τις διευθύνσεις και σε όλο το βάθος του».

Το αλάτι και το νερό διαπερνούν τις μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης σύμφωνα με ένα μηχανισμό που στηρίζεται στη διάχυση. Η ροή του νερού ( $J_l$ ) συνδέεται με την πίεση και τη συγκέντρωση των συστατικών που υπάρχουν στις δυο πλευρές της μεμβράνης σύμφωνα με την εξίσωση

$$J_l = A(\Delta p - \Delta \pi)$$

Όταν η ασκούμενη πίεση είναι μικρή και η διαφορά πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης ( $\Delta p$ ) είναι μικρότερη από την διαφορά της οσμωτικής πίεσης ( $\Delta \pi$ ), τότε το νερό μετακινείται από την πλευρά του αραιού προς την πλευρά της μεμβράνης του πυκνού διαλύματος άλατος λόγω του φαινομένου της όσμωσης. Χωρίς την άσκηση πίεσης η ροή θα πραγματοποιούνταν των υδάτων με αντίθετη φορά προς το πυκνότερο διάλυμα.

Η ροή του άλατος μπορεί να περιγραφεί ως συνάρτηση της συγκέντρωσης του άλατος στη διατροφή ( $C_{j0}$ ) και διήθημα ( $C_{jl}$ ) πλευρές της μεμβράνης

$$J_j = B(C_{j0} - C_{jl})$$

Όπως προκύπτει από τις δύο αυτές εξισώσεις η ροή του νερού είναι ανάλογη προς την ασκούμενη πίεση, αλλά η ροή του άλατος είναι ανεξάρτητη. Αυτό σημαίνει ότι η μεμβράνη γίνεται πιο επιλεκτική, καθώς αυξάνεται η πίεση.

Οι πιο σημαντικές παράμετροι λειτουργίας στη ροή του νερού και την κατακράτηση άλατος από την μεμβράνη είναι: η ασκούμενη πίεση, η συγκέντρωση του άλατος στο διάλυμα και η θερμοκρασία. Όσο αυξάνεται η πίεση, τόσο αυξάνεται η ροή νερού και η απόρριψη του άλατος, αλλά η ροή του νερού αυξάνεται κατά γραμμικό τρόπο, ενώ του άλατος αυξάνεται πιο δραματικά. Η αύξηση της συγκέντρωσης άλατος στο διάλυμα αυξάνει αποτελεσματικά την οσμωτική πίεση, ως εκ τούτου, σε σταθερή πίεση τροφοδοσίας, η ροή του νερού μειώνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης άλατος. Η επίδραση της θερμοκρασίας είναι πιο περίπλοκη. Η μεταφορά τόσο του άλατος και του νερού διαμέσου της μεμβράνης είναι μια ενεργοποιημένη διαδικασία, και τόσο το άλας όσο και το νερό αυξάνονται εκθετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η επίδραση της στη ροή του νερού είναι αρκετά δραματική, ωστόσο η επίδραση της στη ροή του άλατος είναι ακόμη πιο



αισθητή. Αυτό σημαίνει ότι η απόρριψη του συντελεστή άλατος (B/A), μειώνεται ελαφρά καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία.

#### **1.4 Μεμβράνες και υλικά**

Από τον XVIII αιώνα και με την ανάπτυξη των κεραμικών μεμβρανών έχουν επιτευχθεί σημαντικά βήματα στον τομέα της αντίστροφης όσμωσης, ιδίως ως διαδικασία για την αφαλάτωση του νερού. Από τις πρώτες μεμβράνες οξικού (Reid C.E. and Breton E.J., 1959) μέχρι την καινοτόμο ανακάλυψη του Loeb-Sourirajan που χρησιμοποίησε ανισοτροπικές μεμβράνες οξικής κυτταρίνης και ουσιαστικά κατέστησε την αντίστροφη όσμωση πρακτική διαδικασία (Loeb S. and Sourirajan S., 1965). Οι μεμβράνες αυτές αποτέλεσαν το πρότυπο στην βιομηχανία στα μέσα της δεκαετίας του 1960 μέχρι την δεκαετία του 1970, αλλά στη συνέχεια αντικαταστάθηκαν από σύνθετες μεμβράνες υπερδιήθησης οι οποίες αναπτύχθηκαν μέσω του συνδυασμού της επιφανειακής τάσης και του πολυμερισμού που αναπτύσσεται μεταξύ των διαλυμάτων. Στην αρχή της δεκαετίας του 1980 ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται οι μεμβράνες νανοδιήθησης χαμηλής πίεσης για το διαχωρισμό μικρών συγκεντρώσεων διαλυμένων αλάτων και άλλων ουσιών από ήδη καλής ποιότητας νερό για την παραγωγή υπερκάθαρου νερού για τη βιομηχανία ηλεκτρονικών ειδών. Τα τελευταία χρόνια, οι σύνθετες μεμβράνες υπερδιήθησης, διατίθενται σε σπειροειδή μορφή και έχουν εκτοπίσει τις ανισοτροπικές μεμβράνες της οξικής κυτταρίνης στις περισσότερες εφαρμογές.

Όλες οι προηγούμενες μελέτες πάνω στην αντίστροφη ώσμωση είχαν σαν στόχο την ανακάλυψη μεθόδων για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού. Η αφαλάτωση απαιτεί τη δημιουργία μεμβρανών με ικανότητα απόρριψης άλατος άνω του 99,3% ώστε να παραχθεί ένα τελικό αποδεκτό διήθημα που περιέχει λιγότερο από 500 ppm άλας. Οι παλαιότερες μεμβράνες χρειάζονται πολύ υψηλές πιέσεις ώστε να λειτουργήσουν μέχρι και 1500 psi. Με τον καιρό οι επιδόσεις των μεμβρανών βελτιώθηκαν και η πίεση αυτή έχει μειωθεί σε 800-1000psi. Όταν οι μεμβράνες εφαρμόζονται σε υφάλμυρο νερό είναι απαραίτητο να λειτουργούν μόνο σε ένα εύρος 150-400 psi ώστε η

ικανότητα απόρριψης άλατος να είναι της τάξεως του 99%. Στη βιομηχανία ηλεκτρονικών ειδών, το παρεχόμενο νερό που προέρχεται συχνά από το πόσιμο νερό του δήμου καθαρίζεται με διαδικασίες αντίστροφης όσμωσης από εργοστάσια, το οποίο μπορεί να περιέχει διαλυμένα άλατα μόνο 100 με 200 ppm. Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται λειτουργούν σε χαμηλές πιέσεις, συνήθως 100-200 psi (Cheremisinoff N., 2002).

Από εμπορικής άποψης οι πιο σημαντικές μεμβράνες είναι κυρίως οι κυτταρικές μεμβράνες και οι σύνθετες μεμβράνες υπερδιήθησης αν και υπάρχουν και άλλα υλικά μεμβρανών που στην τρέχουσα φάση δεν αξίζει να αναφερθούν.

Οι κυτταρικές μεμβράνες έχουν πλέον παραγκωνιστεί από τις σύνθετες μεμβράνες υπερδιήθησης. Ωστόσο, οι μεμβράνες οξικής κυτταρίνης εξακολουθούν να έχουν ένα μικρό μερίδιο στην αγορά, διότι είναι εύκολο να κατασκευαστούν, παρουσιάζουν μηχανική αντοχή και ανθεκτικότητα στην καταστροφή από το χλώριο και από άλλα οξειδωτικά, σε σχέση με τις σύνθετες μεμβράνες υπερδιήθησης. Καθώς η κυτταρίνη μπορεί να ανεχθεί μέχρι 1 ppm χλωρίου, η χλωρίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποστείρωση του παρεχόμενου νερού. Η διαπερατότητα των μεμβρανών οξικής κυτταρίνης σε νερό και άλατα είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στο βαθμό ακετυλίωσης του πολυμερούς υλικού από το οποίο κατασκευάστηκε η μεμβράνη. Οι μεμβράνες τριοξικής κυτταρίνης τύπου κοίλων λεπτών ινών παράγονται ακόμα για ορισμένα εργοστάσια αφαλάτωσης θαλασσινού νερού αφού επιτυγχάνουν απόρριψη άλατος της τάξης του 99,5%. Ωστόσο, οι περισσότερες εμπορικές μεμβράνες οξικής κυτταρίνης χρησιμοποιούν ένα πολυμερές που περιέχει περίπου 40 οξικού% κ.β. με βαθμό ακετυλίωσης 2.7. Οι μεμβράνες αυτές επιτυγχάνουν εν γένει 98-99% απόρριψη χλωριούχου νατρίου, εξασφαλίζοντας και κανονικές ροές. Μετά το 1970 αναπτύχθηκαν καλύτερες μεμβράνες από την ανάμειξη 39,8% κ.β. οξικού πολυμερές με μικρές ποσότητες τριοξικού πολυμερούς ή άλλων εστέρων κυτταρίνης, όπως βουτυρικής οξικής κυτταρίνης, επιτυγχάνοντας απόρριψη θαλασσινού νερού της τάξης του 99,0 έως 99,5%, αλλά η ροή αυτών των μεμβρανών είναι μέτρια. Ωστόσο, οι περισσότερες εφαρμογές των μεμβρανών της οξικής κυτταρίνης δεν απαιτούν τέτοιες υψηλές απορρίψεις άλατος, έτσι οι τυπικές

εμπορικές κυτταρικές μεμβράνες έχουν καλές ροές και απόρριψη χλωριούχου νατρίου περίπου 96%.

Οι μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης που επιτυγχάνουν υψηλή ροή και υψηλή απόρριψη μπορούν να κατασκευαστούν διαμέσου πολυμερισμού-επιφανειακής τάσης και η μέθοδος αυτή έχει γίνει το νέο πρότυπο της βιομηχανίας. Οι μεμβράνες που είναι κατασκευασμένες με τέτοιο τρόπο ονομάζονται σύνθετες μεμβράνες λεπτού συνθετικού στρώματος γνωστές ως (TFC). Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για την προετοιμασία των μεμβρανών της αντίστροφης όσμωσης όσο και για τις πολυμερικές μεμβράνες νανοδιήθησης. Κατά τη διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται δύο μονομερή διαλυμένα σε αμιγή υγρά (π.χ. νερό και μια οργανική ένωση). Αρχικά μια πορώδη μεμβράνη υπερδιήθησης (UF) εμποτίζεται και έρχονται σε επαφή με το οργανικό διάλυμα του δεύτερου μονομερούς. Η ταχεία αντίδραση πολυμερισμού στην επιφάνεια μεταξύ των δύο διαλυμάτων (που αντιστοιχεί στην επιφάνεια της πορώδους μεμβράνης), δημιουργεί μια λεπτή (μερικά δέκατα του νανομέτρου) μεμβράνη πολυμερούς. Οι μεμβράνες αυτού του τύπου δοκιμάζονται με διαλύματα χλωριούχου νατρίου 3,5% και επιτυγχάνουν απόρριψη άλατος 99,5% και ροή νερού  $30 \text{ gal/ft}^2 \cdot \text{ημέρες}$  σε 800 psi.

Τα αποτελέσματα των μεμβρανών αυτών σε σύγκριση με των μεμβρανών οξικής κυτταρίνης δείχνουν ότι οι πρώτες μεμβράνες επιτυγχάνουν λιγότερο από το μισό πέρασμα άλατος και δύο φορές περισσότερη ροή νερού. Η απόρριψη των οργανικά διαλυμένων ουσιών χαμηλού μοριακού βάρους από τις σύνθετες μεμβράνες υπερδιήθησης είναι επίσης πολύ καλύτερη από της οξικής κυτταρίνης. Το μόνο μειονέκτημα των μεμβρανών αυτών είναι η ταχεία και μόνιμη απώλεια της επιλεκτικότητας που προκύπτει από την έκθεση τους σε απολυμαντικά του χλωρίου ή του υποχλωριώδους ακόμη και σε επίπεδα ppb. Αν και η αντίσταση σε χλώριο των σύνθετων μεμβρανών υπερδιήθησης τάσης έχει βελτιωθεί, οι μεμβράνες αυτές εξακολουθούν να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν με παρεχόμενο νερό που περιέχει χλώριο περισσότερο από μερικά ppb.

#### **1.4.1 Τύποι των μεμβρανών**

Γενικά οι μεμβράνες αποτελούνται από πολύ λεπτά φύλλα τα οποία συνιστούν ένα φράγμα στην ελεύθερη ροή του διαλύματος τροφοδότησης. Συγκροτούνται από δύο ξεχωριστές στοιβάδες: μία λεπτότατη στοιβάδα, τον υμένα (skin), που είναι το δραστικό τμήμα της μεμβράνης για το διαχωρισμό του νερού από τα διαλυμένα ή αιωρούμενα συστατικά, και από ένα λεπτό στρώμα από πορώδες υλικό το οποίο είναι περατό τόσο στο νερό όσο και στα υπόλοιπα συστατικά που περιέχονται σε αυτό (Εσσάμ Σααμπάν Μωχάμεντ, 2009).

Ο δραστικός υμένας απαιτεί ιδιαίτερη μεταχείριση και το πάχος του είναι μικρότερο του 0.1 μm. Στις περισσότερες περιπτώσεις το νερό διαπερνά ελεύθερα διαμέσου της επιφάνειας του, ενώ τα ποσοστά απόρριψης των ανόργανων συστατικών είναι 90 έως 99% και των οργανικών 95 έως 99%, για τα λεπτά αιωρούμενα κολλοειδή, όπως βακτηρίδια, ιούς, πυριτικό οξύ, άργιλο, κλπ είναι περίπου 100%. Με βάση τον τρόπο παρασκευής τους και το πολυμερές συστατικό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή τους διακρίνονται σε ομοιογενείς και ετερογενείς μεμβράνες (Αλεξάκης, 1993).

Στην αξιολόγηση μιας μεμβράνης κατέχει εξέχουσα σημασία η παρατήρηση της εσωτερικής δομής των μεμβρανών. Σύμφωνα με αυτή προσδιορίζεται η περατότητα και η εκλεκτικότητα της μεμβράνης, η οποία ουσιαστικά στηρίζεται στη μηχανική της αντοχή.

Ως προς την εσωτερική μορφή οι μεμβράνες διακρίνονται σε:

1. Ομοιογενείς
2. Ασύμμετρες
3. Σύνθετες
4. Ασύμμετρες με επιφανειακό λεπτό υμένα

Ο δραστικός υμένας στις ασύμμετρες μεμβράνες αποτελείται αποκλειστικά από οξική Κυτταρίνη, CA, πολυαμίδες, PA, και πολύ-ιμίδες, PI, ενώ η δραστική στοιβάδα στις σύνθετες μεμβράνες συγκροτείται από μία πληθώρα πολυμερών ουσιών που συγκροτούν λεπτά στρώματα, όπως π.χ. οξική κυτταρίνη, CA, πολυαμίδες, PA, πολυακρυλο-νιτρίλια, PAN, πολυσουφλόνες, PS, φθοριούχο πολυβινυλιδένιο, PVDF, πολυβινύλιμυδαζολίνη, PVI, κλπ (Δεληγιάννη και Μπελεσιώτης (1995).

#### 1.4.2 Στοιχεία μεμβρανών (modules)

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό των μεμβρανών οι οποίες χρησιμοποιούνται στις διεργασίες υπό πίεση, εκτός του ότι αποτελούνται από οργανικές πολυμερείς ενώσεις, είναι πολύ λεπτές και εύθραυστες, είναι ότι στηρίζονται σε μονάδες οι οποίες ονομάζονται στοιχεία μεμβρανών (modules). Τα στοιχεία αυτά έχουν δυο μορφές, επίπεδη και σε σωληνωτή μορφή με διάμετρο από 85 mm έως 2.54 cm (1 inch).

Ο επίπεδος τύπος επινοήθηκε στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας στο Λος Άντζελες και αποτελεί μια από τις πρώτες και απλούστερες κατασκευές μεμβρανών. Όπως λέει και το όνομα τους, αφορά μεμβράνες επιπέδου σχήματος. Οι μεμβράνες αυτές στηρίζονται σε ειδικά διάτρητα πορώδη πλαίσια, που χρησιμεύουν για τη στήριξη των μεμβρανών. Η κατασκευή τους επιτρέπει στο νερό τροφοδοσίας να κυλά ανάμεσα στο στενό άνοιγμα που υπάρχει ανάμεσα στις επιφάνειες των μεμβρανών. Το επεξεργασμένο νερό συγκεντρώνεται μέσω ειδικών ανοιγμάτων που υπάρχουν μεταξύ των πλαισίων (Εσσάμ Σααμπάν Μ., 2009).

Για τις μεθόδους υπό πίεση διακρίνονται τέσσερις βασικοί τύποι στοιχείων μεμβρανών. Οι τέσσερις τύποι των στοιχείων είναι:

1. Στοιχείο μεμβρανών σπειροειδούς περιέλιξης (spiral wound module)
2. Στοιχείο κοίλων ινών (hollow fiber module)
3. Σωληνοειδές στοιχείο (tubular module)
4. Δισκοειδή στοιχεία (Platte and frame modules)

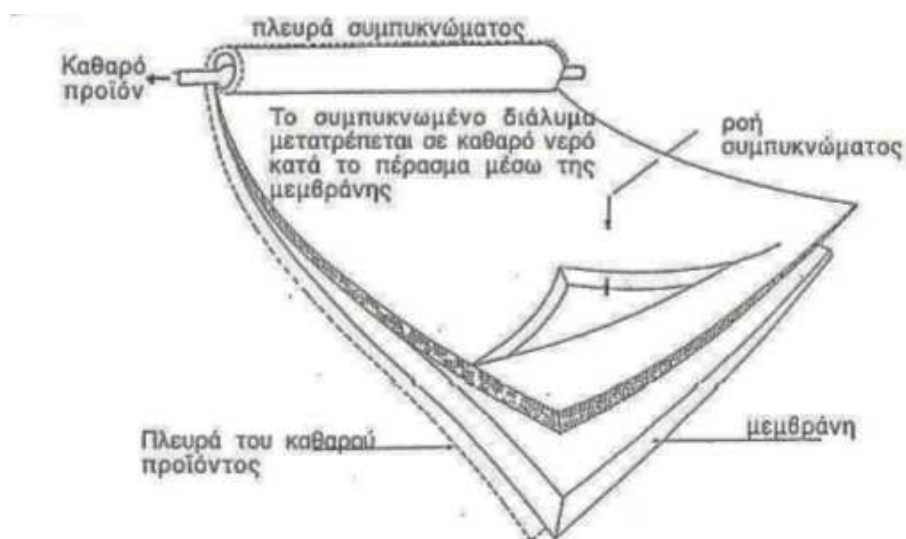
Από τους προαναφερόμενους τύπους οι δύο πρώτοι βρίσκουν εφαρμογή στην αντίστροφη ώσμωση για την παραγωγή καθαρού νερού.

#### 1.4.3 Σπειροειδώς τυλιγμένες μεμβράνες

Οι σπειροειδώς τυλιγμένες μεμβράνες έχουν σαν χαρακτηριστικό ότι οι δυο μεμβράνες είναι τοποθετημένες με τέτοιο τρόπο, ώστε να έρχονται σε

επαφή με ένα πορώδες εύκαμπτο υλικό στήριξης (συνήθως από ένα πλέγμα από ντακρόν), σχηματίζοντας τρία στρώματα. Ένας διάτρητος σωλήνας υπάρχει ανάμεσα στις μεμβράνες διαμορφώνοντας τον κύλινδρο, όπου πάνω σ' αυτόν τον ελίσσονται οι μεμβράνες μαζί μ' ένα κατάλληλο υλικό που τις διαχωρίζει. Το νερό παρέχεται μέσω μιας διόδου που υπάρχει στο διαχωριστικό υλικό, ενώ το επεξεργασμένο νερό εξέρχεται δια μέσου του κεντρικού σωλήνα, ο οποίος είναι προσκολλημένος με το τοίχωμα του δοχείου πίεσης (Αλεξιάκης Α., 2003).

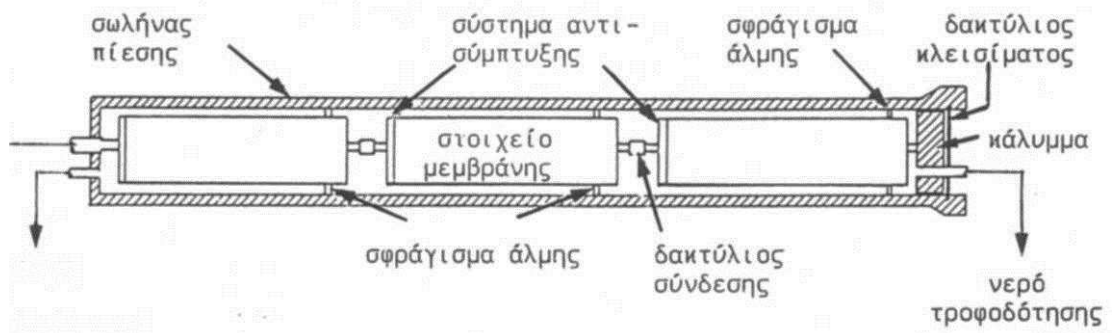
Η παρακάτω εικόνα παριστάνει σχηματικά, σε μερική ανάπτυξη ένα τμήμα στοιχείου σπειροειδούς περιέλιξης, σε τομή. Το τοίχωμα (Τ) (μεμβράνη) με τα υποστηρίγματα είναι συγκολλημένο στις δύο του άκρες στον κεντρικό σωλήνα (Σ), το σωλήνα του παραγόμενου νερού (Γκέκας Β., 2002). Το διάλυμα τροφοδότησης, αλμυρό ή θαλάσσιο νερό (κόκκινη γραμμή) ρέει παράλληλα (Γκέκας Β., 2002).



**Εικόνα 1.4.3.1 :** Μεμβράνη σπειροειδούς περιέλιξης.

Πηγή: Γκέκας Β., Αντίστροφη όσμωση. Σεμινάριο: Κατεργασία νερού στη βιομηχανία Επιμελητήριο της Ελλάδος. Αθήνα 7.10.1980.

Στην επόμενη εικόνα απεικονίζεται η διάταξη ενός στοιχείου αντίστροφης ώσμωσης που αποτελείται από τρία στοιχεία μεμβράνης ελικοειδούς περιέλιξης. Το συνηθέστερο μήκος ενός στοιχείου αντίστροφης ώσμωσης είναι 6.1 m (240 inch).



**Εικόνα 1.4.3.2 :** Διάταξη ενός στοιχείου αντίστροφης ώσμωσης με τρία στοιχεία μεμβρανών.

Υπάρχουν διαφορετικά είδη μεμβρανών που εναλλάσσονται ανάλογα την περίπτωση χρήσης. Συνήθως προτιμώνται οι ασύμμετρες μεμβράνες οξικής κυτταρίνης ή ασύμμετρες μεμβράνες από γραμμική αρωματική πολυαμίδη. Οι λεπτού υμένα σύνθετες μεμβράνες όπως από πολυακρυλονιτρίλιο, αρωματικές πολυαμίδες, θειωμένες πολυσουλφόνες κ.λπ., υπάρχουν σε σχετικά μεγαλύτερη ποικιλία στο εμπόριο από τις ασύμμετρες και υπερτερούν έναντι των μεμβρανών οξικής κυτταρίνης. Τα κύρια πλεονεκτήματα των μεμβρανών της οξικής κυτταρίνης είναι το μικρό κόστος και η ανθεκτικότητα που παρουσιάζουν στη χλωρίωση, αλλά δεν είναι ιδιαίτερα ανθεκτικές στη θερμοκρασία, τις μικροβιακές μολύνσεις και γενικότερα στις πολλαπλές χρήσεις. Από την άλλη μεριά οι σύνθετες μεμβράνες λεπτού υμένα υπερτερούν έναντι της ανθεκτικότητας τους σχετικά με τις μικροβιακές μολύνσεις, έχουν μεγάλη αντοχή στις χρήσεις και της θερμοκρασίας, αλλά δεν είναι ανθεκτικές στη χλωρίωση και έχουν υψηλό κόστος αγοράς.

#### **1.4.4 Μεμβράνες διατάξεως λεπτών πορωδών ινών**

Οι μεμβράνες κοίλων ινών αποτελούν τον πιο εξελιγμένο τύπο μεμβρανών. Οι μεμβράνες αυτού του είδους είναι ιδιαίτερα ευέλικτες, αφού έχουν εξωτερική διάμετρο ίση με 85  $\mu\text{m}$ . Παρουσιάζουν εξαιρετική σταθερότητα, καθώς οι ίδιες οι ίνες συνιστούν ένα σωλήνα υψηλής πίεσης (πίεση έως 70 bar). Οι μεμβράνες κατασκευάζονται από ασύμμετρες ίνες

πολυαμιδίου. Η εξωτερική επιφάνεια τους αποτελεί ένα λεπτό υμένα, που διαμορφώνει την ενεργό επίστρωση της μεμβράνης, η οποία αποτρέπει τη διέλευση των αλάτων και ταυτόχρονα διευκολύνει τη διέλευση του νερού. Το υπόλοιπο μέρος του σωλήνα έχει σαν σκοπό τη στήριξη του λεπτού υμένα. Η μεταφορά του νερού επιτυγχάνεται διαμέσου του εξωτερικού μέρους και προς το εσωτερικό των κοίλων ινών (Αλεξάκης Α., 2003). Τέτοιου είδους συστήματα μεμβρανών είναι συμπαγή και επιδεικνύουν υψηλές αντοχές στην θερμοκρασία και το pH. Δυστυχώς οι μεμβράνες ρυπαίνονται εύκολα και ο καθαρισμός τους απαιτεί τη χρήση χημικών μέσων.

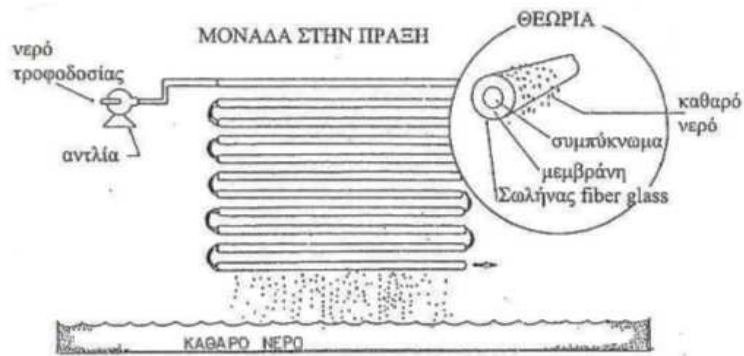


**Εικόνα 1.4.4.1:** Απεικόνιση μεμβρανών λεπτών πορωδών ινών (Πηγή: Wikipedia)

#### **1.4.5 Σωληνωτού τύπου μεμβράνες**

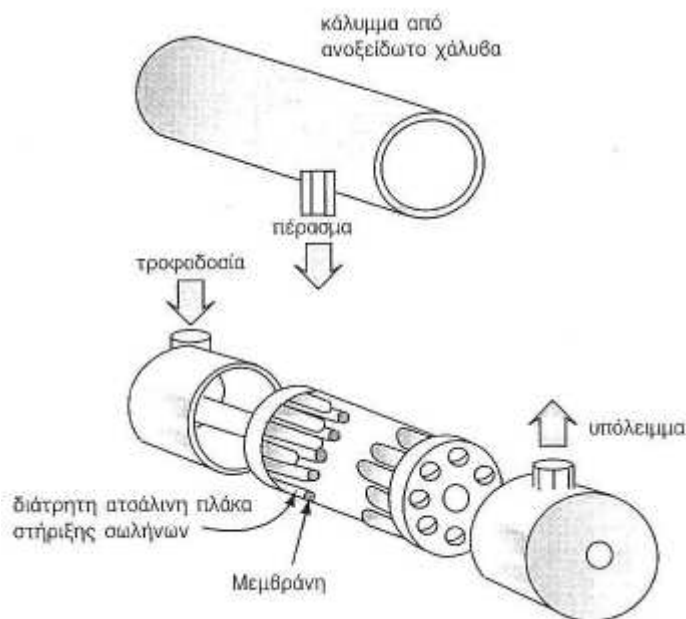
Οι μεμβράνες σωληνωτού τύπου έχουν πλέον παραγκωνιστεί από τις μεμβράνες της ελικοειδούς περιέλιξης και των κοίλων ινών. Στις μεμβράνες αυτού του τύπου, η ημιπερατή μεμβράνη βρίσκεται στο εσωτερικό ή αποτελεί το κάλυμμα της επιφάνειας ενός πορώδους σωλήνα (συνήθως από fiberglass) (Αλεξάκης Α., 2003). Το νερό τροφοδοσίας ρέει διαμέσου των κυλίνδρων της μεμβράνης (διαμέτρου 12-24 mm), και το προϊόν ρέει διαμέσου των οπών ή των πόρων των σωλήνων στήριξης, στο χώρο που τους περιβάλλει (εικόνα 1.4.5.1) (Γκέκας Β., 2002).





**Εικόνα 1.4.5.1:** Απεικόνιση μεμβρανών σωληνωτού τύπου

Πηγή: Γκέκας Β., Αντίστροφη όσμωση. Σεμινάριο: Κατεργασία νερού στη βιομηχανία Επιμελητήριο της Ελλάδος. Αθήνα 7.10.1980.



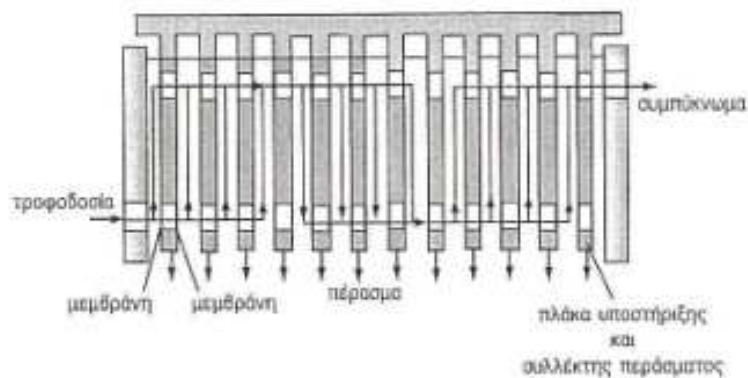
**Εικόνα 1.4.5.2 :** Σωληνοειδής μεμβρανοθήκη.

Πηγή: Leiva M., "Pressure — driven Membrane Processes", FIDEL - European Network for Distance Learning in Food Science and Technology, Lund.

Κατά κανόνα το υλικό κατασκευής των μεμβρανών είναι η οξική κυτταρίνη. Τα πλεονεκτήματα αυτού του είδους των μεμβρανών είναι ο χαμηλός βαθμός ρύπανσης και εύχρηστος τρόπος καθαρισμού ακόμα και με μηχανικό τρόπο. Από την άλλη μεριά η διάταξη αυτών των μεμβρανών δεν είναι συμπαγής, καθώς και δεν παρουσιάζει αντοχές σε θερμοκρασία και pH.

#### 1.4.6 Στοιχεία μεμβρανών με δίσκους και πλαίσια

Χαρακτηριστικό των μεμβρανών με δίσκους και πλαίσια είναι η τοποθέτηση των επίπεδων μεμβρανών ενδιάμεσα σε δίσκους, διαμορφώνοντας μια δομή «σάντουιτς» (Αλεξάκης Α., 2003). Το νερό τροφοδοσίας διέρχεται μέσω των πλαισίων σε μια κατακόρυφη διάταξη που σχηματίζουν οι δίσκοι (Γκέκας Β., 2002). Το σύστημα αυτό κλείνει με δύο φλάντζες, από μια σε κάθε άκρο και σταθεροποιούνται με τη βοήθεια ενός μπουλονιού τοποθετημένου στο κέντρο του συστήματος.



**Εικόνα 1.4.6.1 : Απεικόνιση μεμβρανών με πλάκα και πλαίσια**

Πηγή: Leiva M., "Pressure - driven Membrane Processes", FIDEL - European N Distance Learning in Food Science and Technology, Lund.

### 1.5 Κύριες κατηγορίες μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης

Οι μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- Μεμβράνες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού και υφάλμυρου που λειτουργούν με διαλύματα 0,5 έως 5% άλατος κατά βάρος και σε πιέσεις από 200-1000 psi.
- Μεμβράνες Νανοδιήθησης Χαμηλής πίεσης που λειτουργούν με διαλύματα αλάτων 200-5000 ppm σε πιέσεις των 100-200 psi.
- Μεμβράνες Υπερδιήθησης που χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό ουσιών από βιολογικά διαλύματα.

### **1.5.1 Μεμβράνες αφαλάτωσης θαλασσινού και υφάλμυρου νερού**

Μια μονάδα αντίστροφης όσμωσης ενός σταδίου μπορεί να επιτύχει ελάχιστη απόρριψη χλωριούχου νατρίου 99,3%. Μεμβράνες με μικρότερη ικανότητα απόρριψης χλωριούχου νατρίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού, αλλά τουλάχιστον ένα μέρος του παραγόμενου νερού πρέπει να επεξεργάζεται και σε δεύτερο στάδιο, έτσι η μέθοδος αυτή δεν θεωρείται ιδιαίτερα πλεονεκτική σε σχέση με άλλες. Οι διασταυρούμενες μεμβράνες της φουρφουρυλικής αλκοόλης έχουν μακράν την καλύτερη ικανότητα απόρριψης του χλωριούχου νατρίου, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα καλές ροές και αυτό είναι που εξηγεί το συνεχές ενδιαφέρον στις εν λόγω μεμβράνες παρά την πολύ μεγάλη ευαισθησία τους σε διαλυμένο χλώριο και το οξυγόνο στο νερό τροφοδοσίας. Οι κοίλες λεπτών ινών μεμβράνες τριοξικής κυτταρίνης είναι επίσης ασφαλής στην αφαλάτωση του θαλασσινού νερού ενός σταδίου, αλλά οι ροές του νερού που επιτυγχάνουν είναι χαμηλές. Σήμερα, όλες οι νέες μονάδες αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού βασίζονται στις σύνθετες μεμβράνες υπερδιήθησης αρωματικού τύπου, όπως η SW-30. Όσον αφορά το υφάλμυρο νερό, οι μεμβράνες που επιτυγχάνουν απόρριψη χλωριούχου νατρίου 95-98% είναι συνήθως επαρκείς. Για το λόγο αυτό ορισμένες μονάδες υφάλμυρου νερού χρησιμοποιούν ακόμα μεμβράνες οξικής κυτταρίνης με απόρριψη του άλατος 96-98%, αν και οι σύνθετες μεμβράνες υπερδιήθησης είναι πιο συχνές. Οι σύνθετες μεμβράνες προτιμώνται από τις μεγάλες επιχειρήσεις όπως οι δημοτικές εγκαταστάσεις πόσιμου νερού (Williams M., 2003i).

### **1.5.2 Μεμβράνες Νανοδιήθησης**

Οι μεμβράνες έχουν μικρότερη ικανότητα απόρριψης χλωριούχου νατρίου (μεταξύ 20 και 80%) αλλά πολύ υψηλότερη διαπερατότητα σε νερό και μόρια μεγάλου μοριακού βάρους διαλυμένα σε οργανικά διαλύματα. Οι ιδιότητες αυτές είναι ενδιάμεσες μεταξύ των μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης με απόρριψη άλατος άνω του 90% και των μεμβρανών υπερδιήθησης με απόρριψη άλατος λιγότερο από 5%. Τα περισσότερα από αυτά βασίζονται στις σύνθετες μεμβράνες υπερδιήθησης. Η διαδικασία

παρασκευής που χρησιμοποιείται μπορεί να οδηγήσει στην προσκόλληση των όξινων ομάδων στην σπονδυλική στήλη του πολυμερούς. Ουδέτερες διαλυτές ουσίες όπως η λακτόζη δεν επηρεάζονται από την παρουσία φορτισμένων ομάδων και η ικανότητα απόρριψης της μεμβράνης αυξάνεται κατ'αναλογία του μέγεθους της διαλυτής ουσίας. Η απόρριψη του άλατος εξαρτάται τόσο από το μοριακό μέγεθος όσο και από αποκλεισμό λόγω δράσεων Donnan που προκλήθηκε από τις όξινες ομάδες που συνδέονται με το σκελετό του πολυμερούς. Οι φορτισμένες ομάδες τείνουν να αποκλείουν ιόντα του ίδιου φορτίου, ιδίως πολυσθενή ιόντα ενώ τελείως διαπερατό σε ιόντα του αντίθετου φορτίου, ιδίως πολυσθενή ιόντα. Με αυτόν τον τρόπο, υπάρχουν ανιονικές μεμβράνες νανοδιήθησης με προσκολλημένες θετικές ομάδες και κατιονικές μεμβράνες νανοδιήθησης. Αυτό το είδος των μεμβρανών, που ονομάζονται επίσης μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης χαμηλής πίεσης (συνήθως λειτουργούν σε 50-200 psi), έχουν πολύ υψηλό ποσοστά απόρριψης και διαπερατότητας σε άλατα χαμηλών συγκεντρώσεων, αλλά χάνουν την εκλεκτικότητα τους σε νερό τροφοδοσίας με συγκεντρώσεις άλατος πάνω από 1000-2000 ppm (Williams M., 2003i).

### **1.5.3 Μεμβράνες Υπερδιήθησης**

Αυτού του οι μεμβράνες χρησιμοποιούνται για το είδους διαχωρισμό οργανικών διαλυτών. Τέτοιου είδους διαχωρισμοί είναι δύσκολοι λόγω της υψηλής οσμωτικής πίεσης που πρέπει να ξεπεραστεί και επειδή οι μεμβράνες απαιτείται να είναι αρκετά ανθεκτικές στον διαλύτη για να είναι μηχανικά σταθερές, αλλά και να είναι αρκετά διαπερατές ώστε να προκύψουν καλές ροές. Επιπλέον, πρέπει να αναπτυχθούν διαφορετικές μεμβράνες για κάθε κατηγορία διαλύτη. Οι πρώτες μεμβράνες υπερδιήθησης εμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1990, όταν αναπτύχθηκε μια σύνθετη μεμβράνη διασταυρούμενης σιλικόνης που εφαρμόστηκαν σε μη πολικούς διαλύτες. Η μεμβράνη υπερδιήθησης Starmem®, που είναι διαπερατή στους διαλύτες και αποτελείται από ασύμμετρες μεμβράνες πολυαμίδιου αντίστροφης φάσης, είχαν μεγάλης κλίμακας εμπορική χρήση από την Mobil Oil, με σκοπό να διαχωριστεί το λιπαντικό λάδι από μείγματα διαλυτών με Μεθυλαιθυλοκετόνη-τολουόλιο (Williams M., 2003i).

#### 1.5.4 Επιλεκτικότητα μεμβράνης

Σε γενικές γραμμές παρατηρείται ότι πολυσθενή ιόντα συγκρατούνται καλύτερα από τα μονοσθενή ιόντα. Διαλυμένα αέρια όπως η αμμωνία, το οξυγόνο, το χλώριο ή το διοξείδιο του άνθρακα έχουν μεγάλη ικανότητα διαπερατότητας. Η απόρριψη των ασθενών οξέων και βάσεων είναι εξαρτώμενη από το pH, έτσι ώστε στην ιονισμένη μορφή η απόρριψη να είναι μεγαλύτερη. Η απόρριψη των ουδέτερων οργανικών διαλυτών ουσιών γενικά αυξάνεται ανάλογα με το μοριακό βάρος ή το μέγεθος της διαλυτής ουσίας (Williams M., 2003i).

#### 1.5.5 Παραδείγματα μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης

Τα τελευταία 25 χρόνια, μερικές από τις σημαντικότερες διεπιφανειακές μεμβράνες πολυμερισμού αντίστροφης όσμωσης είναι:

- NS100: πολυαιθυλενιμίνη διασταυρώνεται με τολουόλιο 2,4-δισοκυανικό. Είναι η πρώτη σύνθετη μεμβράνη υπερδιήθησης που επιτυγχάνει αφαλάτωση του θαλασσινού νερού άνω του 99 %.

- PA300/RC-100 : αζιριδίνη διασταυρώνεται με 2,4-δισοκυανικό τολουόλιο . Αυτή η μεμβράνη χρησιμοποιήθηκε στο πρώτο μεγάλο εργοστάσιο αντίστροφης όσμωσης για αφαλάτωση του θαλασσινού νερού στη Σαουδική Αραβία.

- NFT40 και NTR7250 : πιπεραζίνη διασταυρώνεται με τριμεσικό οξύ (Cadotte J., 1981). Είναι η πρώτη ολο-μονομερική μεμβράνη υπερδιήθησης. Παρουσιάζει μόνο μέτριες ιδιότητες αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού, αλλά είναι μια καλή μεμβράνη υφάλμυρου νερού και έχει μεγαλύτερη αντίσταση χλωρίου λόγω της απουσίας της δευτεροταγών ομόλογων αμινών (Kamiyama Y., 1984).

- FT-30/SW-30 : Οι FT-30 μεμβράνες, που αναπτύχθηκαν από τον Filmtec Corporation, είχαν εμπορική επιτυχία για λογαριασμό της RO (Cadotte J., 1981). Στην FT-30, το ενεργό συστατικό της λεπτής μεμβράνης είναι ένα αρωματικό πολυαμίδιο (PA) που προετοιμάζεται μέσω των φαινιμένων επιφανειακής τάσης και πολυμερισμού της μ-φαινυλενοδιαμίνης (MPD) στην υδατική φάση και του trimesoyl χλωριούχο (TMC) στην οργανική φάση. Οι FT-

30 μεμβράνες που παράγονται σε σπειροειδή μορφή έχουν απόρριψη άλατος 99,3% κατά την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού σε 800 psi. Πολλές προσπάθειες έχουν καταβληθεί για τη βελτίωση της απόδοσης της μεμβράνης TFC μέσω τροποποίησης της μεμβράνης ή της προσθήκης διαφόρων πρόσθετων. Οι TFC-RO παρουσιάζουν αυξημένη ροή έως 30-70% όταν νωπές παρασκευασμένες μεμβράνες TFC ενυδατώνονται με διαλύματα που περιέχουν διάφορα οργανικά είδη, συμπεριλαμβανομένων της γλυκερόλης κ.α. (Williams M., 2003i).

Μια ενδιαφέρουσα ομάδα σύνθετων μεμβρανών με πολύ καλές ιδιότητες παράγεται από τη συμπύκνωση της φουρφουρυλικής αλκοόλης με θειικό οξύ. Οι μεμβράνες αυτές δεν γίνονται διαμέσου μιας σύνθετης διαδικασίας υπερδιήθησης. Επιτυγχάνουν απορρίψεις άλατος του θαλασσινού νερού μέχρι και 99,6% και ροές των 23 gal/ft<sup>2</sup> • ημέρες σε 800 psi. Δυστυχώς, είναι ακόμη πιο ευαίσθητες σε οξειδωτικούς παράγοντες όπως το χλώριο και το διαλυμένο οξυγόνο σε σύγκριση με τις σύνθετες μεμβράνες υπερδιήθησης, χάνοντας τις εξαιρετικές ιδιότητες τους μετά από μερικές εκατοντάδες ώρες λειτουργίας εκτός και εάν το νερό τροφοδοσίας είναι εντελώς απαλλαγμένο από οξειδωτικούς παράγοντες (Williams M., 2003i).

## 1.6 Το σύστημα της αντίστροφης ώσμωσης

### 1.6.1 Ερμηνεία του συστήματος της αντίστροφης ώσμωσης

Η ροή του νερού διαμέσου της μεμβράνης σε συνάρτηση με την πυκνότητα ροής του καθαρού νερού,  $J_v$ , εκφράζεται μέσω του τύπου:

$$J_v = \frac{\text{Ρυθμός περατότητας νερού}}{\text{Επιφάνεια μεμβράνης}}$$

$J_v$ : η ροή του περάσματος ανά μονάδα χρόνου και μονάδα επιφάνειας της μεμβράνης.

Η περατότητα των διαλυμένων ουσιών εξαρτάται από τη ροή των διαλυμένων  $J_s$ :

$$J_s = \frac{\text{Ρυθμός μεταφοράς}}{\text{Επιφάνεια μεμβράνης}}$$

$J_s$ : η ποσότητα της διαλυμένης ουσίας που μεταφέρεται δια μέσω της μεμβράνης ανά μονάδα χρόνου και μονάδα επιφανείας της μεμβράνης

Γενικώς για τη ροή του νερού δια μέσου της μεμβράνης ισχύει:

$$J_v = L_v (\Delta P - \Delta \Pi)$$

Ενώ για τη μεταφορά της διαλυμένης ουσίας αντιστοίχως:

$$J_s = B \Delta c_s,$$

Όπου:

B: η διαπερατότητα της μεμβράνης για τη διαλυμένη ουσία, και

$\Delta c_s$ : η βαθμίδα συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας κατά μήκος της μεμβράνης.

Όσον αφορά την υδατοδιαπερατότητα, αυτή εξαρτάται άμεσα από την διάχυση του νερού ( $D_w M$ ), ενώ επηρεάζεται αντιστρόφως ανάλογα από το πάχος της μεμβράνης ( $h$ ), δηλαδή:

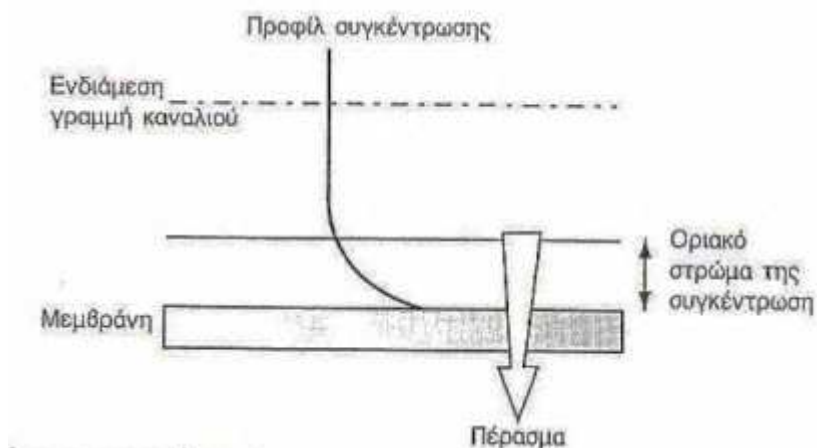
$$L_v = \alpha \frac{D_w M}{h}$$

Η παράμετρος της διαπερατότητας B είναι μια συνάρτηση της διάχυσης της διαλυμένης ουσίας στη μεμβράνη ( $D_s M$ ), του πάχους της μεμβράνης και επίσης μιας σταθεράς ισορροπίας ή του συντελεστή διαλυτότητας ( $K^*$ ).

$$B = \alpha \frac{D_s M k^*}{h}$$

Η μεταφορά των διαλυμένων ουσιών διαμέσου της μεμβράνης μπορεί να ερμηνευτεί σύμφωνα με το φαινόμενο της πόλωσης της συγκέντρωσης. Με βάση το φαινόμενο αυτό στην επιφάνεια της μεμβράνης δημιουργούνται δυο είδη οριακού στρώματος, από τα οποία εξαρτάται η μεταφορά των ουσιών (Γκέκας Β., 2002). Το ένα στρώμα ονομάζεται οριακό στρώμα ταχύτητας και χαρακτηρίζεται από το μεγαλύτερο πάχος, ενώ το δεύτερο στρώμα είναι το οριακό στρώμα της συγκέντρωσης και υπάρχει μέσα στο πρώτο στρώμα. Το οριακό στρώμα συγκέντρωσης σχηματίζεται από τη διαλυμένη ουσία, που τελικώς δεν μεταφέρεται διαμέσου της μεμβράνης αλλά αποθηκεύεται πάνω

σε αυτήν, έχοντας ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη συγκέντρωση της σε εκείνο το σημείο σε σχέση με τη συγκέντρωση της στο διάλυμα (Goosen M.et. al., 2004).



**Σχήμα 1.6.1.1 :** Πόλωση συγκέντρωσης

Πηγή: Leiva M., "Pressure - driven Membrane Processes", FIDEL - European Nei Distance Learning in Food Science and Technology, Lund.

Η απομάκρυνση και ο διαχωρισμός των διαλυμένων εκφράζεται σε σχέση με την απόρριψη  $R$ , όπως αυτή ορίζεται με βάση τον τύπο:

$$R = 1 - \frac{C_R}{C_P}$$

$C_R$ : η συγκέντρωση του υπολείμματος (συμπυκνώματος) και

$C_P$ : η συγκέντρωση του περάσματος.

Το σύστημα της αντίστροφης ώσμωσης αξιολογείται και μέσω του συντελεστή ανάκτησης, ο οποίος ορίζεται ως:

$$Y = \frac{Q_P}{Q_F} \times 100\%$$

Όπου:  $Q_P$ : η ροή του περάσματος και

$Q_F$ : η ροή του νερού τροφοδοσίας.



Ο συντελεστής πέρασμα άλατος ορίζεται ως εξής

$$SP = \frac{C_P}{C_F} \times 100\%$$

Όπου:

$C_P$ : η συγκέντρωση του άλατος στο πέρασμα και

$C_F$ : η συγκέντρωση του άλατος στην τροφοδοσία.

Η ποσότητα του νερού τροφοδοσίας που περνά μέσα από τη μεμβράνη (το διήθημα) μετράται σε συνάρτηση με την ανάκτηση νερού,  $r$ , που ορίζεται για ένα σύστημα Batchαντίστροφης ώσμωσης ως εξής:

$$r = \frac{\sum J_w A_m \Delta t}{V_F} = \frac{V_P}{V_F}$$

Όπου  $J_w$  η ροή του νερού,  $V_P$  ο όγκος του διαλύματος άλατος,  $V_F$  ο όγκος του νερού τροφοδοσίας

Ενώ για ένα συνεχές σύστημα

$$r = \frac{J_w A_m}{F_F} = \frac{F_P}{F_F}$$

Στο σύστημα Batch, το νερό ανακτάται από το σύστημα, καθώς το συμπύκνωμα ανακυκλώνεται στη δεξαμενή τροφοδοσίας ως εκ τούτου, εάν οι διαλυμένες ουσίες απορρίπτονται συνεχώς, τότε η συγκέντρωση του παρεχόμενου νερού ( $C_F$ ) αυξάνεται συνεχόμενα με το πέρασμα του χρόνου (Williams M., 2003ii). Για ένα συνεχές σύστημα, φρέσκο νερό παρέχεται συνεχώς στο σύστημα. Η ροή του νερού συνήθως ρυθμίζεται σύμφωνα με την αρχική παροχή του καθαρού νερού ( $J_{wo}$ ) ως  $\frac{J}{J_{wo}}$  ή πτώση υγρού σύμφωνα με τη σχέση:

$$Flux Drop = 1 - \frac{J_w}{J_{wo}}$$

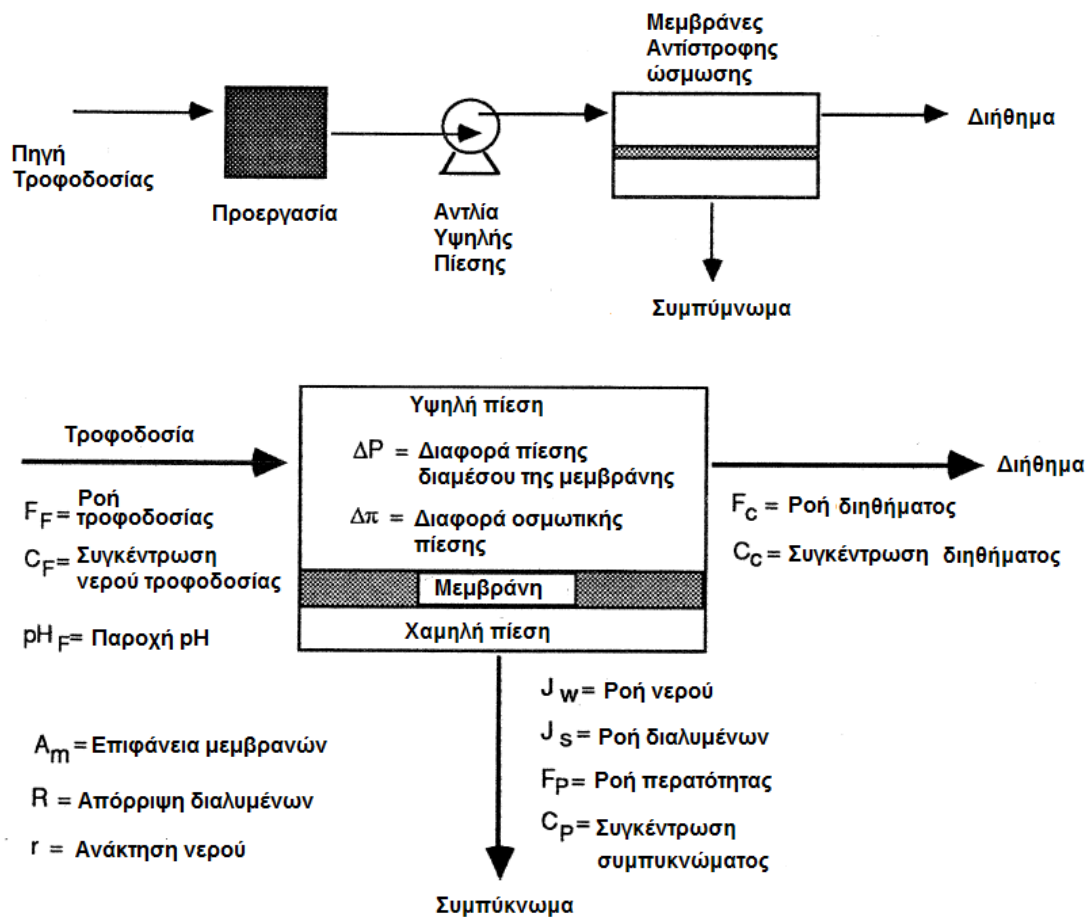
## 1.6.2 Λειτουργία μονάδας αντιστρεπτής όσμωσης

Σε αυτή την ενότητα θα αναλυθούν τα διάφορα στάδια επεξεργασίας του νερού με τη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης. Τα συστήματα μεμβρανών για τα οποία έγινε λόγος έχουν κυλινδρικό σχήμα. Με το σχήμα αυτό επιτυγχάνεται καλύτερος καταμερισμός της πίεσης εσωτερικά του κυλίνδρου, αλλά είναι και μεγαλύτερη η προστασία της μεμβράνης λόγω της τοποθέτησης ενός εξωτερικού ανθεκτικού κυλίνδρου. Το νερό τροφοδοσίας εισερχόμενο με πίεση στον κύλινδρο καταλήγει να εξέρχεται απαλλαγμένο από τα άλατα.

Η τοποθέτηση των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης γίνεται σε παράλληλη διάταξη. Αυτού του είδους η διάταξη αυξάνει την απόδοση του συστήματος. Συγκεκριμένα η απόδοση εκφράζεται ως βαθμός μετατροπής του νερού τροφοδοσίας ( $m^3/ώρα$ ) σε παραγόμενο νερό απαλλαγμένο από άλατα ( $m^3/ώρα$ ).

Γενικότερα ο βαθμός μετατροπής είναι υπολογίσιμος για ένα σύστημα προτού την εγκατάσταση σύμφωνα με τον αριθμό φίλτρων που υπάρχουν στο σύστημα, αλλά και από το ρυθμό παροχής του νερού τροφοδοσίας. Στη μονάδα επεξεργασίας του νερού υπάρχουν διακόπτες ροής εξόδου του συμπυκνώματος, καθώς και διακόπτες που κανονίζουν τη ροή του νερού διαμέσου των μεμβρανών, όπου λαμβάνει χώρα η αντίστροφη ώσμωση. Ο λεπτομερής σχεδιασμός του συστήματος αυτού επιτυγχάνει μέγιστους ρυθμούς απόρριψης των αλάτων.

Μια σχηματική απεικόνιση του συστήματος φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



**Εικόνα 1.6.2.1 :** Μονάδα επεξεργασίας νερού σύμφωνα με το σύστημα της αντίστροφης ώσμωσης (Williams M., 2003ii).

### 1.6.3 Στάδια επεξεργασίας νερού με τη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης

Η διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης είναι σχετικά απλή στο σχεδιασμό. Το σύστημα αποτελείται από τα εξής κύρια τμήματα:

- Τμήμα προ-επεξεργασίας του νερού
- Το κυρίως σύστημα της αντίστροφης ώσμωσης
- Τμήμα μετ-επεξεργασίας του νερού

### 1.6.3.1 Σύστημα προ-επεξεργασίας

Η προ-επεξεργασία αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά στάδια, όταν στόχος είναι η καλύτερη και μεγαλύτερη απόδοση και η καλύτερη συντήρηση του συστήματος αντίστροφης ώσμωσης. Ο προσεκτικός σχεδιασμός των μεθόδων στο στάδιο αυτό, οδηγεί στην μέγιστη λειτουργικότητα των μεμβρανών, ελαττώνοντας τις φθορές της λόγω της σκληρότητας του νερού, των μολύνσεων και άλλων αιτιών.

Το σύστημα προ-επεξεργασίας απαιτεί τον προσεκτικό χημικό σχεδιασμό (απαραίτητα χημικά υλικά του κάθε σταδίου), αλλά και υδροδυναμικό σχεδιασμό (πίεση και παροχή δοσομετρικών αντλιών) με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μειώνεται το λειτουργικό κόστος και να αυξάνεται η απόδοση του σταδίου της προ-επεξεργασίας. Οι λεπτομέρειες αυτού του συστήματος αφορούν τον σχεδιασμό και την κατασκευή των μεμβρανών, τη μελέτη του τμήματος τροφοδοσίας του νερού, τη χημική και μακροσκοπική μελέτη των παραμέτρων που αφορούν τη σύσταση, αλλά και ποιότητα του νερού (δείκτης πυκνότητας λάσπης – Silt Density Index, SDI), και το ποσοστό ανάκτησης του νερού. Πριν ή μετά από κάθε στάδιο υπάρχουν διάφοροι ανιχνευτές-συστήματα που διασφαλίζουν ότι τα βήματα έχουν πραγματοποιηθεί σωστά και με τη σωστή σειρά. Το σύστημα προκατεργασίας εμπεριέχει τα παρακάτω στάδια:

- Χλωρίωση

Η χλωρίωση χρησιμοποιείται, ώστε να αποφεύγεται η μόλυνση κυρίως από ουσίες οργανικής προέλευσης. Το χλώριο μπορεί να είναι είτε ελεύθερο αέριο, είτε να βρίσκεται σε μορφή ενώσεων νατρίου (υπό-χλωριώδες νάτριο) ή, πιο σπάνια, με τη μορφή ενώσεων ασβεστίου (υπό-χλωριώδες ασβέστιο). Οι ενώσεις αυτές εξασφαλίζουν την οξειδωση των συστατικών του νερού, με απώτερο σκοπό να συγκρατηθούν από τα φίλτρα θολότητας. Τροφοδοτικές αντλίες χλωριώνουν το νερό τροφοδοσίας, εξασφαλίζοντας τη μείωση του μικροβιακού φορτίου. Η συγκέντρωση του ενεργού χλωρίου μπορεί να φτάνει μέχρι 10 ppm. Κατάλληλες τροφοδοτικές αντλίες ελέγχουν το δυναμικό

οξειδοαναγωγής και μέσω ενός κεντρικού συστήματος ρυθμίζουν την έγχυση του χλωρίου.

- Θρόμβωση-κροκίδωση

Η θρόμβωση-κροκίδωση χρησιμοποιούνται με σκοπό να απομακρυνθεί το μεγαλύτερο μέρος των αιωρούμενων στερεών, που υπάρχουν στο νερό. Τα στερεά αυτά συσσωματώνονται με τη χρήση διαφόρων ουσιών, ώστε τελικά να διαχωριστούν μέσω των επόμενων σταδίων. Ο διαχωρισμός πραγματοποιείται με τη χρήση δύο ειδών φίλτρων. Τα φίλτρα άμμου, τα οποία αποτελούνται από στρώσεις αδρανών υλικών ποικίλου μεγέθους και τα φίλτρα φυσιγγίων, τα οποία διαχωρίζουν στερεά μεγέθους άνω των 1-5 μm.

- Πολυστρωματικά φίλτρα

Τα πολυστρωματικά φίλτρα αποτελούνται από διαστρωματώσεις αδρανών υλικών με διαφορετικές πυκνότητες. Εμπεριέχουν χαλαζιακά μικρά χαλίκια, αδρανή πυριτική άμμο και ανθρακίτη από τον πυθμένα προς τα επάνω, τα οποία διατηρούν τη θέση τους ακόμα και μετά από έντονες αναδεύσεις. Τα φίλτρα αυτά επιτυγχάνουν το διαχωρισμό εξαιτίας των μεγεθών τους, καθώς και λόγω του βάρους τους που τα καθλώνει στα κατώτερα στρώματα. Μέσω αυτών των φίλτρων εξασφαλίζεται η απομάκρυνση του σιδήρου, μαγγανίου και η αφαίρεση της θολότητας, όπως και η μείωση του δείκτη ρυπαρότητας του νερού (SDI). Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει τις απαραίτητες σωληνώσεις και βάνες, για να εξασφαλίζεται η ασφάλεια και καθαρότητα του συστήματος.

- Αποχλωρίωση

Το χλώριο που έχει απομείνει από τις προηγούμενες διαδικασίες πρέπει να απομακρυνθεί, διότι είναι καταστρεπτικό για τις μεμβράνες. Η απομάκρυνση επιτυγχάνεται με τη χρήση των κατάλληλων αναγωγικών μέσων στη σωστή αναλογία. Επιπλέον μπορεί να γίνει και πραγματοποιηθεί και με φίλτρα ενεργού άνθρακα, τα οποία συγκρατούν ταυτόχρονα την αιωρούμενη οργανική ύλη και χλωραμίνας.

- Ρύθμιση pH

Το pH εξασφαλίζει τις απαραίτητες φυσικοχημικές συνθήκες του συστήματος, οι οποίες διαταράσσονται από τις διάφορες κατεργασίες. Συνήθως πραγματοποιείται οξίνιση με την προσθήκη στις κατάλληλες δόσεις υδροχλωρικού και θειικού οξέος. Τα οξέα αυτά συνδυάζονται και με το επόμενο στάδιο της προσθήκης του αντικαθαλωτικού, ενισχύοντας τη δράση του.

- Προσθήκη αντικαθαλωτικού

Οι αντικαθαλωτικές ουσίες συμβάλλουν στην αποτροπή του σχηματισμού επικαθίσεων αλάτων. Οι ειδικές αυτές χημικές ουσίες μέσω δυνάμεων προσρόφησης εμποδίζουν το αρχικό στάδιο σχηματισμού των αλάτων, αποτρέποντας την ανάπτυξη των κρυστάλλων και επομένως το σχηματισμό επικαθίσεων αλάτων. Οι αντικαθαλωτικές ουσίες αποτρέπουν στο να αποκτήσει ο δείκτης Langelier θετικές τιμές. Ο δείκτης Langelier δηλώνει την καθαλωτική δράση του ανθρακικού ασβεστίου και του θειικού βαρίου, η οποία αυξάνεται μέσω της επεξεργασίας των μεμβρανών. Αυτόματες τροφοδοτικές αντλίες τύπου μεμβράνης εγχύουν τις αντικαθαλωτικές ουσίες (Williams M., 2003ii, 2003 i).

- Φίλτρα εξευγενισμού

Για την ολοκλήρωση του σταδίου της προ-κατεργασίας, το νερό διέρχεται μέσα από τα φίλτρα εξευγενισμού. Τα φίλτρα επιτυγχάνουν την απομάκρυνση αιωρούμενων σωματιδίων με μέγεθος μεγαλύτερο από 1 μm.

### **1.6.3.2 Το κυρίως σύστημα αφαλάτωσης ΑΩ**

Το κυρίως σύστημα αφαλάτωσης είναι το σύστημα, όπου το νερό διαχωρίζεται από τα κύρια συστατικά του με την εφαρμογή υψηλής πίεσης. Το καίριο τμήμα του συστήματος αυτού αποτελούν οι ημιπερατές μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης, αφού είναι αυτές που θα επιτελέσουν το διαχωρισμό των συστατικών του νερού. Το κυρίως σύστημα αφαλάτωσης περιλαμβάνει ειδικά δοχεία πίεσης εντός των οποίων τοποθετούνται σε σειρά τα στοιχεία

μεμβρανών. Παρακάτω αναφέρονται τα κύρια μέρη του συστήματος με περισσότερη λεπτομέρεια:

- Αντλία χαμηλής πίεσης ή τροφοδοσίας

Η αντλία χαμηλής πίεσης βασίζεται στις αρχές των φυγόκεντρων ή περιστροφικών δυνάμεων διαθέτοντας την απαραίτητη ισχύ, ώστε να τροφοδοτεί τα φίλτρα και τις αντλίες υψηλής πίεσης. Το υλικό από το οποίο κατασκευάζεται είναι ανθεκτικό στη διάβρωση. Το νερό παρέχεται κατευθείαν από την πηγή τροφοδοσίας ή από δεξαμενή εξισορρόπησης. Γενικά εγκαθίστανται δύο παράλληλες αντλίες τροφοδοσίας, μία σε λειτουργία και μία εφεδρική.

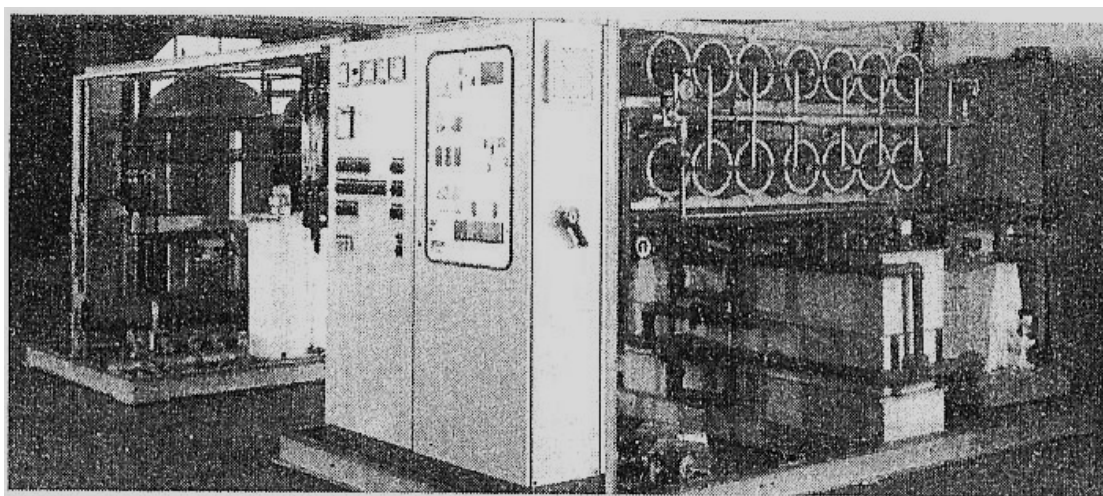
- Αντλία υψηλής πίεσης

Το νερό από την αντλία χαμηλής πίεσης καταλήγει στην αντλία υψηλής πίεσης. Η εν λόγω αντλία υψηλής πίεσης ρυθμίζεται συνήθως μέσω εμβόλων τριών ή περισσότερων εμβόλων. Το υλικό των εμβόλων είναι συνήθως ανοξείδωτος χάλυβας και ειδικό κεραμικό υλικό, ώστε να μειωθεί το βάρος της. Το νερό τροφοδοσίας αφού διοχετευτεί στην αντλία υψηλής πίεσης, μεταφέρεται στα στοιχεία αντίστροφης ώσμωσης που βρίσκονται στα δοχεία πίεσης.

- Στοιχεία αντίστροφης ώσμωσης

Οι συστοιχίες όπως προαναφέρθηκε αποτελούνται από ειδικά δοχεία πίεσης που αποτελούνται από 1-7 στοιχεία μεμβρανών σε σειρά. Σημαντικό ρόλο έχει ο έλεγχος της ποιότητας παραγωγής κάθε μεμβράνης, ο οποίος πραγματοποιείται με ειδικό σωλήνα που βρίσκεται εσωτερικά των μεμβρανών. Η διάταξη των στοιχείων (δοχείο πίεσης και στοιχεία μεμβρανών) μπορεί να γίνει με παράλληλο τρόπο δημιουργώντας μία ή περισσότερες συστοιχίες. Από το ένα άκρο της συστοιχίας εισέρχεται το νερό προς επεξεργασία σε κάθε στοιχείο, ενώ από το άλλο άκρο εξέρχονται το καθαρό νερό και τα διαχωρισμένα συστατικά. Είναι εφικτό να γίνεται ανάκληση του τελικού νερού, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερο ποσοστό ανάκτησης. Ειδική βάνα στραγγαλισμού ρυθμίζει την πίεση λειτουργίας στην έξοδο της γραμμής της άλμης. Όλα τα άλλα υποσυστήματα των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης

πρέπει να εξασφαλίζουν ότι οι μεμβράνες λειτουργούν σε βέλτιστες συνθήκες (πίεσης, αλμυρότητας και ροής) και για αυτό το λόγο υπάρχουν τα συστήματα αυτομάτου ξεπλύματος που αποτελούν και τη μονάδα χημικού καθαρισμού. Το σύστημα αυτό συγκροτείται από μία δεξαμενή επαρκούς χωρητικότητας, κατασκευασμένη από πολυαιθυλένιο, μία ανοξείδωτη αντλία και σύστημα σωληνώσεων και αυτόματων βαλβίδων για την υδραυλική εναλλαγή στη γραμμή αναρρόφησης της αντλίας υψηλής πίεσης. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η παροχή καθαρού νερού κάθε φορά που σταματά η διαδικασία ώστε οι μεμβράνες να παραμένουν καθαρές και αποδοτικές.



**Εικόνα 1.6.3.2.1 :** Απεικόνιση μοντέλου συσκευής αντιστρεπτής ώσμωσης με ενσωματωμένο σύστημα προ-επεξεργασίας του νερού (Αλεξάκης Α., 2003).

### **1.6.3.3 Σύστημα μετ-επεξεργασίας**

Το νερό που προέρχεται από την επεξεργασία μέσω των μεμβρανών της αντίστροφης ώσμωσης έχει σε γενικές γραμμές πολύ μικρή σκληρότητα και σχετικώς χαμηλό pH με ισχυρά διαβρωτικές ιδιότητες (Duranceau S., 2009). Επομένως υφίσταται κάποιες επεξεργασίες ώστε να καταστεί κατάλληλο για κατανάλωση. Το σύστημα μετ-επεξεργασίας περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

Ρύθμιση pH: Στόχος είναι να αυξηθεί η τιμή του pH, με προσθήκη υδροξειδίου του νατρίου ή όξινου ανθρακικού νατρίου. Οι συγκεντρώσεις των



χημικών ουσιών εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του pH του παραγόμενου νερού και την επιθυμητή τιμή. Η μεγάλη οξύτητα δημιουργεί μεγάλο πρόβλημα στις σωληνώσεις που αποτελούνται από απλό, γαλβανισμένο ή ακόμα και ανοξείδωτο χάλυβα. Έτσι παράλληλα με τη χρήση των παραπάνω χημικών ουσιών, προστίθεται αντιδιαβρωτικό όπως είναι διάφορες πολυφωσφωρικές ενώσεις.

Ρύθμιση σκληρότητας: οι τιμές της σκληρότητας μπορεί να αυξηθούν με την προσθήκη  $\text{CaCl}_2$  και  $\text{MgCl}_2$  που παρέχονται με τη βοήθεια τροφοδοτικής αντλίας ή ακόμα διαμέσου ειδικών στηλών.

Χλωρίωση: Η χλωρίωση του νερού εκτελείται χρησιμοποιώντας υποχλωριώδες νάτριο, εξασφαλίζοντας ότι τα όρια του υπολειπόμενου χλωρίου στο πόσιμο νερό δεν ξεπερνούν τα 0.2 ppm.

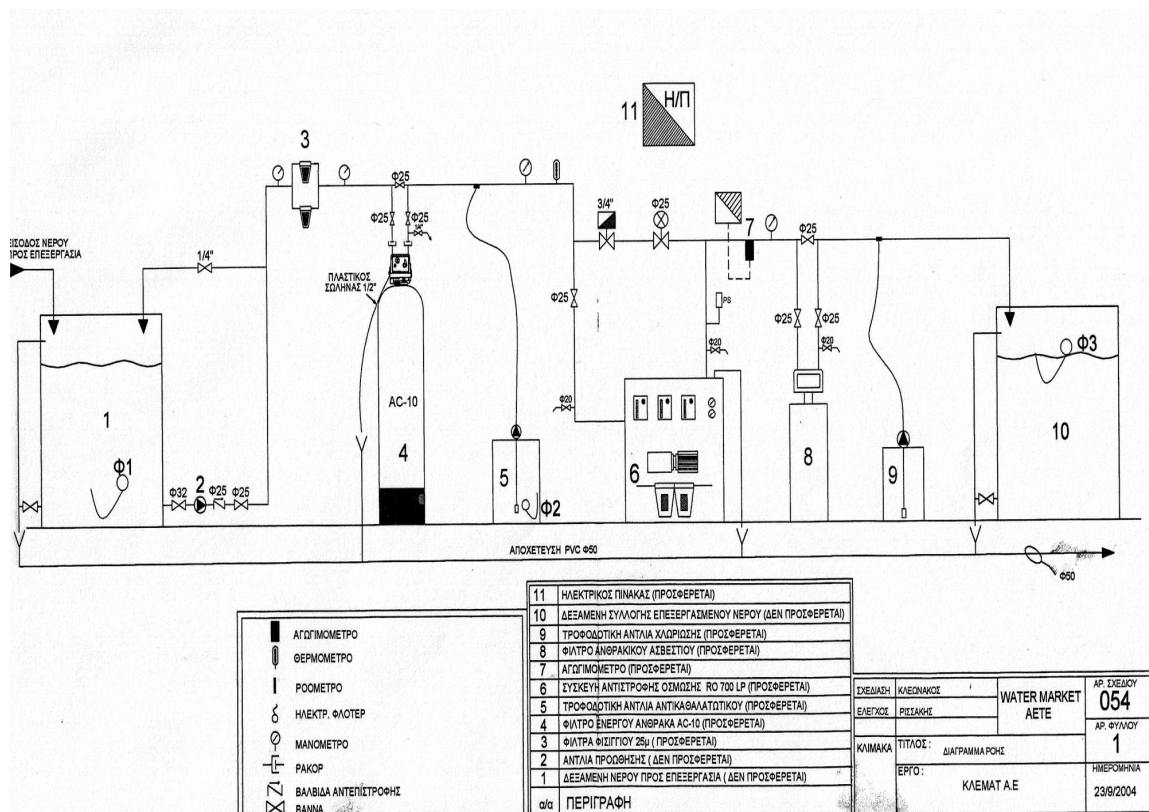
## 2. Πειραματικό μέρος

### 2.1 Σκοπός

Η παρούσα διπλωματική εργασία σαν στόχο έχει να μελετήσει τις αναλυτικές μεθόδους και τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ποιότητας του νερού, που προέρχεται από πιλοτική μονάδα αντίστροφης ώσμωσης.

Στη σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου είναι εγκατεστημένη μονάδα αντίστροφης ώσμωσης, του οίκου Gulligan. Η μονάδα αυτή παρέχει νερό υψηλής καθαρότητας, εφάμιλλης ποιότητας με του απιονισμένου νερού, χρησιμοποιώντας νερό γεώτρησης. Η μονάδα αυτή έχει μεγάλη απόδοση, αφού η απόρριψη άλατος προσεγγίζει το 99%. Η ποσότητα του νερού, που τελικώς απορρίπτεται φτάνει το 25-50% του νερού παροχής, και το νερό που είναι απαλλαγμένο από άλατα και ακαθαρσίες είναι το 50-75% του παρεχόμενου νερού τροφοδοσίας.

Αυτή η μονάδα αποτελείται από πολλές υπομονάδες, η οποίες διασφαλίζουν την ποιότητα του παραγόμενου νερού (εικόνα 2.1.1). Είναι πολλές οι παράμετροι που πρέπει να ρυθμίζονται και να ελέγχονται ταυτόχρονα, ώστε η απόδοση του συστήματος να είναι μέγιστη. Στις παρακάτω ενότητες θα δοθεί έμφαση στα επιμέρους στάδια του συστήματος της μονάδας της αντίστροφης ώσμωσης και θα γίνει λεπτομερής περιγραφή του συστήματος.



Εικόνα 2.1.1 : Μονάδα αντίστροφης ώσμωσης, του οίκου Gulligan.

## 2.2 Υλικά και μέθοδοι ανάλυσης

### 2.2.1 Δειγματοληψία

#### 2.2.1.1 Βασικοί κανόνες δειγματοληψίας

Η συλλογή των δειγμάτων είναι μια βασική προϋπόθεση και για την πραγματοποίηση της τηρήθηκαν κάποιοι κανόνες δειγματοληψίας. Σύμφωνα με αυτούς τους κανόνες το δείγμα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό, καθώς και όλα τα δείγματα που θα συλλεχθούν να βρίσκονται υπό τις ίδιες συνθήκες ανάλογα με τη μέτρηση που θα χρησιμοποιηθεί. Η συλλογή και η μεταφορά των δειγμάτων στο εργαστήριο πρέπει να συντελείται με τέτοιο τρόπο που να μην υπάρξει αλλοίωση του δείγματος, αλλά διατήρηση των χαρακτηριστικών του δείγματος. Τα δοχεία στα οποία θα συγκεντρωθεί το δείγμα πρέπει να είναι απολύτως καθαρά. Πάνω στο δοχείο αυτό πρέπει να υπάρχουν ενδεικτικά στοιχεία σχετικά με την ταυτοποίηση ή αναγνώριση του. Αυτά τα

στοιχεία αφορούν συνήθως ημερομηνία, ώρα, ακριβή τοποθεσία, θερμοκρασία νερού, συμπεριλαμβανομένων των πληροφοριών που σχετίζονται και απαιτούνται για τη μέτρηση, όπως καιρικές συνθήκες, στάθμη νερού, βάθος, ύπαρξη ρευμάτων κλπ. Διαφορετικά είναι δυνατόν το δοχείο να επισημανθεί με ένα αντιπροσωπευτικό αριθμό που θα αντιστοιχεί στην αναγνώριση του δείγματος σύμφωνα με συγκεντρωτικά στοιχεία σε ειδικά δελτία-σημειώσεις δειγματοληψίας. Η συλλογή των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε κατά τους θερινούς μήνες και η θερμοκρασία ήταν γύρω στους 23° C.

### **Νερό γεώτρησης**

Αρχικά η συλλογή του νερού γεώτρησης πραγματοποιείται ανοίγοντας τη βάνα και να τρέξει το νερό για 2-3 λεπτά. Με αυτό τον τρόπο, απομακρύνεται τόση ποσότητα νερού, απαραίτητη για να καθαρίσει τον σωλήνα από το στάσιμο νερό και να απομακρύνει όλα τα ιζήματα και τα εγκλωβισμένα αέρια. Έπειτα, ρυθμίζουμε την παροχή της βρύσης τουλάχιστον σε 0,5 L/min. Τέλος για τη συλλογή του δείγματος μας, το δοχείο τοποθετείται κάτω από τη βρύση και το δείγμα συλλέγεται, αφού ο όγκος του νερού στο δοχείο έχει υπερχειλίσει σε όγκο ίσο με τον όγκο του δοχείου δειγματοληψίας (Ζανάκη Κ., 1996). Το νερό αυτό προέρχεται από γεώτρηση που υπάρχει στο χώρο του πολυτεχνείου και εξυπηρετεί δευτερεύουσες ανάγκες. Το νερό γεώτρησης εισάγεται στο σύστημα της αντίστροφης ώσμωσης από την μια είσοδο, που διαθέτει το σύστημα.

### **Νερό αντίστροφης ώσμωσης**

Το νερό αντίστροφης ώσμωσης είναι το νερό που προέρχεται από τη πιλοτική μονάδα αντίστροφης ώσμωσης. Το νερό συλλέγεται σε δοχείο από τη δεξαμενή συλλογής επεξεργασμένου νερού. Το σύστημα διαθέτει δυο εξόδους. Η μία έξοδος επιτρέπει τη συλλογή του επεξεργασμένου νερού, του νερού της αντίστροφης ώσμωσης.

## Νερό απόβλητο

Το νερό απόβλητο αφορά το νερό που συλλέγεται από τη δεύτερη έξοδο του συστήματος της αντίστροφης ώσμωσης. Είναι όπως αναφέρει και ο τίτλος το απόβλητο νερό που προέρχεται από την επεξεργασία του νερού από τη μονάδα αντίστροφης ώσμωσης και ουσιαστικά στις περισσότερες περιπτώσεις θα είναι επιβαρυσμένο με ανεπιθύμητες ουσίες.

### 2.2.1.2 Συντήρηση δειγμάτων

Τα δείγματα δεν ήταν δυνατόν να αναλυθούν την ίδια μέρα αμέσως μετά τη διαδικασία της δειγματοληψίας. Συνεπώς ήταν απαραίτητη η συντήρηση των δειγμάτων μέχρι τη στιγμή της ανάλυσης, ώστε να αποφευχθεί η ενδεχόμενη αλλοίωση των χημικών χαρακτηριστικών τους. Σε σχέση με την παράμετρο που μελετάται, προστίθεται και το κατάλληλο συντηρητικό στο προς ανάλυση δείγμα νερού.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συνοπτικός πίνακας που περιλαμβάνει τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν σε σχέση με την παράμετρο που μελετάται.

Παράμετρος Όργανο μέτρησης	Αγωγιμόμετρο	Φασματο- φωτομετρο	Αυτόματος Τιτλοδότης	Ανακλασίμετρο
pH	+		+	
Ολική σκληρότητα			+	+
TDS (Total Dissolved Solid)	+			
Αγωγιμότητα	+			
Αλατότητα	+			
NO <sup>3-</sup>		+		+
NO <sup>2-</sup>		+		+
Cl <sup>-</sup>		+	+	+
Cl <sup>2</sup> ελεύθερα		+		+
Cl <sup>2</sup> ολικά		+		+
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>		+		
K <sup>+</sup>		+		+
Na <sup>+</sup>				+
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>				+
Ca <sup>+2</sup>				+
Mg <sup>+2</sup>				+
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>				+
COD		+		
TOC		+		

Πίνακας 2.1: Μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της κάθε παραμέτρου.

## 2.2.2 Θολερόμετρο

Η νεφελομετρία ή αλλιώς νεφελομετρική μέθοδος είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για την μέτρηση της θολερότητας. Αποτελεί μια από της πλέον εξελιγμένες μεθόδους, η οποία διακρίνεται για την ακρίβειά της στον τρόπο προσδιορισμού θολερότητας σε ιδιαίτερα χαμηλές τιμές.

Νεφελόμετρα ή αλλιώς θολερόμετρα ονομάζονται τα όργανα που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της θολερότητας σε δείγματα υγρών. Για τα πειράματα μας χρησιμοποιήθηκε το φορητό θολερόμετρο turbiquant 1100 IR (εικόνα 2.2.2.1).



Εικόνα 2.2.2.1: Θολερόμετρο turbiquant 1100 R.

Συνοπτικά έγινε η χρήση των παρακάτω οργάνων και υλικών:

- θολερόμετρο turbiquant 1100 IR
- ογκομετρικές φιάλες 100 mL
- δείγματα νερού προς ανάλυση θολερότητας
- αποσταγμένο νερό (με θολερότητα μηδέν)
- μητρικό αιώρημα φορμαζίνης
- πρότυπα διαλύματα πολυμερών φορμαζίνης

Πρώτα από όλα παρασκευάζουμε το μητρικό αιώρημα φορμαζίνης το οποίο είναι απαραίτητο για την παρασκευή των πρότυπων διαλυμάτων. Για την παρασκευή του πρώτου διαλύματος διαλύουμε σε αποσταγμένο νερό, μέσα σε μία ογκομετρική φιάλη των 100mL, 1g θειικής υδραζίνης  $(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{SO}_4$ . Για την παρασκευή του δεύτερου διαλύματος διαλύουμε σε

αποσταγμένο νερό σε μια δεύτερη ογκομετρική φιάλη των 100mL, 10gr εξαμεθυλενοτετραμίνης (CH<sub>2</sub>)<sub>6</sub>N<sub>4</sub>.

Στην συνέχεια παίρνουμε μια ογκομετρική φιάλη των 100mL και προσθέτουμε 5mL από το πρώτο διάλυμα και 5mL από το δεύτερο. Το διάλυμα που προκύπτει το αφήνουμε για 24 ώρες σε θερμοκρασία 25°C +/- 3°C και έπειτα το αραιώνουμε με απεσταγμένο νερό μέχρι την χαραγή της φιάλης. Από αυτή την διαδικασία προκύπτει ένα μητρικό αιώρημα του οποίου η θολερότητα είναι 400 NTU. Το μητρικό αιώρημα πρέπει να ανανεώνεται μία φορά τον μήνα.

Κατόπιν πρέπει να παρασκευαστούν τα πρότυπα διαλύματα πολυμερών φορμαζίνης. Τα διαλύματα αυτά τα χρησιμοποιούμε προκειμένου να προχωρήσουμε στην βαθμονόμηση του οργάνου που χρησιμοποιούμε.

Για την παρασκευή διαλύματος πολυμερών φορμαζίνης γνωστής θολερότητας, 40 NTU, αραιώνονται 10mL από το μητρικό αιώρημα με προσθήκη νερού μηδενικής θολερότητας μέχρι να δημιουργήσουμε 100 mL διαλύματος. Με παρόμοιο τρόπο μπορούμε να παρασκευάσουμε εύκολα διαλύματα με διάφορες τιμές θολερότητας. Τα διαλύματα αυτά πρέπει να ανανεώνονται μία φορά την εβδομάδα.

Τις περισσότερες φορές τα σύγχρονα θολερόμετρα συνοδεύονται από τον παρασκευαστή τους από πρότυπα διαλύματα φορμαζίνης με γνωστές τιμές θολερότητας, για να είναι πιο εύκολη η βαθμονόμηση των οργάνων. Τα θολερόμετρα συνοδεύονται επίσης από κλίμακες ανάγνωσης θολερότητας οι οποίες διαχωρίζονται μεταξύ τους και έχουν τις τιμές: 0-0,2, 0-1, 0-10, 0-100, 0-1000.

Στη συνέχεια γίνεται οπτικός έλεγχος των προς μέτρηση δειγμάτων με τα διατιθέμενα πρότυπα διαλύματα πολυμερών φορμαζίνης. Επιλέγονται αυτά που βρίσκονται κοντά στην περιοχή που θέλουμε να μελετήσουμε και ξεκινάμε την μέτρηση. Τα αποτελέσματα που παίρνουμε πρέπει να συμπίπτουν με τις τιμές του παρασκευαστή. Αφού γίνει η βαθμονόμηση, τα δείγματα τοποθετούνται στις καλά σκουπισμένες κυψελίδες του θολερόμετρου για να γίνει η μέτρηση. Τα δείγματα πριν την μέτρηση δεν πρέπει να έχουν φυσαλίδες από αέρα.

### 2.2.3 Αγωγιμόμετρο

Η αγωγιμότητα, για τα διαλύματα ηλεκτρολυτών, χρησιμοποιείται ως όρος για να περιγράψουμε το πόσο εύκολα ή δύσκολα γίνεται η διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος εσωτερικά του διαλύματος. Η κίνηση του ρεύματος αποδίδεται στις κινήσεις των ιόντων εσωτερικά της μάζας του διαλύματος. Κάθε διάλυμα παρουσιάζει διαφορετική αγωγιμότητα. Κάθε διάλυμα παρουσιάζει διαφορετική αγωγιμότητα, η οποία εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες σύμφωνα με τον τύπο:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

R: ηλεκτρική αντίσταση (ohm)

A: μήκος διέλευσης ηλεκτρικού ρεύματος (cm), S διατομή αγωγού (cm<sup>2</sup>)

ρ: ειδική αντίσταση (ohm<sup>-1</sup> cm)

Το αγωγιμόμετρο (εικόνα 2.2.3.1) λειτουργεί με τον εξής τρόπο:

- Επιλογή ενός προτύπου - Βαθμονόηση

Αρχικά θα πρέπει να γίνει επιλογή του κατάλληλου προγράμματος για την εκτέλεση της μέτρησης. Πιέζουμε το κουμπί Setup (FE30) ή πιέζουμε και κρατάμε πατημένο το Mode / πλήκτρο Setup (FG3) μέχρι το εικονίδιο εγκατάστασης να εμφανιστεί στην οθόνη και το ισχύον πρότυπο αναβοσβήνει. Χρησιμοποιώντας τα βελάκια ▲ και ▼ επιλέγετε το κατάλληλο πρότυπο και πατάμε το READ για να επιβεβαιώσουμε την επιλογή μας. Πατάμε Exit να εγκαταλείψουμε τις ρυθμίσεις λειτουργίας. Στο αγωγιμόμετρο οι πίνακες για την αυτόματη ρύθμιση της θερμοκρασίας εξαρτώνται από το πρότυπο.

Τα τρία προκαθορισμένα πρότυπα είναι τα εξής:

- 84 μS / cm, 1 413μS/cm, 1 2.88 μS / cm.



- Εκτέλεση βαθμονόμησης

Ρυθμίζουμε το αγωγιμόμετρο στις καθορισμένες τιμές προτύπου βαθμονόμησης και πατάμε Cal. Θα εμφανιστούν στην οθόνη οι σχετικές ενδείξεις που θα χρησιμοποιηθούν στη μέτρηση. Το εικονίδιο βαθμονόμησης και το εικονίδιο της μέτρησης εμφανίζονται στην οθόνη, η τιμή της θερμοκρασίας κτλ. Εάν θέλουμε να εγκαταλείψουμε τη μέτρηση πατάμε EXIT. οθόνη μέτρησης.

Σημείωση:

Για να εξασφαλιστεί η πιο ακριβής μέτρηση αγωγιμότητας, θα πρέπει να ελέγχονται οι σταθερές με ένα πρότυπο διάλυμα μία φορά την ημέρα και να βαθμονομούνται εάν είναι απαραίτητο, χρησιμοποιώντας πάντα φρέσκα πρότυπα.

- Μέτρηση του δείγματος

Τοποθετούμε τον αισθητήρα αγωγιμότητας στο δείγμα και πατάμε READ για να ξεκινήσει η μέτρηση: το εικονίδιο μέτρησης εμφανίζεται στην οθόνη και αναβοσβήνει το δεκαδικό σημείο. Η οθόνη δείχνει την αγωγιμότητα του δείγματος. Το αυτόματο τελικό σημείο A είναι η προεπιλεγμένη ρύθμιση του μετρητή. Όταν το σήμα έχει σταθεροποιηθεί, η οθόνη παγώνει αυτόματα, και εμφανίζεται  $\overline{A}$ . Πατώντας και κρατώντας πατημένο το READ, μπορούμε να πραγματοποιήσουμε εναλλαγή μεταξύ της αυτόματης και χειροκίνητης λειτουργίας.

Η σταθερότητα αποτελεί κριτήριο για τη μέτρηση της αγωγιμότητας. Το εσωτερικό σήμα του αισθητήρα του μετρητή μπορεί να μην αλλάξει κατά περισσότερο από 0,4% από τη μέση μετρούμενη αγωγιμότητα του ελεγχόμενου μέσα σε 6 δευτερόλεπτα.



**Εικόνα 2.2.3.1:** Αγωγιμόμετρο τύπου mettler toledo

#### **2.2.4 Ανακλασίμετρο (Reflectometer)**

Το ανακλασίμετρο χρησιμεύει στον ποσοτικό προσδιορισμό διαφορετικών ουσιών (Αλουμίνιο, αμμώνιο, άργυρος, ασβέστιο, ασκορβικό οξύ, γλυκόζη, θειώδη, κάλιο, κοβάλτιο, μαγγάνιο, μολυβδαίνιο, μόλυβδος, νικέλιο, νιτρικά, νιτρώδη, pH, σίδηρος, υπεροξειδία, φωσφορικά, χαλκός, χλώριο, χρωμικά, ψευδάργυρος, κ.λ.π.).

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του είναι η αποθήκευση των δεδομένων από παλαιότερες μετρήσεις, ακόμα και η εξαγωγή του μέσου όρου τους, προσδίδοντας με αυτό τον τρόπο μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό εξαιτίας της τεχνικής της «οπτικής διπλής ακτίνας», η οποία εφαρμόζεται ξεχωριστά για κάθε παρτίδα και επιτυγχάνει τη μέτρηση δυο ζωνών αντίδρασης. Επιπλέον επιτρέπει την ταυτόχρονη ποσοτική μέτρηση δυο παραμέτρων, όπως π.χ. το χλώριο και το pH.

Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει τα strips ανάλυσης και την ταινία-Barcode (εικόνα 2.2.4.1). Τα strips ανάλυσης πραγματοποιούν τους

ποσοτικούς προσδιορισμούς με βάση τα αποθηκευμένα προγράμματα και εμφανίζουν μεγάλη ευκολία στη χρήση τους. Χάρη στα αυτά υπολογίζονται

ποσοτικά ουσίες διαφορετικών συγκεντρώσεων. Τα strips αποτελούνται από ένα βιολογικά αποικοδομούμενο φιλμ πολυεστέρα, το οποίο δεν χρειάζεται ειδική μεταχείριση. Η ταινία Barcode βοηθά στην βαθμονόμηση (calibration) και τον προγραμματισμό του οργάνου, εξασφαλίζοντας μέτρηση υψηλής ακρίβειας. Η ταινία Barcode είναι υπεύθυνη για την καταχώριση των διαφόρων παραμέτρων και ρυθμίσεων της παρτίδας, την εισαγωγή του αριθμού της παρτίδας, καθώς και την καταχώριση των χρόνων αντίδρασης.

Η διαδικασία που ακολουθείται για τη μέτρηση είναι η εξής: Αρχικά μέσω της ταινίας Barcode ρυθμίζονται οι επιθυμητές παράμετροι (μέχρι 5 παράμετροι μπορούν να είναι ταυτόχρονα αποθηκευμένες). Στη συνέχεια, εμβαπτίζεται το strip στο προς ανάλυση δείγμα και έπειτα εισάγεται στο όργανο. Τέλος επιλέγεται η μέτρηση από το πληκτρολόγιο.

Ωστόσο εκτός από τη χρήση των ταινιών (strips), το ανακλασίμετρο πραγματοποιεί τις μετρήσεις και μη τη χρήση των κυψελίδων. Ανάλογα με το προς εξέταση δείγμα επιλεγόταν η κατάλληλη μέθοδος και τα κατάλληλα αντιδραστήρια για την εκτέλεση της μέτρησης. Χρησιμοποιούνταν 2 κυψελίδες. Η μία περιείχε μόνο απιονισμένο νερό και χρησιμοποιούνταν για τον τυφλό προσδιορισμό και η άλλη περιείχε το δείγμα. Το δείγμα ήταν αναμειγμένο με διάφορα αντιδραστήρια που διευκόλυναν τον προσδιορισμό των ουσιών. Η τοποθέτηση των κυψελίδων και των ταινιών διευκολύνεται με τη χρήση του (adapter).



**Εικόνα 2.2.4.1:** Ανακλασίμετρο τύπου RQflex plus 10 της Merck.

## 2.2.5 Αυτόματος Τιτλοδότης

Η χρήση της αυτόματης τιτλοδότησης διαλυμάτων, όξινα ή βασικά, αποτελεί μια μέθοδο με πολλά πλεονεκτήματα. Με την εφαρμογή του αυτόματου τιτλοδότη (εικόνα 2.2.5.1) πετυχαίνουμε γρηγορότερες αναλύσεις με χαρακτηριστική ακρίβεια και ιδιαίτερη επαναληψιμότητα. Αποτελείται από μία αυτόματη προχοΐδα με την οποία γίνεται η εισαγωγή του πρότυπου διαλύματος. Η ροή του γίνεται στάγδην με σταθερό ρυθμό. Ακόμα, η συσκευή διαθέτει έναν ειδικό αισθητήρα που καταλήγει στην φιάλη όπου βρίσκεται το διάλυμα ώστε να γίνεται έλεγχος της αλλαγής των τιμών pH του διαλύματος μετά την εισαγωγή πρότυπου διαλύματος. Η τιτλοδότηση συνεχίζεται αυτόματα μέχρι την μεταβολή του χρώματος του διαλύματος, λόγω του δείκτη. Με αυτό τον τρόπο προσδιορίζεται εύκολα και με ακρίβεια το τελικό σημείο και γνωρίζουμε πόση ποσότητα πρότυπου διαλύματος απαιτήθηκε.



**Εικόνα 2.2.5.1:** Αυτόματος τιτλοδότης

Ο αυτόματος τιτλοδότης αποτελείται από το μηχανικό το ηλεκτρονικό μέρος και τον εκτυπωτή. Το μηχανικό μέρος διακρίνεται στο δεξί τμήμα της φωτογραφίας, και αποτελείται από την δοσιμετρική αντλία μεγάλης ακρίβειας, τον αναδευτήρα, το ηλεκτρόδιο redox, και το ακροφύσιο εκροής (dispenser), μέσω του οποίου γίνεται η προσθήκη του τιτλοδότη στο προς ανάλυση διάλυμα.

Το ηλεκτρονικό μέρος (controller) ελέγχει την αντλία και δέχεται ηλεκτρικά σήματα. Το ηλεκτρόδιο redox στέλνει κατά τη διάρκεια της μέτρησης ηλεκτρικό σήμα προς το ηλεκτρονικό μέρος της συσκευής – controller (στο αριστερό μέρος της φωτογραφίας) το οποίο το επεξεργάζεται ανάλογα με τις

ρυθμίσεις που έχουν γίνει από το χρήστη, και εκτυπώνει τα αποτελέσματα. Ηλεκτρικό σήμα προς το ηλεκτρονικό μέρος της συσκευής δίνει και η μηχανική αντλία, όσον αφορά τον όγκο που προστίθεται στον αναλύτη.

Ο συνδυασμός των δύο σημάτων δηλαδή του όγκου και του σήματος αποτυπώνονται στην οθόνη του controller και ταυτόχρονα στον ενσωματωμένο εκτυπωτή – printer, ο οποίος λειτουργεί με θερμικό χαρτί εκτύπωσης.

Με τον αυτόματο τιτλοδότη πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις της συγκέντρωσης των χλωριόντων και της σκληρότητας. Πριν τη μέτρηση ήταν απαραίτητη η βαθμόνηση του οργάνου. Για τη βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκαν δυο πρότυπα διαλύματα με pH 4 και 7 αντίστοιχα.

### **2.2.6 Φασματοφωτόμετρα απλής δέσμης για την περιοχή ορατού-υπεριώδους**

Διάφοροι κατασκευαστές οργάνων προσφέρουν σήμερα μη καταγραφικά φασματοφωτόμετρα απλής δέσμης, χρήσιμα για μετρήσεις στην υπεριώδη και στην ορατή περιοχή. Η κατώτερη χρήσιμη περιοχή μήκους κύματος για τα όργανα αυτά κυμαίνεται από 190 έως 210 nm και η ανώτερη από 800 έως 1000 nm. Όλα διαθέτουν εναλλασόμενες λυχνίες βολφραμίου και υδρογόνου ή δευτερίου. Τα περισσότερα διαθέτουν φωτοπολλαπλασιαστές ως μεταλλάκτες και μονοχρωμάτορες για διασπορά και επιλογή της ακτινοβολίας. Μερικά από τα όργανα είναι εξοπλισμένα με ψηφιακά συστήματα ανάγνωσης και αλλά έχουν μεγάλα αναλογικά όργανα βελόνας. Το κόστος τους βρίσκεται στην περιοχή των 2000 έως 8000 €.

Όπως αναμένεται, οι προδιαγραφές ποικίλουν σημαντικά από όργανο σε όργανο και εξαρτώνται ως ένα βαθμό, από την τιμή του οργάνου. Τυπικές περιοχές εύρους φασματικής ζώνης είναι 2 έως 8 nm και αναφέρεται ακρίβεια επιλογής μήκους κύματος +/- 0,5 έως +/- 2 nm.

Ένας κατασκευαστής χρησιμοποιεί ένα κοίλο, αντί για επίπεδο οπτικό φράγμα, απλουστεύοντας έτσι τον σχεδιασμό και μικραίνοντας τις διαστάσεις του οργάνου. Τελευταία στην αγορά έχει αρχίσει η εμφάνιση ολογραφικών οπτικών φραγμάτων.

Φασματοφωτόμετρα απλής δέσμης υποστηριζόμενα από υπολογιστή. Ένας κατασκευαστικός οίκος προσφέρει τώρα μια σειρά από φασματοφωτόμετρα απλής δέσμης, που λειτουργούν στην περιοχή 190 έως 800 nm (ή 900 nm με χρήση συμπληρωματικών εξαρτημάτων). Τα όργανα αυτά διαθέτουν σύστημα καταγραφής του φάσματος και υποστηρίζονται από υπολογιστή. Με τα όργανα αυτά στην αρχή πραγματοποιείται μια σάρωση μήκους κύματος με το πρότυπο διάλυμα στην πορεία της δέσμης. Το αναλυτικό σήμα στην έξοδο του μεταλλάκτη, ψηφιοποιείται σε πραγματικό χρόνο και αποθηκεύεται στην μνήμη του υπολογιστή. Στην συνέχεια σαρώνονται με τον ίδιο τρόπο τα δείγματα και υπολογίζονται οι απορροφήσεις με την βοήθεια των δεδομένων του προτύπου διαλύματος, που έχουν αποθηκευτεί στον υπολογιστή. Το φάσμα εμφανίζεται στην οθόνη σε 2 sec από τη στιγμή της συλλογής των δεδομένων. Με τα όργανα αυτά είναι δυνατές ταχύτητες σάρωσης μεγαλύτερες από 1200 nm/min. Ο υπολογιστής του οργάνου παρέχει διάφορες επιλογές ως προς την επεξεργασία και την παρουσίαση. Έτσι, μπορεί να παρουσιαστεί το φάσμα ως  $\log A$  ή  $T$  (ως προς  $\lambda$ ), μπορούν να παρουσιαστούν παράγωγοι του φάσματος, μπορούν να παραβληθούν φάσματα, να πραγματοποιηθούν πολλαπλές σαρώσεις, να υπολογιστούν συγκεντρώσεις και να προσδιοριστεί η θέση και το ύψος των κορυφών. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα κινητικών μετρήσεων (Skoog et al., 2002).

Όπως τονίσθηκε προηγουμένως, στα πλεονεκτήματα των οργάνων απλής δέσμης περιλαμβάνεται η ισχυρότερη ακτινοβολία, ο καλύτερος λόγος σήματος-προς-θόρυβο και οι απλοί και εύχρηστοι χώροι τοποθέτησης των δειγμάτων. Αντίθετα, η διαδικασία καταγραφής του σήματος του μεταλλάκτη για την κυψελίδα αναφοράς και στην συνέχεια και για την κυψελίδα δείγματος (ώστε στη συνέχεια να υπολογιστούν οι απορροφήσεις ή οι διαπερατότητες) δεν είναι ικανοποιητική, λόγω της ολίσθησης και του θορύβου flicker της πηγής και του μεταλλάκτη. Ο κατασκευαστής αυτών των οργάνων απλής δέσμης ισχυρίζεται, ότι έχει εξαλείψει τις αστάθειες αυτές με τη χρήση μιας νέας πηγής και ενός νέου ηλεκτρονικού σχεδιασμού, που εξαφανίζει τα αποτελέσματα της υστέρησης και μνήμης του οπτικού μεταλλάκτη.

Η φωτομετρική ακρίβεια των νέων οργάνων αναφέρεται ως +/- 0,005 A ή +/- 0,3% T με ολίσθηση μικρότερη από 0,002 A/ώρα. Τα Εύρη ζώνης είναι 0,5, 1 και 2 nm και μπορούν να επιλεγούν χειροκίνητα από τον χειριστή.

Για να θέσουμε σε λειτουργία το φωτόμετρο της MERCK πρώτα ανοίγουμε το καπάκι. Ύστερα από έναν γρήγορο έλεγχο που πραγματοποιεί το όργανο στο σύστημα, διαλέγει την επιλογή για τον αυτόματο υπολογισμό της συγκέντρωσης (concentration). Στην συνέχεια το φωτόμετρο μας ζητά να τοποθετήσουμε τις κυψελίδες για να ξεκινήσει. Πρώτα τοποθετούμε την κυψελίδα αναγνώρισης στον ειδικό υποδοχέα και το όργανο γίνεται ταυτοποιείται το τεστ που έχει επιλεγεί. Η κυψελίδα αναγνώρισης φέρει μια κάθετη γραμμή, η οποία τοποθετείται με τρόπο ώστε να κοιτάει την εγκοπή που έχει το όργανο. Η κυψελίδα που χρησιμοποιούμε για το δείγμα έχει πάχος 10 mm και είναι ορθογώνιου σχήματος κατασκευασμένη από χαλαζία. Η κυψελίδα αυτή αφού καθαριστεί καλά πηγαίνει στον υποδοχέα των ορθογώνιων κυψελίδων του έχει το όργανο. Μετά την τοποθέτηση το φωτόμετρο αρχίζει την μέτρηση και στην οθόνη διακρίνουμε το αποτέλεσμα. Τα δείγματα που είναι θολά πρέπει πρώτα να γίνεται διήθηση τους, ενώ όταν περιέχουν χλωριόντα με τιμή μεγαλύτερη της 1000 mg/lit πρέπει να γίνεται αραίωση τους με χρήση απιονισμένου νερού. Για να είναι πιο έγκυρα τα αποτελέσματα καλό είναι η μέτρηση να ακολουθεί σε μικρό χρονικό διάστημα την δειγματοληψία. Τα φασματοφωτόμετρο χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των θρεπτικών αλάτων ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Cl}_2$  ελεύθερο,  $\text{Cl}_2$  ολικό,  $\text{SO}_4^{-2}$  και  $\text{K}^+$ ).

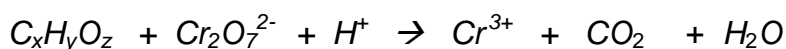
### 2.2.7 Θερμοαντιδραστήρας

Ο θερμοαντιδραστήρας είναι το όργανο, το οποίο είναι υπεύθυνο για την προετοιμασία των δειγμάτων για τον προσδιορισμό COD, TOC, συνολικού περιεχομένου σε κάδμιο, χρώμιο, κυάνιο, σίδηρο, μόλυβδο, νικέλιο, άζωτο, φώσφορο, άργυρο ή ψευδάργυρο. Είναι της εταιρείας Merck, μοντέλο 171200.

Διαθέτει 12 θέσεις για προετοιμασία των δειγμάτων και 7 προεγκατεστημένα προγράμματα:: 148 °C (20, 120 λεπτά), 150 °C (120 λεπτά), 120 °C (30, 60, 120 λεπτά), 100 °C (60 λεπτά).

## 2.2.8 Μέτρηση Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (COD)

Η έννοια του COD (Chemical Oxygen Demand) αναφέρεται ουσιαστικά στην απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου, ώστε να πραγματοποιηθεί χημική οξείδωση της οργανικής ύλης σε CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O. Η αντίδραση της οξείδωσης λαμβάνει χώρα παρουσίας ισχυρού οξειδωτικού μέσου σε όξινο περιβάλλον και με την επικράτηση υψηλών θερμοκρασιών. Συνήθως το μέσο αποτελεί το διχρωμικό κάλιο (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>), ενώ σαν καταλύτης χρησιμοποιείται ο θειικός άργυρος (Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Η περίσσεια των διχρωμικών (Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>) ιόντων εξουδετερώνεται με διάλυμα θειικού αμμωνιούχου σιδήρου (FeSO<sub>4</sub>(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), ενώ για τα χλωριούχα ιόντα χρησιμοποιείται θειικός υδράργυρος (HgSO<sub>4</sub>). Η αντίδραση της οξείδωσης αναπαριστάται με την εξίσωση:



Εν συνεχεία το μείγμα τοποθετείται στο θερμοαντιδραστήρα στους 150 °C για 2 ώρες. Έπειτα τα γυάλινα φιαλίδια αφήνονται να κρυώσουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για 45 λεπτά. Ακολούθως γίνεται προσδιορισμός της περισσειας των διχρωμικών ιόντων φασματοφωτομετρικά στα 620 nm φωτόμετρο (HACH DR 2010). Είναι σημαντικό να πραγματοποιηθεί πριν από την ανάλυση των δειγμάτων και μηδενισμός των οργάνων με τη χρήση και ενός τυφλού δείγματος. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται δυο κυψελίδες. Η μια κυψελίδα περιέχει απιονισμένο νερό και αυτήν χρησιμοποιείται σαν τυφλό δείγμα και η άλλη κυψελίδα περιέχει το δείγμα μας.

Το COD συνήθως μετράται αντί για το BOD. Ο κυριότερος λόγος είναι ότι η μέτρηση του COD πραγματοποιείται σε 2-3 ώρες, ενώ του BOD κρατάει 5 ημέρες. Επιπλέον είναι οικονομική μέθοδος και απαιτούνται μικροί όγκοι δειγμάτων (εικόνα 2.2.7.1). Το μειονέκτημα της μέτρησης COD είναι ότι η τελική μέτρηση αναφέρεται στη τόσο στη βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη, όσο και στη μη βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη.





**Εικόνα 2.2.7.1:** Υλικά μέτρησης COD.

Για τη μέτρηση αυτή χρησιμοποιούνται οι παρακάτω συσκευές:

- (i) Ειδικά φιαλίδια χώνευσης, με ορισμένες διαστάσεις, από κατάλληλο υλικό που δεν απορροφά ακτινοβολία (borosilicate).
- (ii) Εστία χώνευσης (C-TECH, 1540), η οποία διαθέτει ανοίγματα όπου εφαρμόζουν τέλεια τα φιαλίδια.
- (iii) Φασματοφωτόμετρο (HACH, DR/2010), στο οποίο τα τοποθετηθήκαν τα φιαλίδια χώνευσης μετά την εστία.

Επιπλέον, για τη μέτρηση αυτή παρασκευάζονται και χρησιμοποιούνται τα παρακάτω αντιδραστήρια. Το διάλυμα χώνευσης προέρχεται από την προσθήκη 10.216 g  $K_2Cr_2O_7$  σε περίπου 500 mL αποσταγμένου νερού. Το διχρωμικό κάλλιο είχε προηγουμένως ξηρανθεί στους  $103^\circ C$  για 2 h. Στο διάλυμα προστίθενται 167 mL πυκνού  $H_2SO_4$  και 33.3 g  $HgSO_4$ . Εν συνεχεία το μείγμα αυτό αφήνεται σε θερμοκρασία δωματίου. Τελικώς το διάλυμα αραιώνεται στα 1000 mL. Το δεύτερο διάλυμα που πρέπει να προετοιμαστεί είναι το αντιδραστήριο του θειικού οξέος. Το διάλυμα αυτό παρασκευάζεται με την προσθήκη  $Ag_2SO_4$  σε πυκνό θειικό οξύ με αναλογία 5.5g  $Ag_2SO_4/kg$   $H_2SO_4$ . Στη συνέχεια το διάλυμα παραμένει για 1-2 ημέρες μέχρι να διαλυθεί ο  $Ag_2SO_4$ . Το τελευταίο διάλυμα είναι το πρότυπο διάλυμα όξινου φθαλικού καλίου (KHP). Για να ετοιμαστεί πρέπει το όξινο φθαλικό κάλιο ( $HOOC_6H_4COOK$ ) να ξηρανθεί στους  $120^\circ C$  μέχρι σταθερού βάρους. Αφού ζυγισθεί ποσότητα ίση με 425 g, αναμειγνύεται με απεσταγμένο νερό και αραιώνεται σε τελικό όγκο 500 mL. (Το KHP έχει μια θεωρητική τιμή COD 1.176 mg  $O_2/mg$  και το παραπάνω διάλυμα που παρασκευάζεται έχει μια θεωρητική τιμή COD 1000  $\mu g O_2/mL$ ).

Η διαδικασία της μέτρησης του COD είναι η εξής:

Σε καθαρά φιαλίδια βάζουμε 2.0 mL δείγματος, 1.2 mL του διαλύματος χώνευσης (διάλυμα (α)) και 2.8 mL του αντιδραστηρίου του θειικού οξέος (διάλυμα (β)), έχοντας συνολικό όγκο 6.0 mL. Το θειικό οξύ εγχέεται στο φιαλίδιο σιγά-σιγά, ώστε να σχηματίσει στρώμα κάτω από το στρώμα του δείγματος και του διαλύματος χώνευσης. Έπειτα σφραγίζονται καλά με τα πώματα τους και αναταράσσονται για να υπάρξει πλήρη ανάμιξη. Το επόμενο βήμα είναι η τοποθέτηση στην εστία χώνευσης, αφού έχει προηγουμένως προθερμανθεί στους 148° C και παραμένουν εκεί για 2 h. Ακολούθως αφήνονται να κρυώσουν σε θερμοκρασία δωματίου, και μετά εκτελείται μέτρηση της απορρόφησής τους στα 620 nm στο κατάλληλο φασματοφωτόμετρο.

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητη η κατασκευή μια πρότυπης καμπύλης. Η καμπύλη αυτή προέρχεται από τη μέτρηση τουλάχιστον πέντε διαλυμάτων όξινου φθαλικού καλίου (το οποίο παρασκευάζεται με τη διαδικασία που προαναφέρθηκε) και έχει τιμές COD από 0 έως 900 mg O<sub>2</sub>/L. Είναι σημαντικό να κατασκευάζεται συνεχώς νέα καμπύλη κάθε φορά που ανανεώνονται τα αντιδραστήρια.

### **2.2.9 Προσδιορισμός TOC**

Η μέτρηση του ολικού οργανικού άνθρακα (Total Organic Carbon) είναι ενδεικτική για την εκτίμηση των συγκεντρώσεων της οργανικής ύλης που ενδεχομένως υπάρχουν στο νερό, αλλά είναι ιδιαίτερα σημαντική κατά τη διαδικασία παραγωγής πόσιμου νερού. Συνεπώς αποτελεί και ένα τρόπο εκτίμησης της ποιότητας των υδάτων.

Η μέτρηση της συγκέντρωσης του ολικού οργανικού άνθρακα στα δείγματα μας πραγματοποιείται με τη βοήθεια του ανακλασιμέτρου. Αρχικά προετοιμάζουμε το δείγμα, φροντίζοντας η τιμή του pH να είναι κάτω της τιμής 2.5. Αναμειγνύουμε ποσότητα δείγματος ίση με 1 ml σε τελικό όγκο όγκο 10 ml απιονισμένου νερού, όπου στη συνέχεια προστίθενται 2 σταγόνες αντιδραστηρίου Reagent TOC-1K. Το μείγμα αναδεύεται για 10 λεπτά περίπου. Από το μείγμα αυτό παίρνουμε ποσότητα ίση με 3 ml και τη βάζουμε

σε έναν άλλο φιαλίδιο, όπου προστίθεται μια ποσότητα του δεύτερου αντιδραστηρίου Reagent TOC-2K. Το φιαλίδιο σφραγίζεται καλά και τοποθετείται στον θερμοαντιδραστήρα για περίπου 2 ώρες στους 200° C. Στη συνέχεια το φιαλίδιο αφήνεται να κρυώσει για περίπου μια ώρα. Τέλος ακολουθεί μέτρηση στο ανακλασίμετρο.



Εικόνα 2.2.9.1: Δείγματα μέτρησης TOC.

## 2.2.10 Προσδιορισμός pH

Η τιμή του pH είναι ενδεικτική της έντασης της οξύτητας ή της αλκαλικότητας ενός διαλύματος σε μια ορισμένη θερμοκρασία. Το pH χρησιμοποιείται ως μια παράμετρος καθορισμού της ποιότητας και καταλληλότητας των εδαφών και νερών (Λυδάκης Ν., 2007). Η τιμή αυτή υπολογίζεται με βάση το  $-\log [H^+]$ , όπου  $[H^+]$  η συγκέντρωση των κατιόντων υδρογόνου στο διάλυμα όπου εκτελείται η μέτρηση του pH. Στο καθαρό νερό υπάρχει μια ισορροπία μεταξύ των ιόντων  $[H^+]$  και των ανιόντων υδροξυλίου  $[OH^-]$  και ισχύει:

$$[H^+][OH^-] = K_w = 1.01 \cdot 10^{-14} \text{ στους } 25 \text{ }^\circ\text{C}$$
$$\text{και } [H^+] = [OH^-] = 1.005 \cdot 10^{-7}$$

Όπου :  $[H^+]$  = δραστηριότητα ιόντων υδρογόνου (moles /L)

$[OH^-]$  = δραστηριότητα ιόντων υδροξυλίου (moles/L)

$K_w$  = προϊόν ιόντων του νερού.

### 2.2.11 Προσδιορισμός σκληρότητας κα χλωριόντων με χρήση αυτόματου τιτλοδότη και ηλεκτρόδιο REDOX (δυναμομετρία).

Η μέτρηση του δυναμικού των στοιχείων βρίσκει εκτεταμένη εφαρμογή στον προσδιορισμό της σκληρότητας και των χλωριόντων σε δείγματα νερού. Οι ποτενσιομετρικές τιτλοδοτήσεις βασίζονται στις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στο προς μέτρηση δείγμα. Ουσιαστικά συνιστά μια μέθοδο μέτρησης της ηλεκτρενεργητικής δύναμης ενός ηλεκτροχημικού στοιχείου. Για τη μέτρηση αυτή χρησιμοποιούνται ένα εκλεκτικό ηλεκτρόδιο και ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς. Το δυναμικό του εκλεκτικού ηλεκτροδίου θα εξαρτάται από την ενεργότητα των στοιχείων του δείγματος (Καραϊσκάκης Γ., 1995, Κλούρας Ν., 1995).

Οι μεταβολές του δυναμικού καταγράφονται και απεικονίζονται σε μια γραφική παράσταση  $\Delta E/\Delta V$  συναρτήσει της ποσότητας του προστιθέμενου όγκου. Η καμπύλη E-V είναι πάντοτε σιγμοειδής μορφής, αλλά το ακριβές της σχήμα εξαρτάται από τη σταθερά ισορροπίας και τη στοιχειομετρία της εξεταζόμενης αντίδρασης. Το ισοδύναμο σημείο της τιτλοδότησης μπορεί να προσδιοριστεί από το σημείο καμπής της καμπύλης τιτλοδότησης.

#### 2.2.11.1 Προσδιορισμός Σκληρότητας

Η σκληρότητα του νερού αναφέρεται κυρίως στη συγκέντρωση  $\text{Ca}^{2+}$  και  $\text{Mg}^{2+}$ , που υπάρχουν ως διπτανθρακικά άλατα το νερό. Ο προσδιορισμός της σκληρότητας πραγματοποιείται με την ογκομετρική μέθοδο του EDTA ή απευθείας μέτρηση με τη βοήθεια του ανακλασιμέτρου.

- Ογκομετρική μέθοδος EDTA

Η αρχή της μεθόδου είναι η από κοινού, δέσμευση των ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου από το δινάτριο άλας του αιθυλενο-διαμινο-τετραοξικού οξέος (EDTA) σε αλκαλικό περιβάλλον (pH :  $10 \pm 1$ ), παρουσία δείκτη *Eriochrome Black T*. Ο δείκτης δεσμεύει ένα μέρος των ιόντων  $\text{Ca}^{+2}$  και  $\text{Mg}^{+2}$  σχηματίζοντας μια ασταθή και

σύμπλοκο-ένωση. Το EDTA έχει την ικανότητα να δεσμεύει αρχικά τα μη δεσμευμένα ιόντα  $\text{Ca}^{+2}$  και  $\text{Mg}^{+2}$  από το δείκτη και στη συνέχεια αποσπά και τα δεσμευμένα από το δείκτη. Συνεπώς ο δείκτης παραμένει αδέσμευτος και τη στιγμή αυτή παρατηρείται αλλαγή του χρώματος του διαλύματος, σηματοδοτώντας με αυτό τον τρόπο το τέλος της ογκομέτρησης. Οι τιμές σκληρότητας του πόσιμου νερού πρέπει να είναι μικρότερες από  $49,28^{\circ}\text{F}$  ή  $28^{\circ}\text{D}$  περίπου.

#### Εκτέλεση του πειράματος

Αρχικά σε μια κωνική φιάλη των 50 ml προστίθεται ποσότητα δείγματος ίση με 25 ml και εν συνεχεία 1 ml ρυθμιστικού διαλύματος. Το ρυθμιστικό διάλυμα έχει παρασκευαστεί με την ανάμιξη διαλύματος αμμωνίας με ορισμένη ποσότητα  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Έπειτα γίνεται αραίωση του δείγματος με απεσταγμένο νερό σε τελικό όγκο 1 L και καθώς αναδεύεται το διάλυμα προστίθενται και σταγόνες του δείκτη Eriochrome Black T (χρώματος μπλε). Το διάλυμα αποκτά χρώμα κόκκινο ανοιχτό. Η κωνική φιάλη τοποθετείται στην κατάλληλη θέση και ξεκινά η τιτλοδότηση με το πρότυπο διάλυμα E.D.T.A 0,01M. Σε 100ml δείγματος προστίθενται σταδιακά 0,05ml EDTA. Ο αυτόματος τιτλοδότης καταγράφει τη μέτρηση ανά 8 sec.

Ο υπολογισμός της σκληρότητας βασίζεται στον υπολογισμό της συγκέντρωσης του  $\text{CaCO}_3$ , σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Σκληρότητα mgCaCO}_3 = \frac{V1 \times 1000}{V2}$$

Όπου V1: ml Πρότυπου διαλύματος E.D.T.A 0,01M που καταναλώθηκε

V2: ml Δείγματος νερού

- Με το ανακλασίμετρο

Είναι σημαντικό πριν εκτελεστεί η μέτρηση με το ανακλασίμετρο, να ελεγχθεί εάν η σκληρότητα ξεπερνά τους  $30,0^{\circ}\text{d}$ . Σε περίπτωση που η τιμή είναι μεγαλύτερη το δείγμα θα πρέπει να αραιωθεί σε όγκο νερού. Η τιμή του pH θα πρέπει επίσης να βρίσκεται μεταξύ των ορίων 5-8. Εν συνεχεία η μέτρηση πραγματοποιείται ανοίγοντας το ανακλασίμετρο (START) και

εισάγοντας τις ειδικές εμποτισμένες λωρίδες (strips) στην ειδική θέση (strip adapter) του ανακλασιμέτρου. Με το πέρας της αντίδρασης η τιμή της σκληρότητας απεικονίζεται στην οθόνη του οργάνου.

### 2.2.11.2 Προσδιορισμός χλωριόντων

Η παρουσία χλωριόντων στο νερό προσδίδει δυσάρεστη γεύση. Το χλώριο ανευρίσκεται σε σημαντικές ποσότητες τόσο στα επιφανειακά όσο και στα υπόγεια νερά σε διαφορετικές συγκεντρώσεις (mg/L), με υψηλότερη συγκέντρωση των χλωριόντων στα υπόγεια νερά παράκτιων περιοχών εξαιτίας των υπεραντλήσεων. Επίσης, τα λύματα αστικών περιοχών έχουν αυξημένες τιμές. Για το πόσιμο νερό έχει οριστεί ως υψηλότερο επιτρεπτό όριο η τιμή των 250 mg/L. Γενικότερα τιμή άνω των 250 mg/L προκαλεί φθορές στις σωληνώσεις με έντονο το πρόβλημα της σκουριάς.

Οι τιμές αυτές διαφοροποιούνται και εξαιτίας της διαφορετικής χημικής σύστασης των πετρωμάτων. Το χλώριο βρίσκεται σε μορφή ενώσεων με άλλες ουσίες, όπως είναι το χλωριούχο νάτριο (NaCl) και το χλωρίδιο του Μαγνησίου (MgCl<sub>2</sub>). Το χλώριο (Cl<sub>2</sub>) σε ελεύθερη μορφή είναι ιδιαίτερα τοξικό και χρησιμοποιείται συχνά ως απολυμαντικό.

Η συγκέντρωση των χλωριόντων μπορεί να αξιολογηθεί διαμέσου της μεθόδου του νιτρικού αργύρου, ιδιαίτερα για σχετικά καθαρά νερά με συγκέντρωση χλωριόντων από 1,5 έως 100 mg/L. Σε αυτή την μέθοδο γίνεται ογκομέτρηση του δείγματος με διάλυμα AgNO<sub>3</sub>, με παρουσία χρωμικού καλίου (δείκτης). Κατά την ογκομέτρηση παρουσιάζεται δέσμευση χλωριόντων στην μορφή AgCl (Ζανάκη Κ., 2001).

Αρχικά παρασκευάζεται πρότυπο διάλυμα AgNO<sub>3</sub> συγκέντρωσης 0,01 και γίνεται βαθμονόμηση του οργάνου με δυο πρότυπα διαλύματα με pH 4 και 7 αντίστοιχα.

#### Διαδικασία

Το πρότυπο διάλυμα AgNO<sub>3</sub> 0,01M συνδέεται με την αντλία του αυτόματου τιτλοδότη. Πρώτα πραγματοποιείται ξέπλυμα του σωλήνα με το

νέο διάλυμα  $\text{AgNO}_3$  0,01M πατώντας για ορισμένο χρονικό διάστημα το πλήκτρο dispenser. Έτσι διασφαλίζεται η αποφυγή επιμολύνσεων από τυχόν παλαιότερα διαλύματα που έχει κατακρατήσει η σωλήνωση. Η συσκευή ρυθμίζεται έτσι ώστε το βήμα τιτλοδότησης να είναι ίσο με 0,25ml αντιδραστηρίου ( $\text{AgNO}_3$  0,01M). Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της στιγμής που ο όγκος τιτλοδότη πέφτει στον αναλυτή και της στιγμής της μέτρησης του δυναμικού ορίζεται στα 10sec. Ταυτόχρονα το διάλυμα του αναλυτή αναδεύεται συνεχώς. Ο τερματισμός της τιτλοδότησης ορίζεται μετά από χρήση 12ml αντιδραστηρίου.

### 3. Αποτελέσματα

#### 3.1 Προσδιορισμός σκληρότητας

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τον αυτόματο τιτλοδότη οδήγησαν στον προσδιορισμό της σκληρότητας των δειγμάτων του νερού αντίστροφης ώσμωσης, του νερού γεώτρησης και απόβλητου νερού. Παρακάτω απεικονίζονται σε πίνακες και διαγράμματα τα αποτελέσματα των μετρήσεων κατά σειρά δειγμάτων.

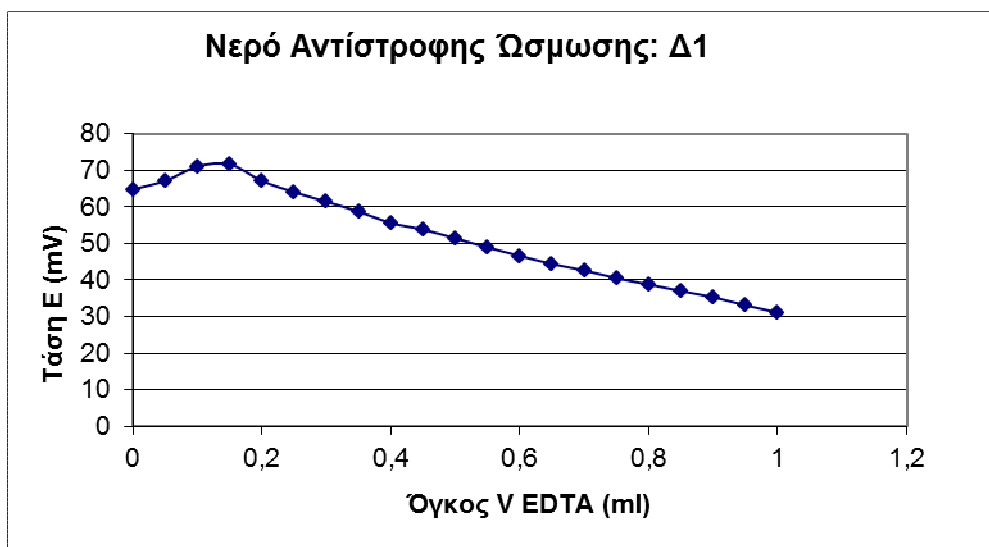
##### 3.1.1 Αποτελέσματα αυτόματου τιτλοδότη

- Τιτλοδότηση νερού αντίστροφης ώσμωσης

Όγκος V EDTA (ml)	Τάση E (mV)
0	64,8
0,05	67,1
0,1	71
0,15	71,6
0,2	67,1
0,25	64
0,3	61,4
0,35	58,7
0,4	55,6
0,45	53,8
0,5	51,4
0,55	48,9
0,6	46,6
0,65	44,4

0,7	42,6
0,75	40,5
0,8	38,8
0,85	37
0,9	35,3
0,95	33,1
1	31,1

**Πίνακας 3.1:** Τιμές τάσης E (mV) του πρώτου δείγματος απιονισμένου νερού κατά την τιτλοδότηση του με EDTA.



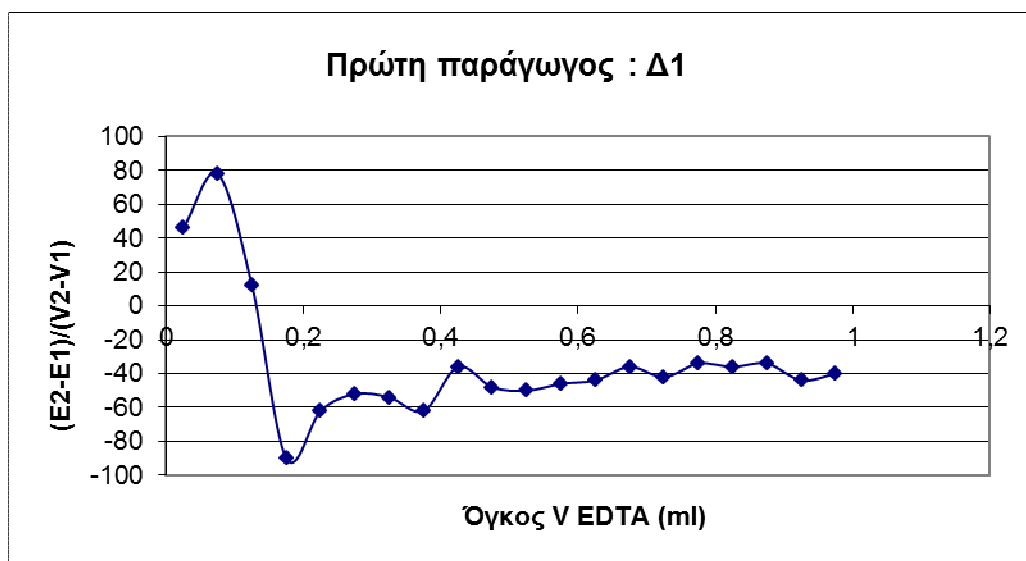
**Διάγραμμα 3.1.1.1:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων της ογκομέτρησης με EDTA στο πρώτο δείγμα του απιονισμένου νερού για τον προσδιορισμό σκληρότητας.

Όγκος V EDTA (ml)	(E2-E1)/(V2-V1)
0,03	46
0,08	78
0,13	12
0,18	-90
0,23	-62
0,28	-52
0,33	-54
0,38	-62
0,43	-36
0,48	-48
0,53	-50
0,58	-46
0,63	-44
0,68	-36
0,73	-42



0,78	-34
0,83	-36
0,88	-34
0,93	-44
0,98	-40

**Πίνακας 3.2:** Τιμές πρώτης παραγώγου της τάσης E (mV) του πρώτου δείγματος νερού αντίστροφης ώσμωσης.

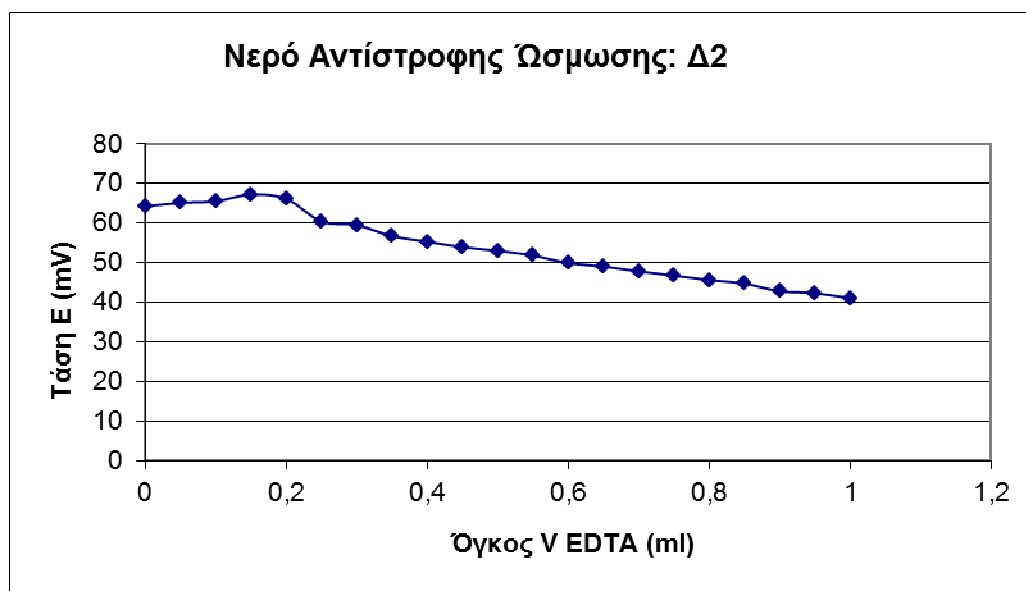


**Διάγραμμα 3.1.1.2:** Αποτελέσματα πρώτης παραγώγου στο πρώτο δείγμα νερού αντίστροφης ώσμωσης.

Όγκος V EDTA (ml)	Τάση E (mV)
0	64,2
0,05	65,1
0,1	65,5
0,15	67,2
0,2	66,1
0,25	60,4
0,3	59,5
0,35	56,7
0,4	55,3
0,45	53,9
0,5	53
0,55	51,8
0,6	49,9
0,65	49
0,7	47,8
0,75	46,7
0,8	45,6

0,85	44,7
0,9	42,8
0,95	42,3
1	41

**Πίνακας 3.3:** Τιμές τάσης E (mV) του δεύτερου δείγματος νερού αντίστροφης ώσμωσης κατά την τιτλοδότηση του με EDTA.

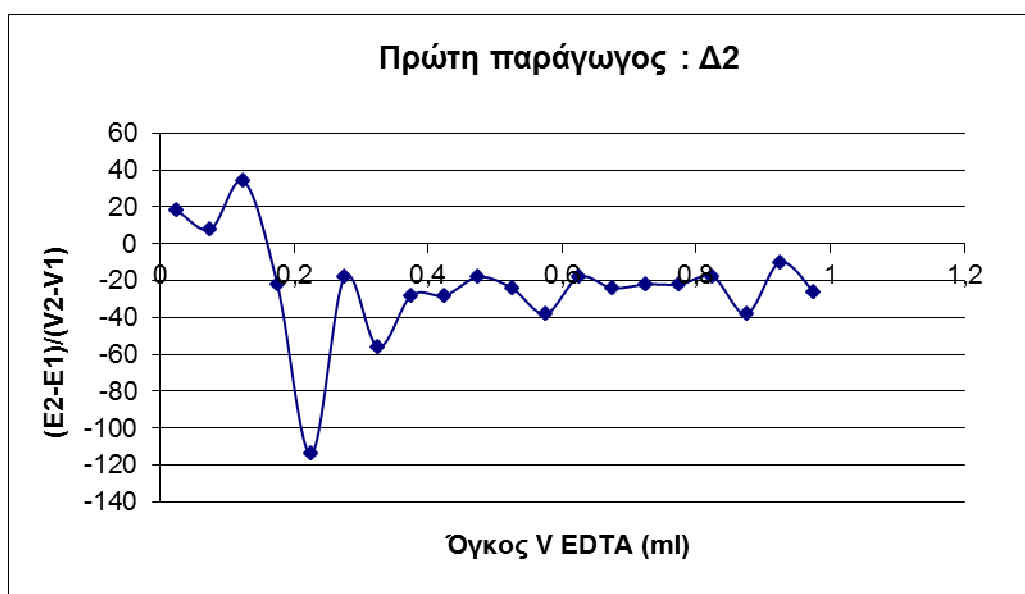


**Διάγραμμα 3.1.1.3:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων της ογκομέτρησης με EDTA στο δεύτερο δείγμα του νερού αντίστροφης ώσμωσης για τον προσδιορισμό σκληρότητας.

Όγκος V EDTA (ml)	$(E_2 - E_1)/(V_2 - V_1)$
0,03	18
0,08	8
0,13	34
0,18	-22
0,23	-114
0,28	-18
0,33	-56
0,38	-28
0,43	-28
0,48	-18
0,53	-24
0,58	-38
0,63	-18
0,68	-24
0,73	-22

0,78	-22
0,83	-18
0,88	-38
0,93	-10
0,98	-26

**Πίνακας 3.4:** Τιμές πρώτης παραγώγου της τάσης E (mV) του δεύτερου δείγματος νερού αντίστροφης ώσμωσης.

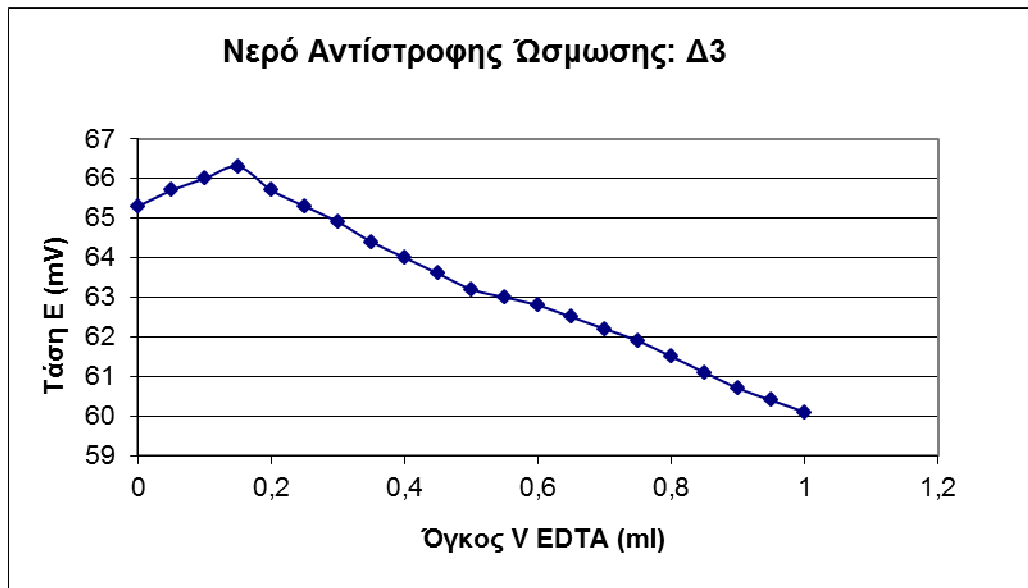


**Διάγραμμα 3.1.1.4:** Αποτελέσματα πρώτης παραγώγου στο δεύτερο δείγμα νερού αντίστροφης ώσμωσης.

Όγκος V EDTA (ml)	Τάση E (mV)
0	65,3
0,05	65,7
0,1	66
0,15	66,3
0,2	65,7
0,25	65,3
0,3	64,9
0,35	64,4
0,4	64
0,45	63,6
0,5	63,2
0,55	63
0,6	62,8
0,65	62,5
0,7	62,2

0,75	61,9
0,8	61,5
0,85	61,1
0,9	60,7
0,95	60,4
1	60,1

**Πίνακας 3.5:** Τιμές τάσης E (mV) του τρίτου δείγματος νερού αντίστροφης ώσμωσης κατά την τιτλοδότηση του με EDTA.

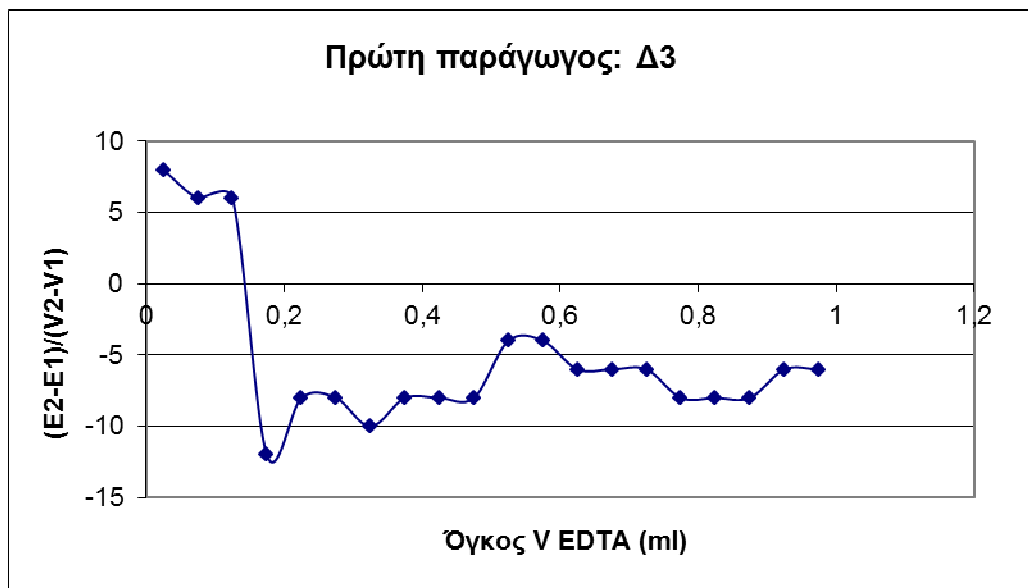


**Διάγραμμα 3.1.1.5:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων της ογκομέτρησης με EDTA στο τρίτο δείγμα του νερού αντίστροφης ώσμωσης για τον προσδιορισμό σκληρότητας.

Όγκος V EDTA (ml)	$(E_2 - E_1)/(V_2 - V_1)$
0,025	8
0,075	6
0,125	6
0,175	-12
0,225	-8
0,275	-8
0,325	-10
0,375	-8
0,425	-8
0,475	-8
0,525	-4
0,575	-4
0,625	-6
0,675	-6

0,725	-6
0,775	-8
0,825	-8
0,875	-8
0,925	-6
0,975	-6

**Πίνακας 3.6:** Τιμές πρώτης παραγώγου της τάσης E (mV) του τρίτου δείγματος νερού αντίστροφης ώσμωσης.



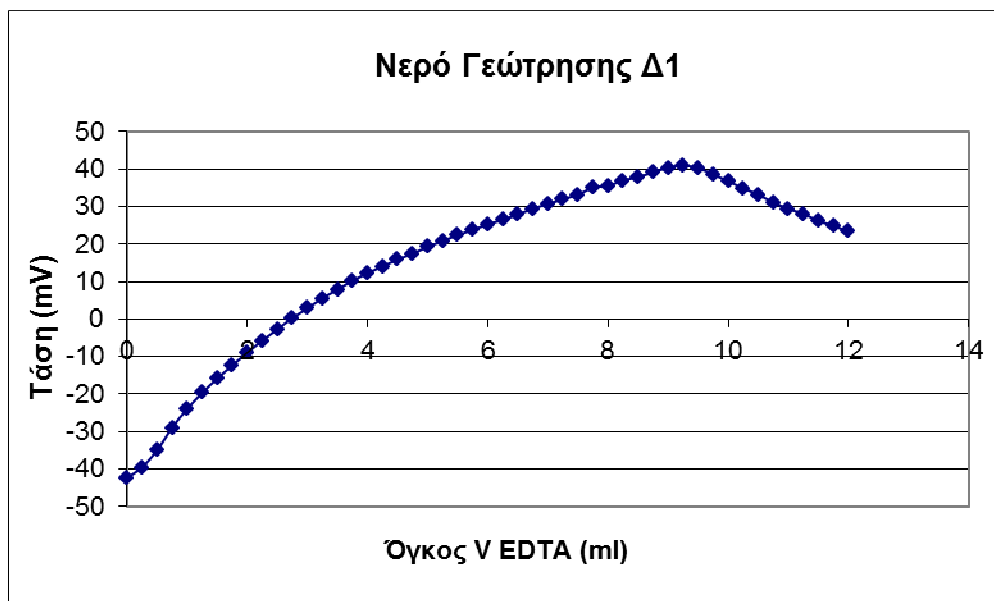
**Διάγραμμα 3.1.1.6:** Αποτελέσματα πρώτης παραγώγου στο τρίτο δείγμα νερού αντίστροφης ώσμωσης.

- Τιτλοδότηση νερού γεώτρησης

Όγκος V EDTA (ml)	Τάση E (mV)
0	64,8
0,05	67,1
0,1	71
0,15	71,6
0,2	67,1
0,25	64
0,3	61,4
0,35	58,7
0,4	55,6
0,45	53,8
0,5	51,4
0,55	48,9
0,6	46,6
0,65	44,4

0,7	42,6
0,75	40,5
0,8	38,8
0,85	37
0,9	35,3
0,95	33,1
1	31,1

**Πίνακας 3.7:** Τιμές τάσης E (mV) του πρώτου δείγματος νερού γεώτρησης κατά την τιτλοδότηση του με EDTA.

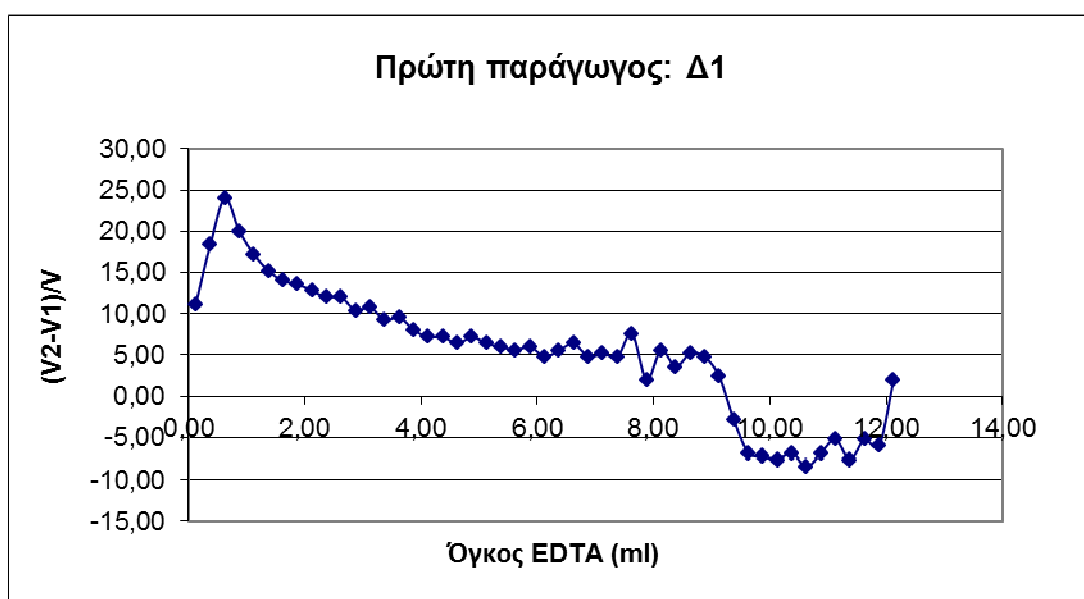


**Διάγραμμα 3.1.1.7:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων της ογκομέτρησης με EDTA στο πρώτο δείγμα του νερού γεώτρησης για τον προσδιορισμό σκληρότητας.

Όγκος V EDTA (ml)	$(E_2 - E_1)/(V_2 - V_1)$
0,03	46
0,08	78
0,13	12
0,18	-90
0,23	-62
0,28	-52
0,33	-54
0,38	-62
0,43	-36
0,48	-48
0,53	-50
0,58	-46

0,63	-44
0,68	-36
0,73	-42
0,78	-34
0,83	-36
0,88	-34
0,93	-44
0,98	-40

**Πίνακας 3.8:** Τιμές πρώτης παραγώγου της τάσης E (mV) του πρώτου δείγματος νερού γεώτρησης.

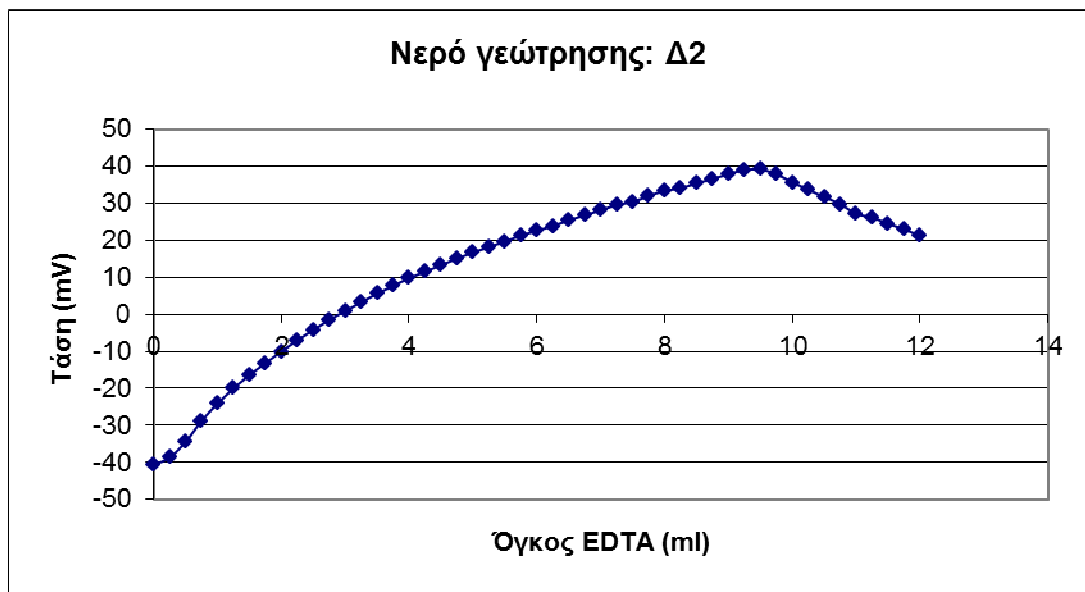


**Γράφημα 3.1.1.8:** Αποτελέσματα πρώτης παραγώγου στο πρώτο δείγμα νερού γεώτρησης.

Όγκος V EDTA (ml)	Τάση E (mV)
0	64,2
0,05	65,1
0,1	65,5
0,15	67,2
0,2	66,1
0,25	60,4
0,3	59,5
0,35	56,7
0,4	55,3
0,45	53,9
0,5	53
0,55	51,8

0,6	49,9
0,65	49
0,7	47,8
0,75	46,7
0,8	45,6
0,85	44,7
0,9	42,8
0,95	42,3
1	41

**Πίνακας 3.9:** Τιμές τάσης E (mV) του δεύτερου δείγματος νερού γεώτρησης κατά την τιτλοδότηση του με EDTA.



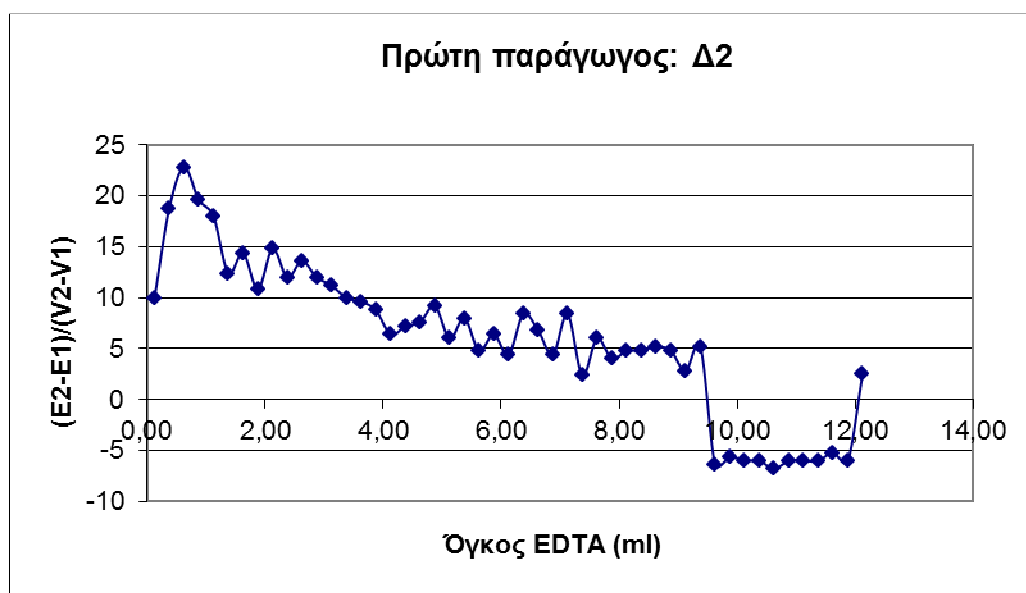
**Διάγραμμα 3.1.1.9:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων της ογκομέτρησης με EDTA στο δεύτερο δείγμα νερού γεώτρησης για τον προσδιορισμό σκληρότητας.

Όγκος V EDTA (ml)	$(E_2 - E_1)/(V_2 - V_1)$
0,025	18
0,075	8
0,125	34
0,175	-22
0,225	-114
0,275	-18
0,325	-56
0,375	-28
0,425	-28
0,475	-18
0,525	-24



0,575	-38
0,625	-18
0,675	-24
0,725	-22
0,775	-22
0,825	-18
0,875	-38
0,925	-10
0,975	-26

**Πίνακας 3.10:** Τιμές πρώτης παραγώγου της τάσης E (mV) του δεύτερου δείγματος νερού γεώτρησης.

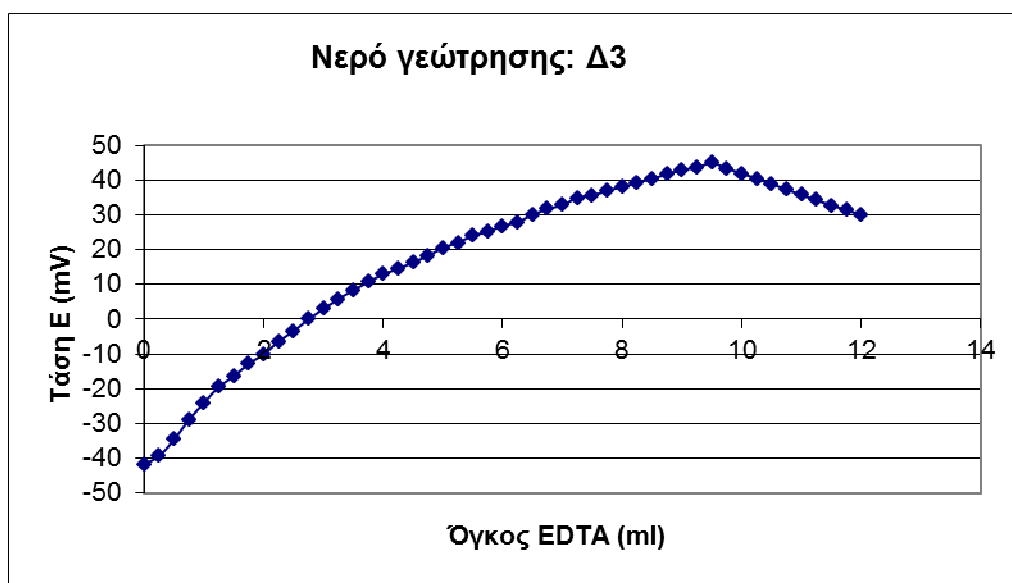


**Διάγραμμα 3.1.1.10:** Αποτελέσματα πρώτης παραγώγου στο δεύτερο δείγμα νερού γεώτρησης.

Όγκος V EDTA (ml)	Τάση E (mV)
0	65,3
0,05	65,7
0,1	66
0,15	66,3
0,2	65,7
0,25	65,3
0,3	64,9
0,35	64,4
0,4	64
0,45	63,6
0,5	63,2

0,55	63
0,6	62,8
0,65	62,5
0,7	62,2
0,75	61,9
0,8	61,5
0,85	61,1
0,9	60,7
0,95	60,4
1	60,1

**Πίνακας 3.11:** Τιμές τάσης E (mV) του τρίτου δείγματος νερού γεώτρησης κατά την τιτλοδότηση του με EDTA.

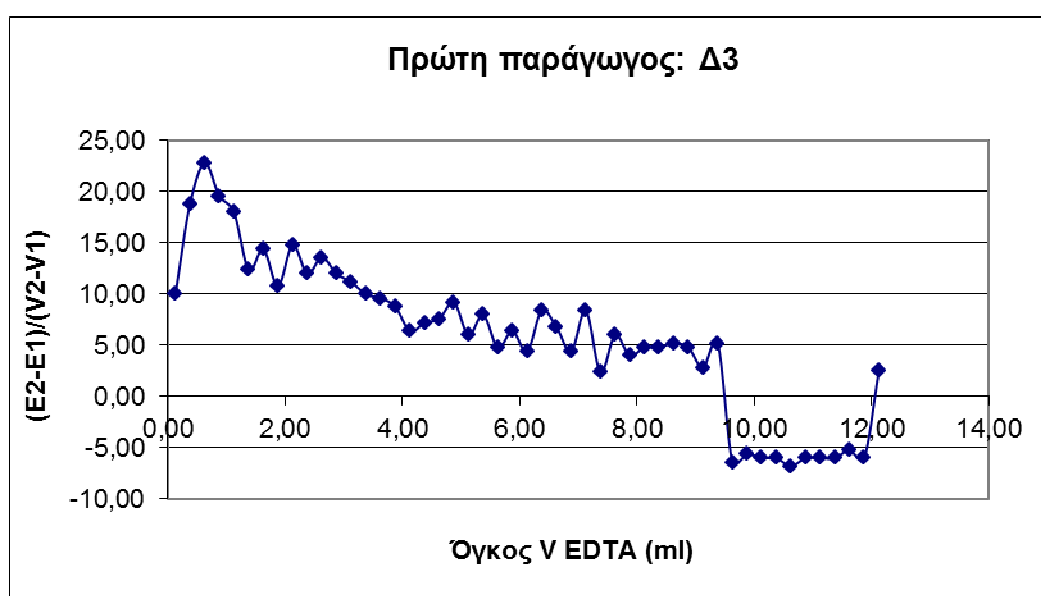


**Διάγραμμα 3.1.1.11:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων της ογκομέτρησης με EDTA στο τρίτο δείγμα του νερού γεώτρησης για τον προσδιορισμό σκληρότητας.

Όγκος V EDTA (ml)	$(E_2 - E_1)/(V_2 - V_1)$
0,025	8
0,075	6
0,125	6
0,175	-12
0,225	-8
0,275	-8
0,325	-10
0,375	-8
0,425	-8
0,475	-8
0,525	-4

0,575	-4
0,625	-6
0,675	-6
0,725	-6
0,775	-8
0,825	-8
0,875	-8
0,925	-6
0,975	-6

**Πίνακας 3.12:** Τιμές πρώτης παραγώγου της τάσης E (mV) του τρίτου δείγματος νερού γεώτρησης.



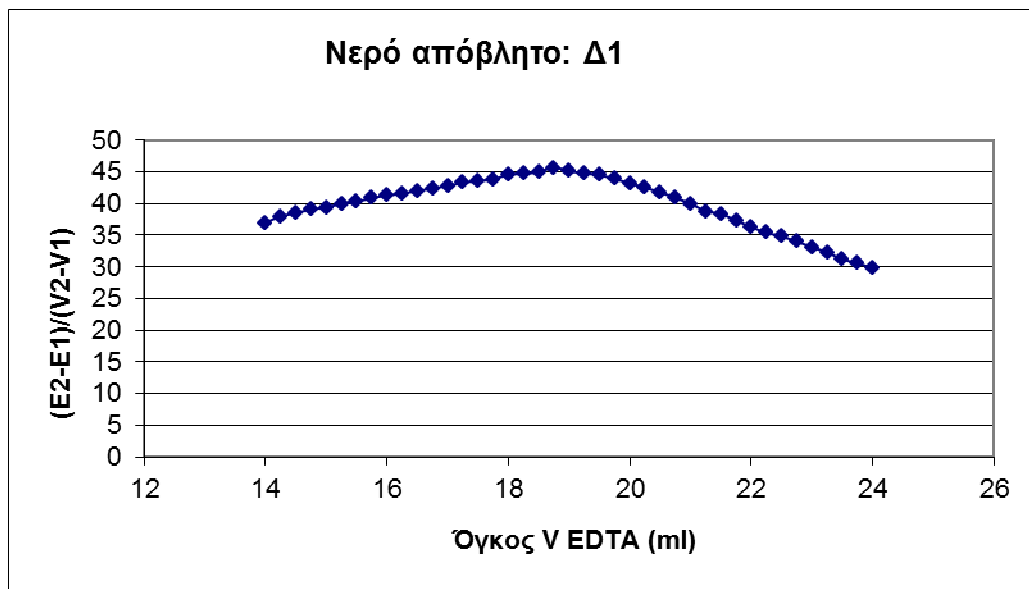
**Διάγραμμα 3.1.1.12:** Αποτελέσματα πρώτης παραγώγου στο τρίτο δείγμα νερού γεώτρησης.

- Τιτλοδότηση νερού απόβλητου

Όγκος V EDTA (ml)	Τάση E (mV)	Όγκος V EDTA (ml)	Τάση E (mV)
14	37	19,25	44,8
14,25	38	19,5	44,5
14,5	38,5	19,75	43,9
14,75	39,1	20	43,2
15	39,4	20,25	42,5
15,25	40	20,5	41,8
15,5	40,3	20,75	40,9
15,75	40,9	21	40
16	41,3	21,25	38,8
16,25	41,6	21,5	38,4

16,5	42	21,75	37,3
16,75	42,4	22	36,3
17	42,8	22,25	35,4
17,25	43,3	22,5	34,8
17,5	43,6	22,75	34
17,75	43,8	23	33,1
18	44,6	23,25	32,3
18,25	44,7	23,5	31,2
18,5	45	23,75	30,6
18,75	45,7	24	29,8
19	45,1	-	-

**Πίνακας 3.13:** Τιμές τάσης E (mV) του πρώτου δείγματος νερού απόβλητου κατά την τιτλοδότηση του με EDTA.

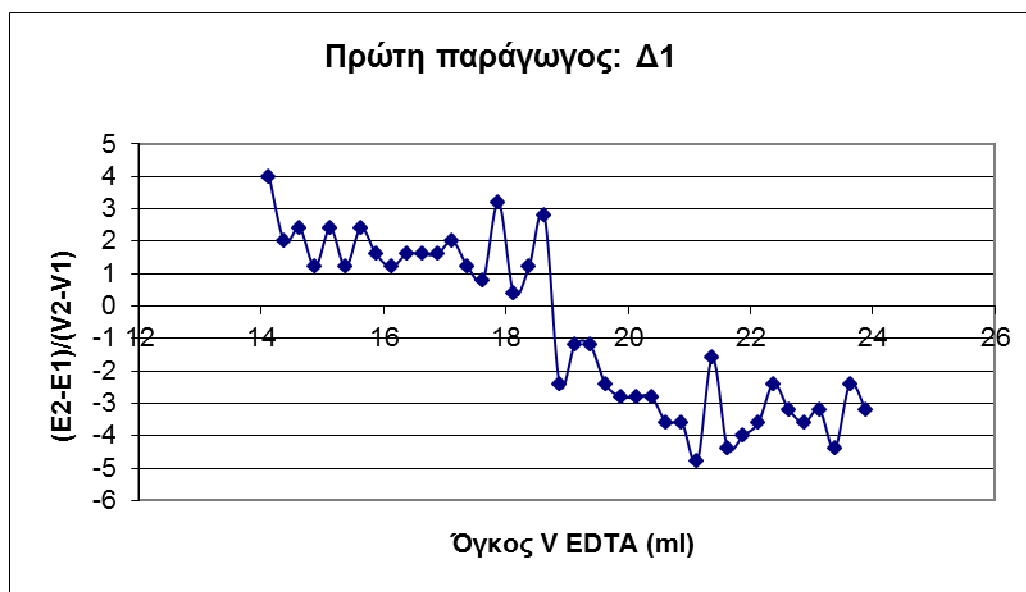


**Διάγραμμα 3.1.1.13:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων της ογκομέτρησης με EDTA στο πρώτο δείγμα του απόβλητου νερού για τον προσδιορισμό σκληρότητας.

Όγκος V EDTA (ml)	(E2-E1)/(V2-V1)	Όγκος V EDTA (ml)	(E2-E1)/(V2-V1)
14,13	4	19,13	-1,2
14,38	2	19,38	-1,2
14,63	2,4	19,63	-2,4
14,88	1,2	19,88	-2,8
15,13	2,4	20,13	-2,8
15,38	1,2	20,38	-2,8
15,63	2,4	20,63	-3,6
15,88	1,6	20,88	-3,6
16,13	1,2	21,13	-4,8
16,38	1,6	21,38	-1,6
16,63	1,6	21,63	-4,4
16,88	1,6	21,88	-4

17,13	2	22,13	-3,6
17,38	1,2	22,38	-2,4
17,63	0,8	22,63	-3,2
17,88	3,2	22,88	-3,6
18,13	0,4	23,13	-3,2
18,38	1,2	23,38	-4,4
18,63	2,8	23,63	-2,4
18,88	-2,4	23,88	-3,2

**Πίνακας 3.14:** Τιμές πρώτης παραγώγου της τάσης E (mV) του πρώτου δείγματος νερού απόβλητου.

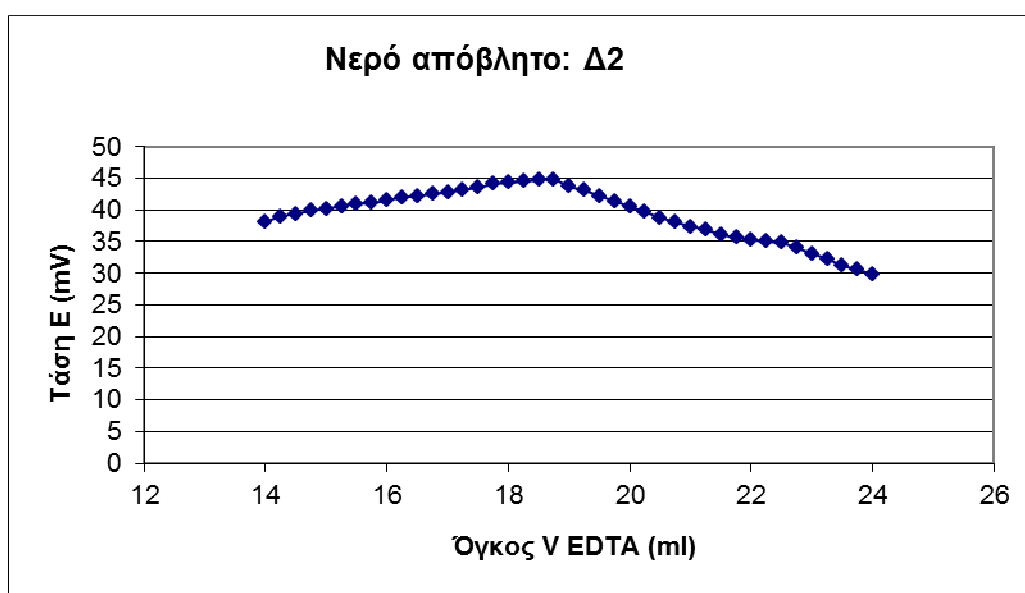


**Διάγραμμα 3.1.1.14:** Αποτελέσματα πρώτης παραγώγου στο πρώτο δείγμα απόβλητου νερού.

Όγκος V EDTA (ml)	Τάση E (mV)	Όγκος V EDTA (ml)	Τάση E (mV)
14	38,1	19,25	43,1
14,25	39	19,5	42,2
14,5	39,4	19,75	41,4
14,75	39,9	20	40,5
15	40,2	20,25	39,7
15,25	40,6	20,5	38,8
15,5	41	20,75	38,1
15,75	41,1	21	37,4
16	41,5	21,25	36,9
16,25	42	21,5	36,1
16,5	42,2	21,75	35,7
16,75	42,5	22	35,3
17	42,8	22,25	35
17,25	43,2	22,5	34,8

17,5	43,5	22,75	34
17,75	44,1	23	33,1
18	44,3	23,25	32,3
18,25	44,5	23,5	31,2
18,5	44,7	23,75	30,6
18,75	44,8	24	29,8
19	43,7	-	-

**Πίνακας 3.15:** Τιμές τάσης E (mV) του δεύτερου δείγματος νερού απόβλητου κατά την τιτλοδότηση του με EDTA.



**Διάγραμμα 3.1.1.15:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων της ογκομέτρησης με EDTA στο δεύτερο δείγμα του απόβλητου νερού για τον προσδιορισμό σκληρότητας.

Όγκος V EDTA (ml)	$(E_2 - E_1)/(V_2 - V_1)$	Όγκος V EDTA (ml)	$(E_2 - E_1)/(V_2 - V_1)$
14,13	3,6	19,13	-2,4
14,38	1,6	19,38	-3,6
14,63	2	19,63	-3,2
14,88	1,2	19,88	-3,6
15,13	1,6	20,13	-3,2
15,38	1,6	20,38	-3,6
15,63	0,4	20,63	-2,8
15,88	1,6	20,88	-2,8
16,13	2	21,13	-2
16,38	0,8	21,38	-3,2
16,63	1,2	21,63	-1,6
16,88	1,2	21,88	-1,6

17,13	1,6	22,13	-1,2
17,38	1,2	22,38	-0,8
17,63	2,4	22,63	-3,2
17,88	0,8	22,88	-3,6
18,13	0,8	23,13	-3,2
18,38	0,8	23,38	-4,4
18,63	0,4	23,63	-2,4
18,88	-4,4	23,88	-3,2

**Πίνακας 3.16:** Τιμές πρώτης παραγώγου της τάσης E (mV) του δεύτερου δείγματος νερού απόβλητου.

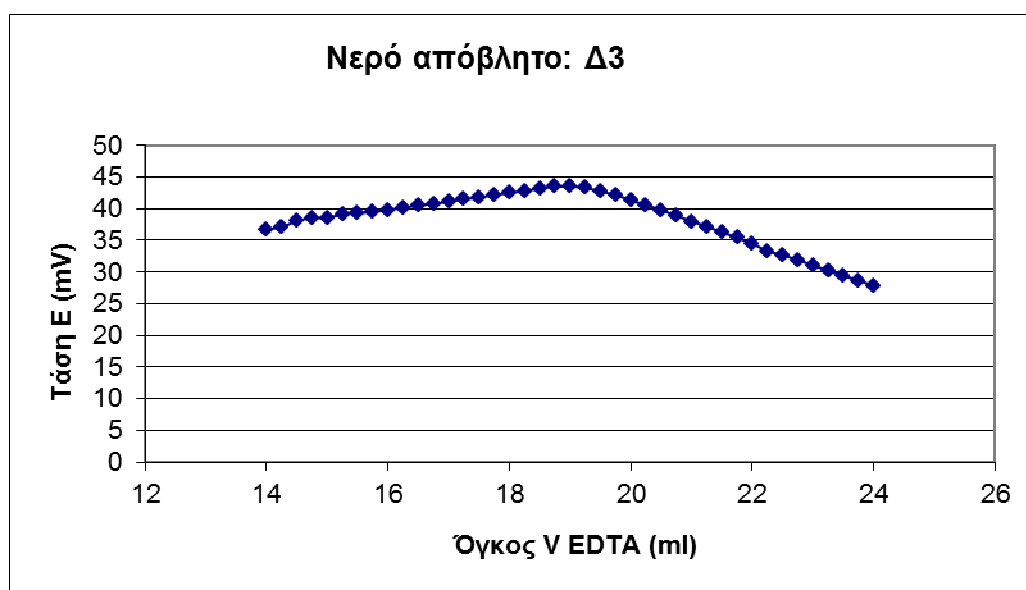


**Διάγραμμα 3.1.1.16:** Αποτελέσματα πρώτης παραγώγου στο τρίτο δείγμα.

Όγκος V EDTA (ml)	Τάση E (mV)	Όγκος V EDTA (ml)	Τάση E (mV)
14	36,8	19,25	43,3
14,25	37,1	19,5	42,7
14,5	38,1	19,75	42,2
14,75	38,5	20	41,3
15	38,6	20,25	40,6
15,25	39,1	20,5	39,8
15,5	39,3	20,75	38,9
15,75	39,5	21	38
16	39,8	21,25	37,2
16,25	40,2	21,5	36,3
16,5	40,5	21,75	35,4
16,75	40,8	22	34,5
17	41,1	22,25	33,3

17,25	41,5	22,5	32,7
17,5	41,8	22,75	31,9
17,75	42,2	23	31,1
18	42,5	23,25	30,2
18,25	42,8	23,5	29,4
18,5	43,2	23,75	28,7
18,75	43,5	24	27,8
19	43,5	-	-

**Πίνακας 3.17:** Τιμές τάσης E (mV) του τρίτου δείγματος νερού απόβλητου κατά την τιτλοδότηση του με EDTA.



**Διάγραμμα 3.1.1.17:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων της ογκομέτρησης με EDTA στο τρίτο δείγμα του απόβλητου νερού για τον προσδιορισμό σκληρότητας.

Όγκος V EDTA (ml)	$(E_2 - E_1)/(V_2 - V_1)$	Όγκος V EDTA (ml)	$(E_2 - E_1)/(V_2 - V_1)$
14,13	1,2	19,13	-0,8
14,38	4	19,38	-2,4
14,63	1,6	19,63	-2
14,88	0,4	19,88	-3,6
15,13	2	20,13	-2,8
15,38	0,8	20,38	-3,2
15,63	0,8	20,63	-3,6
15,88	1,2	20,88	-3,6
16,13	1,6	21,13	-3,2
16,38	1,2	21,38	-3,6
16,63	1,2	21,63	-3,6
16,88	1,2	21,88	-3,6
17,13	1,6	22,13	-4,8
17,38	1,2	22,38	-2,4



17,63	1,6	22,63	-3,2
17,88	1,2	22,88	-3,2
18,13	1,2	23,13	-3,6
18,38	1,6	23,38	-3,2
18,63	1,2	23,63	-2,8
18,88	0	23,88	-3,6

**Πίνακας 3.18:** Τιμές πρώτης παραγώγου της τάσης E (mV) του τρίτου δείγματος νερού απόβλητου.



**Διάγραμμα 3.1.1.18:** Αποτελέσματα πρώτης παραγώγου στο τρίτο δείγμα.

❖ **Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ογκομέτρησης με EDTA**

<b>Σκληρότητα (mg CaCO<sub>3</sub>/ 100 ml δείγματος)</b>			
Δείγμα	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης όσμωσης
1 <sup>ο</sup>	375	748	1,75
2 <sup>ο</sup>	385	748	1,75
3 <sup>ο</sup>	380	760	1,75

**Πίνακας 3.19:** Αποτελέσματα σκληρότητας των δειγμάτων με βάση την μέθοδο της ογκομέτρησης με EDTA.

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι τα δείγματα με νερό απόβλητο έδωσαν τις μεγαλύτερες τιμές σκληρότητας σε σύγκριση με τα

δείγματα από νερό γεώτρησης και νερό αντίστροφης όσμωσης. Τα δείγματα του νερού αντίστροφης όσμωσης είχαν τις μικρότερες τιμές σε σκληρότητα, δίνοντας έτσι ανάλογα αποτελέσματα με την μέτρηση του ανακλασίμετρου.

### 3.1.2 Αποτελέσματα ανακλασιμέτρου

Η σκληρότητα προσδιορίστηκε ακόμα και με τη χρήση του ανακλασιμέτρου. Η μέθοδος προσδιορισμού βασίζεται στη δέσμευση των ιόντων  $\text{Ca}^{+2}$  και  $\text{Mg}^{+2}$  με έναν δείκτη και το χρωματισμό του διαλύματος. Η ένταση του χρώματος είναι ανάλογη των βαθμών της σκληρότητας.

Νερό γεώτρησης			
Δείγμα (100 ml)	Γαλλικοί βαθμοί	Γερμανικοί βαθμοί	Αγγλικοί βαθμοί
1ο	34,55° f	19,3° d	24,13° e
2ο	35,80° f	20,0° d	25,00° e
3ο	39,92° f	22,3° d	27,88° e

**Πίνακας 3.20:** Αποτελέσματα σκληρότητας εκφρασμένα σε γαλλικούς, γερμανικούς και αγγλικούς βαθμούς σύμφωνα με τον προσδιορισμό σκληρότητας με το ανακλασίμετρο στο νερό γεώτρησης.

Από τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα δείγματα από νερό γεώτρησης παρουσίασαν μια αρκετά καλή επαναληψιμότητα στην μέτρηση της σκληρότητας. Ακόμα, με βάση την τιμή των γαλλικών βαθμών βλέπουμε ότι το νερό των δειγμάτων χαρακτηρίζεται ως πολύ σκληρό, καθώς ξεπερνά την τιμή των 30°f. Η σκληρότητα στο νερό γεώτρησης επηρεάζεται ιδιαίτερα από τα πετρώματα από τα οποία περνά το νερό.

<b>Νερό αντίστροφης όσμωσης</b>			
Δείγμα (100 ml)	Γαλλικοί βαθμοί	Γερμανικοί βαθμοί	Αγγλικοί βαθμοί
1 <sup>ο</sup>	0,36 °f	0,2 ° d	0,25 ° e
2 <sup>ο</sup>	0,18 °f	0,1 ° d	0,13 ° e
3 <sup>ο</sup>	0,18 °f	0,1 ° d	0,13 ° e

**Πίνακας 3.21:** Αποτελέσματα σκληρότητας εκφρασμένα σε γαλλικούς, γερμανικούς και αγγλικούς βαθμούς σύμφωνα με τον προσδιορισμό σκληρότητας με το ανακλασίμετρο στο νερό αντίστροφης ώσμωσης.

Ο παραπάνω πίνακας μας δείχνει ότι η μέτρηση της σκληρότητας σε νερό αντίστροφης όσμωσης έδωσε πολύ χαμηλές τιμές. Τα αποτελέσματα αυτά, μας παραπέμπουν στο γεγονός ότι τα φίλτρα αντίστροφης όσμωσης μείωσαν την σκληρότητα του νερού σε ποσοστό μεγαλύτερο του 95%.

<b>Νερό απόβλητο</b>			
Δείγμα (100 ml)	Γαλλικοί βαθμοί	Γερμανικοί βαθμοί	Αγγλικοί βαθμοί
1 <sup>ο</sup>	36,7 <sup>ο</sup> f	20,5 <sup>ο</sup> d	25,63 <sup>ο</sup> e
2 <sup>ο</sup>	37,41 <sup>ο</sup> f	20,9 <sup>ο</sup> d	26,13 <sup>ο</sup> e
3 <sup>ο</sup>	36,52 <sup>ο</sup> f	20,4 <sup>ο</sup> d	25,50 <sup>ο</sup> e

**Πίνακας 3.22:** Αποτελέσματα σκληρότητας εκφρασμένα σε γαλλικούς, γερμανικούς και αγγλικούς βαθμούς σύμφωνα με τον προσδιορισμό σκληρότητας με το ανακλασίμετρο στο απόβλητο νερό.

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε τις τιμές της σκληρότητας για τα δείγματα με απόβλητο νερό. Τα δείγματα ελέχθησαν και προέκυψε ότι η σκληρότητα τους ξεπερνά την τιμή των 30<sup>ο</sup>d, για αυτόν το λόγο αραιώθηκαν προσθέτοντας νερό αντίστροφης όσμωσης στα δείγματα σε αναλογία 1:1 έτσι ώστε να γίνει η μέτρηση με το ανακλασίμετρο. Τα δείγματα παρουσίασαν τις μεγαλύτερες τιμές σκληρότητας και από τις τρεις κατηγορίες δειγμάτων.

### 3.2 Προσδιορισμός συγκέντρωσης Χλωριόντων

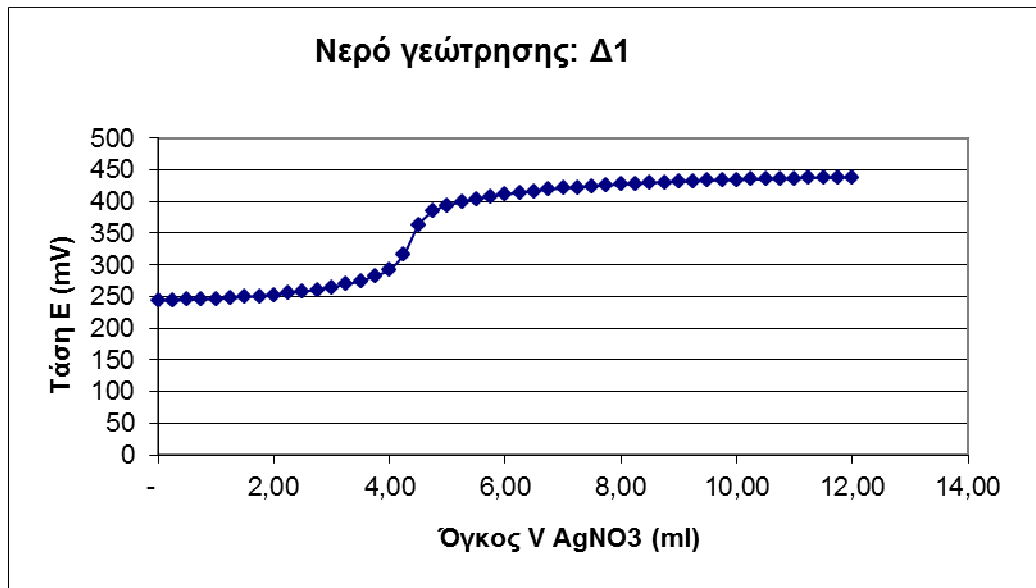
### 3.2.1 Αποτελέσματα αυτόματου τιτλοδότη

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τον αυτόματο τιτλοδότη οδήγησαν στον προσδιορισμό της συγκέντρωσης χλωριόντων των δειγμάτων του απιονισμένου νερού, του νερού γεώτρησης και απόβλητου νερού. Παρακάτω απεικονίζονται σε πίνακες και διαγράμματα τα αποτελέσματα των μετρήσεων κατά σειρά δειγμάτων.

- Νερό Γεώτρησης

Όγκος V AgNO <sub>3</sub> (ml)	Τάση E (mV)	Όγκος V AgNO <sub>3</sub> (ml)	Τάση E (mV)
-	243,9	6,25	414,1
0,25	243,9	6,50	416,5
0,50	244,9	6,75	419,3
0,75	245,8	7,00	420,8
1,00	246,7	7,25	422,6
1,25	247,8	7,50	424,2
1,50	249,3	7,75	425,6
1,75	250,9	8,00	427,1
2,00	252,9	8,25	428,3
2,25	255,5	8,50	429,3
2,50	258,1	8,75	430,4
2,75	261	9,00	431,1
3,00	264,6	9,25	432,1
3,25	269,5	9,50	433
3,50	274,3	9,75	433,8
3,75	282,8	10,00	434,4
4,00	292,7	10,25	435
4,25	317,2	10,50	435,6
4,50	362,6	10,75	436,1
4,75	384,3	11,00	436,6
5,00	393,8	11,25	437,1
5,25	399,3	11,50	437,6
5,50	403,8	11,75	438,1
5,75	408,2	12,00	438,5
6,00	411,3	-	-

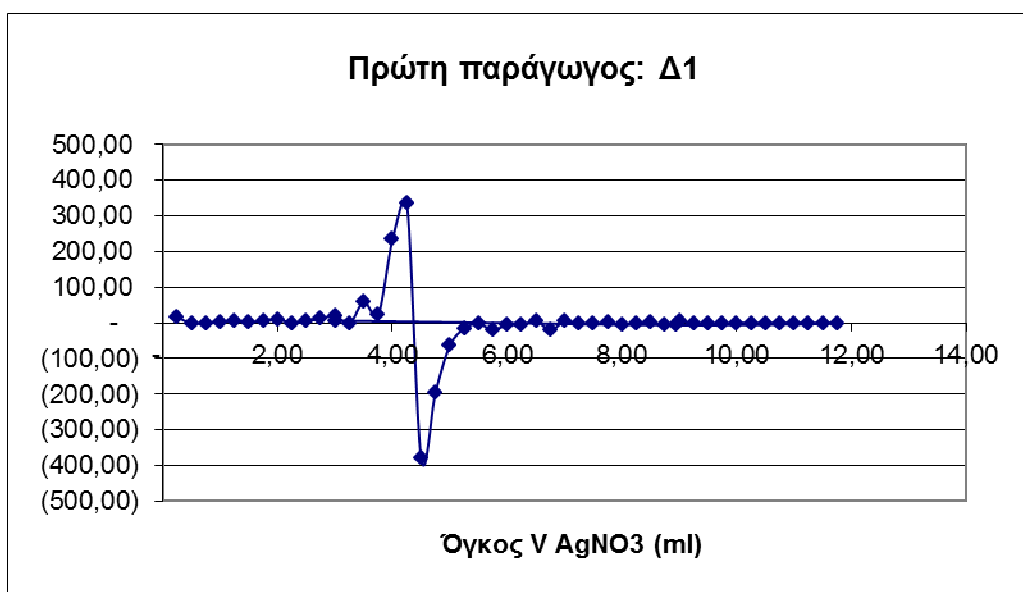
**Πίνακας 2.23:** Τιμές τάσης E (mV) του πρώτου δείγματος νερού γεώτρησης κατά την τιτλοδότηση του με AgNO<sub>3</sub>.



**Διάγραμμα 3.2.1.1:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων της ογκομέτρησης με  $\text{AgNO}_3$  στο πρώτο δείγμα του νερού γεώτρησης για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης χλωριόντων.

Όγκος V $\text{AgNO}_3$ (ml)	$(E_2-E_1)/(V_2-V_1)$	Όγκος V $\text{AgNO}_3$ (ml)	$(E_2-E_1)/(V_2-V_1)$
0,25	16,00	6,50	6,40
0,50	-1,60	6,75	-20,80
0,75	-0,00	7,00	4,80
1,00	3,20	7,25	-3,20
1,25	6,40	7,50	-3,20
1,50	1,60	7,75	1,60
1,75	6,40	8,00	-4,80
2,00	9,60	8,25	-3,20
2,25	0,00	8,50	1,60
2,50	4,80	8,75	-6,40
2,75	11,20	9,00	4,80
3,00	20,80	9,25	-1,60
3,25	-1,60	9,50	-1,60
3,50	59,20	9,75	-3,20
3,75	22,40	10,00	0,00
4,00	233,60	10,25	-
4,25	334,40	10,50	-1,60
4,50	-379,20	10,75	-
4,75	-195,20	11,00	-
5,00	-64,00	11,25	-
5,25	-16,00	11,50	-
5,50	-1,60	11,75	-1,60
5,75	-20,80	8,94	-5,95
6,00	-4,80	3,00	6,09
6,25	-6,40	-	-

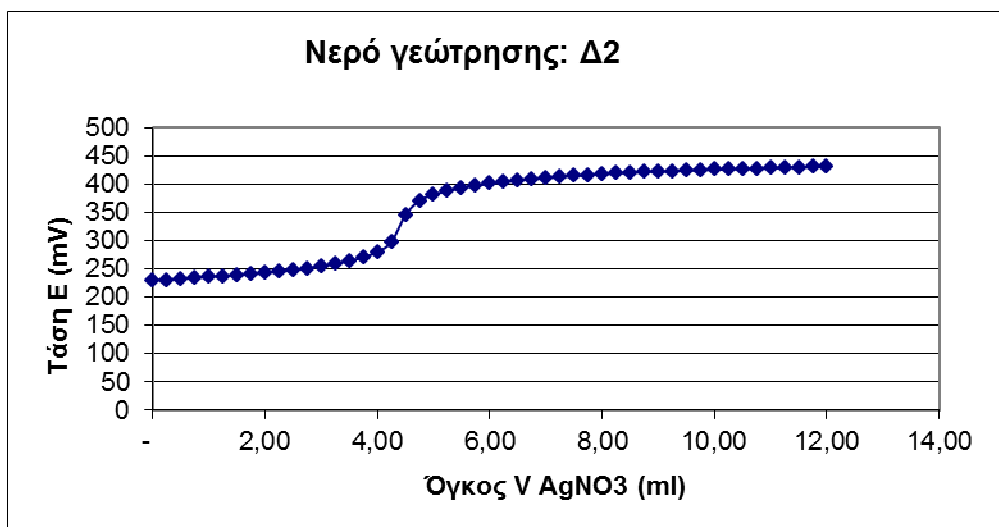
**Πίνακας 2.24:** Τιμές της πρώτης παραγώγου της τάσης E (mV) του πρώτου δείγματος νερού γεώτρησης.



**Διάγραμμα 3.2.1.2:** Αποτελέσματα πρώτης παραγώγου στο πρώτο δείγμα.

Όγκος V AgNO3 (ml)	(E2-E1)/(V2-V1)	Όγκος V AgNO3 (ml)	(E2-E1)/(V2-V1)
0,13	0,80	6,38	10,80
0,38	9,60	6,63	9,20
0,63	6,00	6,88	8,80
0,88	6,00	7,13	7,60
1,13	6,00	7,38	6,80
1,38	6,80	7,63	6,40
1,63	7,20	7,88	5,60
1,88	8,40	8,13	5,60
2,13	9,60	8,38	5,20
2,38	10,80	8,63	4,00
2,63	12,00	8,88	4,40
2,88	14,00	9,13	3,60
3,13	16,80	9,38	3,60
3,38	20,80	9,63	3,20
3,63	26,80	9,88	2,80
3,88	38,80	10,13	2,80
4,13	71,20	10,38	2,40
4,38	192,00	10,63	2,40
4,63	100,40	10,88	2,80
4,88	41,20	11,13	2,40
5,13	26,40	11,38	2,80
5,38	20,80	11,63	2,40
5,63	16,40	11,88	2,40
5,88	14,40	6,00	35,94
6,13	12,00	-	-

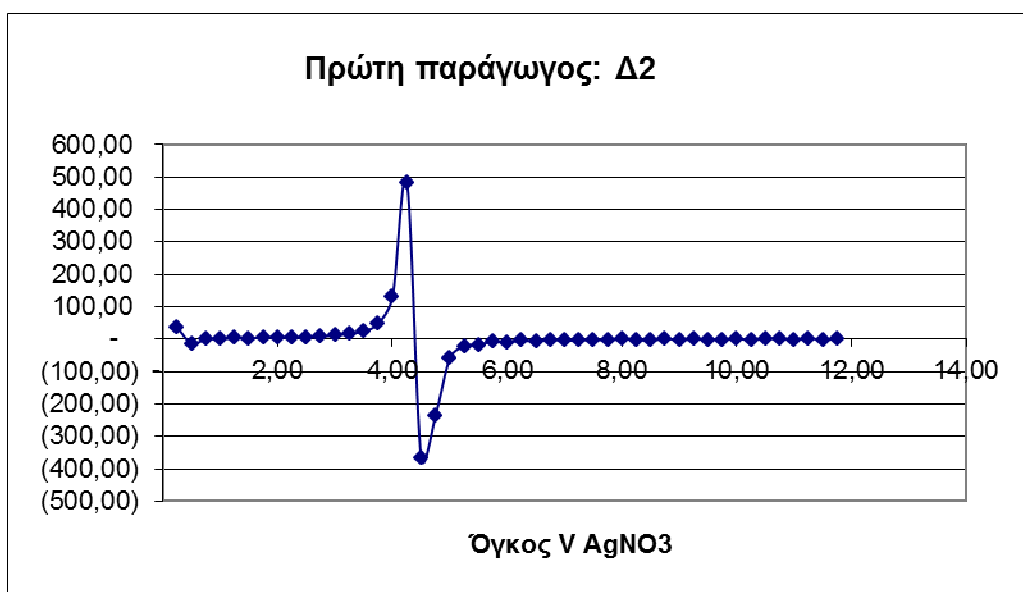
**Πίνακας 2.25:** Τιμές τάσης E (mV) του δεύτερου δείγματος νερού γεώτρησης κατά την τιπλοδότηση του με AgNO<sub>3</sub>.



**Διάγραμμα 3.2.1.3:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων της ογκομέτρησης με  $\text{AgNO}_3$  στο δεύτερο δείγμα του νερού γεώτρησης για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης χλωριόντων.

Ογκος V $\text{AgNO}_3$ (ml)	$(E_2-E_1)/(V_2-V_1)$	Ογκος V $\text{AgNO}_3$ (ml)	$(E_2-E_1)/(V_2-V_1)$
0,25	35,20	6,50	-6,40
0,50	-14,40	6,75	-1,60
0,75	-	7,00	-4,80
1,00	-	7,25	-3,20
1,25	3,20	7,50	-1,60
1,50	1,60	7,75	-3,20
1,75	4,80	8,00	-0,00
2,00	4,80	8,25	-1,60
2,25	4,80	8,50	-4,80
2,50	4,80	8,75	1,60
2,75	8,00	9,00	-3,20
3,00	11,20	9,25	-0,00
3,25	16,00	9,50	-1,60
3,50	24,00	9,75	-1,60
3,75	48,00	10,00	-
4,00	129,60	10,25	-1,60
4,25	483,20	10,50	-
4,50	-366,40	10,75	1,60
4,75	-236,80	11,00	-1,60
5,00	-59,20	11,25	1,60
5,25	-22,40	11,50	-1,60
5,50	-17,60	11,75	0,00
5,75	-8,00	8,94	-5,71
6,00	-9,60	3,00	5,99
6,25	-4,80	-	-

**Πίνακας 2.26:** Τιμές της πρώτης παραγώγου της τάσης E (mV) του δεύτερου δείγματος νερού γεώτρησης.

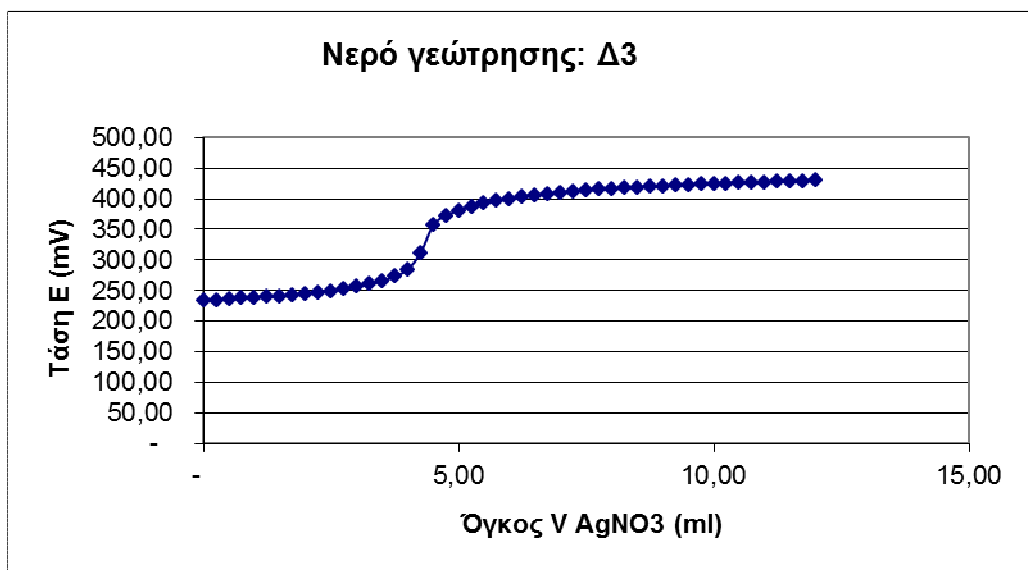


**Διάγραμμα 3.2.1.4:** Αποτελέσματα πρώτης παραγώγου στο δεύτερο δείγμα.

Όγκος V AgNO3 (ml)	Τάση E (mV)	Όγκος V AgNO3 (ml)	Τάση E (mV)
-	233,30	6,25	402,60
0,25	234,80	6,50	405,30
0,50	236,40	6,75	407,60
0,75	237,30	7,00	409,70
1,00	238,40	7,25	411,60
1,25	239,50	7,50	413,30
1,50	240,80	7,75	414,80
1,75	242,50	8,00	416,20
2,00	244,30	8,25	417,60
2,25	246,60	8,50	418,80
2,50	249,20	8,75	419,90
2,75	252,20	9,00	420,90
3,00	255,80	9,25	421,90
3,25	260,00	9,50	422,80
3,50	265,50	9,75	423,60
3,75	273,00	10,00	424,40
4,00	284,60	10,25	425,00
4,25	311,00	10,50	425,60
4,50	356,40	10,75	426,20
4,75	372,50	11,00	426,90
5,00	381,20	11,25	427,50
5,25	387,40	11,50	428,20
5,50	392,20	11,75	428,80
5,75	396,20	12,00	429,50
6,00	399,70	-	-

**Πίνακας 2.27:** Τιμές τάσης E (mV) του τρίτου δείγματος νερού γεώτρησης κατά την πιλοδότηση του με AgNO<sub>3</sub>.





**Διάγραμμα 3.2.1.5:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων της ογκομέτρησης με  $\text{AgNO}_3$  στο τρίτο δείγμα του νερού γεώτρησης για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης χλωριόντων.

Όγκος V $\text{AgNO}_3$ (ml)	$(E_2 - E_1)/(V_2 - V_1)$	Όγκος V $\text{AgNO}_3$ (ml)	$(E_2 - E_1)/(V_2 - V_1)$
0,25	1,60	6,50	-6,40
0,50	-11,20	6,75	-3,20
0,75	3,20	7,00	-3,20
1,00	-	7,25	-3,20
1,25	3,20	7,50	-3,20
1,50	6,40	7,75	-1,60
1,75	1,60	8,00	0,00
2,00	8,00	8,25	-3,20
2,25	4,80	8,50	-1,60
2,50	6,40	8,75	-1,60
2,75	9,60	9,00	-
3,00	9,60	9,25	-1,60
3,25	20,80	9,50	-1,60
3,50	32,00	9,75	-0,00
3,75	65,60	10,00	-3,20
4,00	236,80	10,25	-
4,25	304,00	10,50	-0,00
4,50	-468,80	10,75	1,60
4,75	-118,40	11,00	-1,60
5,00	-40,00	11,25	1,60
5,25	-22,40	11,50	-1,60
5,50	-12,80	11,75	1,60
5,75	-8,00	8,94	-5,62
6,00	-9,60	3,00	5,97
6,25	-3,20	-	-

**Πίνακας 2.28:** Τιμές της πρώτης παραγώγου της τάσης E (mV) του τρίτου δείγματος νερού γεώτρησης.

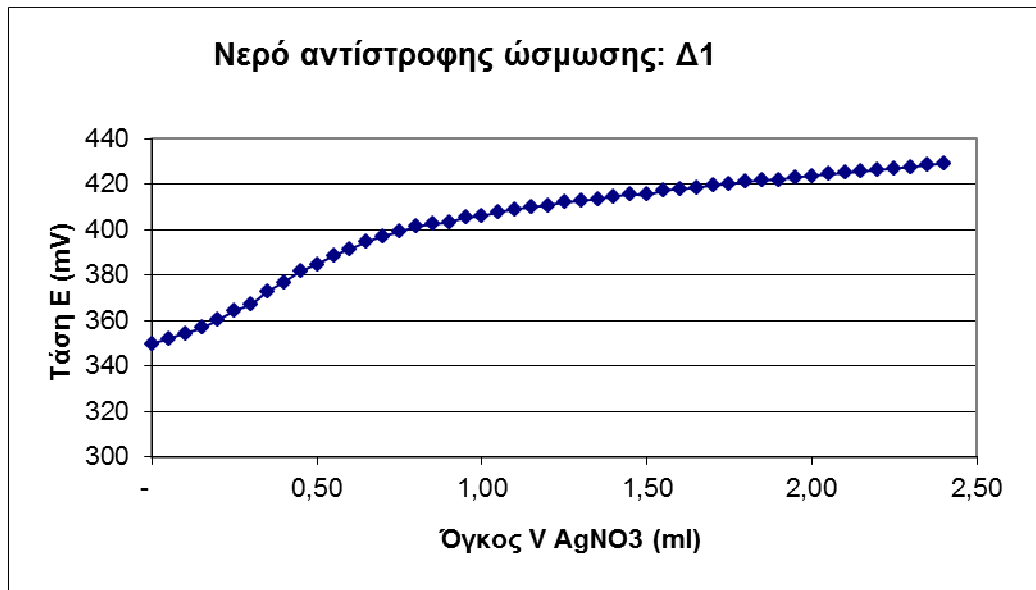


**Διάγραμμα 3.2.1.6:** Αποτελέσματα πρώτης παραγώγου στο τρίτο δείγμα.

- Χλωριόντα σε νερό αντίστροφης ώσμωσης

Όγκος V AgNO <sub>3</sub> (ml)	Τάση E (mV)	Όγκος V AgNO <sub>3</sub> (ml)	Τάση E (mV)
-	349,8	1,25	412
0,05	352	1,30	412,6
0,10	354,4	1,35	413,5
0,15	356,7	1,40	414,6
0,20	360,3	1,45	415,4
0,25	364,2	1,50	415,3
0,30	367,2	1,55	417,1
0,35	372,8	1,60	417,9
0,40	376,9	1,65	418,4
0,45	381,6	1,70	419,6
0,50	384,7	1,75	420
0,55	388,5	1,80	421,1
0,60	391,5	1,85	421,7
0,65	394,5	1,90	422
0,70	397,1	1,95	423
0,75	399	2,00	423,7
0,80	401,2	2,05	424,3
0,85	402,4	2,10	424,9
0,90	403,3	2,15	425,6
0,95	405,2	2,20	426,2
1,00	406	2,25	426,9
1,05	407,7	2,30	427,5
1,10	409	2,35	428,4
1,15	409,9	2,40	429,2
1,20	410,7	-	-

**Πίνακας 2.29:** Τιμές τάσης E (mV) του πρώτου δείγματος νερού αντίστροφης ώσμωσης κατά την πιλοδότηση του με AgNO<sub>3</sub>.



**Διάγραμμα 3.2.1.7:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων της ογκομέτρησης με  $\text{AgNO}_3$  στο πρώτο δείγμα του νερού αντίστροφης ώσμωσης για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης χλωριόντων.

Όγκος V $\text{AgNO}_3$ (ml)	$(E_2-E_1)/(V_2-V_1)$	Όγκος V $\text{AgNO}_3$ (ml)	$(E_2-E_1)/(V_2-V_1)$
0,05	80,00	1,25	-280,00
0,10	-40,00	1,30	120,00
0,15	520,00	1,35	80,00
0,20	120,00	1,40	-120,00
0,25	-360,00	1,45	-360,00
0,30	-	1,50	760,00
0,35	-600,00	1,55	-400,00
0,40	240,00	1,60	-120,00
0,45	-640,00	1,65	280,00
0,50	280,00	1,70	-320,00
0,55	-320,00	1,75	280,00
0,60	-0,00	1,80	-200,00
0,65	-160,00	1,85	-120,00
0,70	-280,00	1,90	280,00
0,75	120,00	1,95	-120,00
0,80	-400,00	2,00	-40,00
0,85	-120,00	2,05	-0,00
0,90	400,00	2,10	40,00
0,95	-440,00	2,15	-40,00
1,00	360,00	2,20	40,00
1,05	-160,00	2,25	-40,00
1,10	-160,00	2,30	120,00
1,15	-40,00	2,35	-40,00
1,20	200,00	-	-

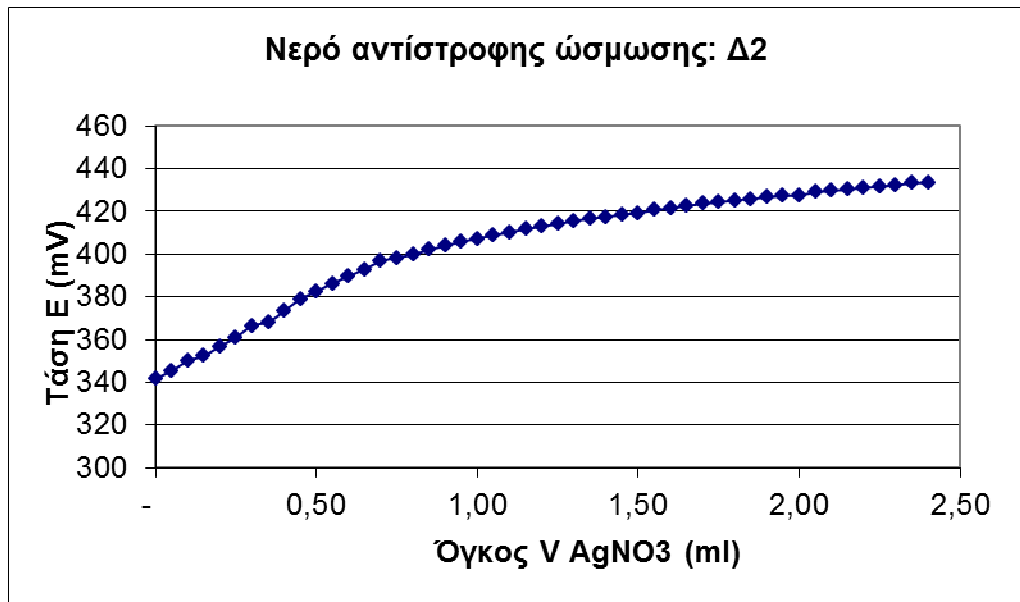
**Πίνακας 2.30:** Τιμές της πρώτης παραγώγου της τάσης E (mV) του πρώτου δείγματος νερού αντίστροφης ώσμωσης.



**Διάγραμμα 3.2.1.8:** Αποτελέσματα πρώτης παραγώγου στο πρώτο δείγμα.

Όγκος V AgNO3 (ml)	Τάση E (mV)	Όγκος V AgNO3 (ml)	Τάση E (mV)
-	341,8	1,25	414,2
0,05	345,4	1,30	415,6
0,10	350	1,35	416,7
0,15	352,4	1,40	417,5
0,20	356,9	1,45	418,6
0,25	361	1,50	419,3
0,30	366,5	1,55	420,6
0,35	368,2	1,60	421,6
0,40	373,4	1,65	422,6
0,45	379	1,70	423,6
0,50	382,6	1,75	424,3
0,55	386,4	1,80	425,3
0,60	389,7	1,85	425,9
0,65	393	1,90	426,7
0,70	396,7	1,95	427,4
0,75	398,4	2,00	427,6
0,80	399,8	2,05	429
0,85	402,1	2,10	429,7
0,90	403,9	2,15	430,3
0,95	405,9	2,20	431,1
1,00	407,4	2,25	431,7
1,05	408,8	2,30	432,3
1,10	410,4	2,35	433,3
1,15	411,7	2,40	433,6
1,20	413	-	-

**Πίνακας 2.31:** Τιμές τάσης E (mV) του δεύτερου δείγματος νερού αντίστροφης ώσμωσης κατά την πιλοδότηση του με AgNO<sub>3</sub>.



**αμμα 3.2.1.9:** Απεικόνιση αποτελεσμάτων της ογκομέτρησης με  $\text{AgNO}_3$  στο δεύτερο δείγμα του νερού αντίστροφης ώσμωσης για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης χλωριόντων.

Ογκος V $\text{AgNO}_3$ (ml)	$(E_2-E_1)/(V_2-V_1)$	Ογκος V $\text{AgNO}_3$ (ml)	$(E_2-E_1)/(V_2-V_1)$
0,05	400,00	1,25	80,00
0,10	-880,00	1,30	-120,00
0,15	840,00	1,35	-120,00
0,20	-160,00	1,40	120,00
0,25	560,00	1,45	-160,00
0,30	-	1,50	240,00
0,35	-	1,55	-120,00
0,40	160,00	1,60	0,00
0,45	-800,00	1,65	-0,00
0,50	80,00	1,70	-120,00
0,55	-200,00	1,75	120,00
0,60	-0,00	1,80	-160,00
0,65	160,00	1,85	80,00
0,70	-800,00	1,90	-40,00
0,75	-120,00	1,95	-200,00
0,80	360,00	2,00	480,00
0,85	-200,00	2,05	-280,00
0,90	80,00	2,10	-40,00
0,95	-200,00	2,15	80,00
1,00	-40,00	2,20	-80,00
1,05	80,00	2,25	0,00
1,10	-120,00	2,30	160,00
1,15	-0,00	2,35	-280,00
1,20	-40,00	-	-

**Πίνακας 2.32:** Τιμές της πρώτης παραγώγου της τάσης E (mV) του δεύτερου δείγματος νερού αντίστροφης ώσμωσης.



**Διάγραμμα 3.2.1.10:** Αποτελέσματα πρώτης παραγώγου στο δεύτερο δείγμα του νερού αντίστροφης ώσμωσης.

<b>Συγκέντρωση χλωριόντων</b>			
Δείγμα	Νερό γεώτρησης	Νερό αντίστροφης όσμωσης	Νερό απόβλητο
1 <sup>ο</sup>	63,90	1,42	
2 <sup>ο</sup>	63,90	1,42	
3 <sup>ο</sup>	60,35	-	

**Πίνακας 2.33:** Αποτελέσματα της συγκέντρωσης των χλωριόντων των δειγμάτων με βάση την μέθοδο της ογκομέτρησης με EDTA.

Τα δείγματα του νερού αντίστροφης όσμωσης είχαν τις μικρότερες τιμές συγκεντρώσεων σε χλωριόντα.

### 3.2.2 Μέτρηση Cl<sup>-</sup>

Η μέτρηση των ανιόντων Cl<sup>-</sup> πραγματοποιήθηκε με δύο μεθόδους. Η μία με τη χρήση του ανακλασιμέτρου (Reflectometer) και η άλλη μέθοδος

εκτελέσθηκε με τη χρήση του φασματοφωτομέτρου HACH. Ο προσδιορισμός των ανιόντων χλωρίου (Cl<sup>-</sup>) βασίζεται στην αντίδραση των Cl<sup>-</sup> με το θειοκυανικό και σχηματίζουν ενώσεις υδραργύρου με το χλώριο, απελευθερώνοντας θειοκυανικό ιόν. Τα θειοκυανικά ιόντα αντιδρούν τα σιδηρούχα ιόντα για να σχηματίσουν ένα σύμπλοκο πορτοκαλί χρώματος. Η ένταση του χρώματος είναι ενδεικτική της συγκέντρωσης των ανιόντων χλωρίου.

- Ανακλασίμετρο

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα της συγκέντρωσης του ελεύθερου και ολικού χλωρίου με τη χρήση του ανακλασιμέτρου. Το ανακλασίμετρο ανιχνεύει συγκεντρώσεις 2–50 mg/l Cl<sub>2</sub>. Πρέπει να σημειωθεί ότι στο νερό απόβλητο η συγκέντρωση του χλωρίου ήταν υψηλότερη των 50 mg/l, συνεπώς το δείγμα αραιώθηκε 1:1.

Cl <sup>-</sup>			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	24 mg/l	24 mg/l	7 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	23 mg/l	23 mg/l	5 mg/l
3 <sup>η</sup> μέτρηση	24 mg/l	23 mg/l	7 mg/l

**Πίνακας 3.34:** Αποτελέσματα συγκεντρώσεων Cl<sup>-</sup> σύμφωνα με το ανακλασίμετρο.

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα, διαπιστώνουμε ότι η χαμηλότερη συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου αντιστοιχεί στο νερό της αντίστροφης ώσμωσης. Τόσο οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων του νερού γεώτρησης όσο και του απόβλητου νερού είναι υψηλές, ωστόσο βρίσκονται μέσα στα επιθυμητά όρια. Σύμφωνα με την ΚΥΑ 46399/4352/86 για την ποιότητα των νερών που προορίζονται για πόσιμα η επιθυμητή συγκέντρωση των χλωριούχων είναι 200mg/l ενώ δεν σημειώνεται ανώτατο επιτρεπτό όριο. Με βάση τον πίνακα και το διάγραμμα, τα επίπεδα των χλωριόντων είναι πολύ χαμηλότερα από το όριο της νομοθεσίας.

- Φασματοφωτόμετρο

Η μέτρηση των Cl<sup>-</sup> με τη χρήση του φασματοφωτομέτρου πραγματοποιείται σε μήκος κύματος 455 nm. Το όργανο έχει εύρος συγκεντρώσεων 0.1-20.0 mg/l Cl<sup>-</sup>.

Cl <sup>-</sup>			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	3 mg/l	6,1 mg/l	0 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	2,9 mg/l	6,0 mg/l	0 mg/l
3 <sup>η</sup> μέτρηση	2,9 mg/l	6,1 mg/l	0 mg/l

**Πίνακας 2.34:** Αποτελέσματα συγκεντρώσεων Cl<sup>-</sup> σύμφωνα με το ανακλασίμετρο.

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα, διαπιστώνουμε ότι η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου είναι μηδενική στο νερό της αντίστροφης ώσμωσης. Η συγκέντρωση στο νερό απόβλητο είναι η υψηλότερη, γεγονός που υποδηλώνει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου της αντίστροφης ώσμωσης. Τα αποτελέσματα του ανακλασίμετρου συγκριτικά με τα αποτελέσματα του φασματοφωτόμετρου αποδεικνύουν τα ίδια αποτελέσματα με κάποιες παρεκκλίσεις.

### 3.2.3 Μέτρηση Cl<sub>2</sub>

Η μέτρηση του χλωρίου πραγματοποιήθηκε με δύο μεθόδους. Η μία με τη χρήση του ανακλασιμέτρου (Reflectometer) και η άλλη μέθοδος εκτελέστηκε με τη χρήση του φασματοφωτομέτρου HACH. Ο προσδιορισμός του χλωρίου (Cl<sub>2</sub>) βασίζεται στον προσδιορισμό του υδροχλωρικού οξέως ή υποχλωριώδους ιόντος (ελεύθερο χλώριο ή διαθέσιμο ελεύθερο χλώριο), το οποίο αντιδρά άμεσα με τον δείκτη DPD (διπροπυλενο-π-φαινυλενοδιαμίνη) σε ένα ασθενές όξινο περιβάλλον. Το αποτέλεσμα είναι να χρωματιστεί το διάλυμα ροζ. Η ένταση του χρώματος είναι ενδεικτική της συγκέντρωσης του χλωρίου.

- Ανακλασίμετρο (Reflectometer)



Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται τα αποτελέσματα της συγκέντρωσης του ελεύθερου και ολικού χλωρίου με τη χρήση του ανακλασίμετρο. Το ανακλασίμετρο ανιχνεύει συγκεντρώσεις 0,05 – 2,00 mg/l Cl<sub>2</sub>.

<b>Ελεύθερο χλώριο</b>			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	0,12 mg/l	0,16 mg/l	0,11 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	0,10 mg/l	0,16 mg/l	0,11 mg/l
3 <sup>η</sup> μέτρηση	0,10 mg/l	0,16 mg/l	0,11 mg/l

**Πίνακας 2.36:** Αποτελέσματα συγκεντρώσεων ελεύθερου χλωρίου σύμφωνα με το ανακλασίμετρο.

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα διαπιστώνουμε ότι το νερό αντίστροφης ώσμωσης έχει μικρές συγκεντρώσεις ελεύθερου χλωρίου, ωστόσο όχι από τις μικρότερες τιμές. Από τις τιμές των συγκεντρώσεων ελεύθερου χλωρίου στο νερό απόβλητο, οι οποίες είναι και οι υψηλότερες, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης ήταν αποτελεσματική στην απομάκρυνση του ελεύθερου χλωρίου.

<b>Ολικό χλώριο (mg/l)</b>			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	0,09 mg/l	0,12 mg/l	0,06 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	0,10 mg/l	0,13 mg/l	0,07 mg/l
3 <sup>η</sup> μέτρηση	0,09 mg/l	0,14 mg/l	0,06 mg/l

**Πίνακας 3.37:** Αποτελέσματα συγκεντρώσεων ολικού χλωρίου σύμφωνα με το ανακλασίμετρο.

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα διαπιστώνουμε ότι το νερό αντίστροφης ώσμωσης έχει τις μικρότερες συγκεντρώσεις ελεύθερου χλωρίου, Από τις τιμές των συγκεντρώσεων ελεύθερου χλωρίου στο νερό απόβλητο, οι οποίες είναι και οι υψηλότερες, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης ήταν αποτελεσματική στην απομάκρυνση του ελεύθερου χλωρίου. Οι τιμές του νερού γεώτρησης βρίσκονται στα επιθυμητά όρια.

- Φασματοφωτόμετρο

Η μέτρηση του χλωρίου με τη χρήση του φασματοφωτομέτρου πραγματοποιείται σε μήκος κύματος 530 nm. Το όργανο έχει εύρος συγκεντρώσεων 0-2.00 mg/l Cl<sub>2</sub>.

Cl <sup>-</sup>			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	3 mg/l	6,1 mg/l	0 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	2,9 mg/l	6,0 mg/l	0 mg/l
3 <sup>η</sup> μέτρηση	2,9 mg/l	6,1 mg/l	0 mg/l

**Πίνακας 2.38:** Αποτελέσματα συγκεντρώσεων ανιόντων χλωρίου σύμφωνα με το φασματοφωτόμετρο.

Παρατηρώντας το παραπάνω πίνακα συμπεραίνουμε ότι στο νερό αντίστροφης ώσμωσης αντιστοιχεί μηδενική συγκέντρωση, ενώ το νερό απόβλητο έχει τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις. Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου της αντίστροφης ώσμωσης. Οι τιμές του νερού γεώτρησης βρίσκονται στα επιθυμητά όρια.

### 3.3 Μέτρηση αγωγιμότητας

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού αναφέρεται στην ικανότητά του να μεταφέρει - άγει ηλεκτρικά φορτία. Η μέτρηση της αγωγιμότητας εξαρτάται από παράγοντες σχετικούς με την παρουσία ιόντων (και αλάτων) στο νερό, όπως τη συγκέντρωση, το σθένος και την ευκινησία των ιόντων, καθώς παίζει ρόλο και η θερμοκρασία του διαλύματος. Μονάδα μέτρησης της αγωγιμότητας είναι το mho/cm. Η μέτρηση της αγωγιμότητας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του αγωγιμομέτρου, που προσδιορίζει εύρος συγκεντρώσεων 0.0 μS/cm-199.9 mS/cm (Νταρακάς Ε., 2009).

<b>Αγωγιμότητα</b>			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	984 μS/cm	1792 μS/cm	20,6 μS/cm
2 <sup>η</sup> μέτρηση	993 μS/cm	1807 μS/cm	20,6 μS/cm
3 <sup>η</sup> μέτρηση	994 μS/cm	1809 μS/cm	20,6 μS/cm

**Πίνακας 2.39** : Αποτελέσματα μέτρησης της αγωγιμότητας με τη χρήση του αγωγιμόμετρου.

Από τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης επιτυγχάνει να μειώσει την αγωγιμότητα του δείγματος του νερού, αφού το νερό της αντίστροφης ώσμωσης έχει την μικρότερη τιμή αγωγιμότητας. Το ανώτατο επιτρεπτό όριο αγωγιμότητας είναι 2500 μS/cm. Το νερό γεώτρησης βρίσκεται κάτω από αυτό το όριο, όπως και το νερό απόβλητο. Όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα στα νερά τόσο μεγαλύτερη είναι η βιολογική παραγωγικότητα. Στα βιομηχανικά απόβλητα η τιμή της αγωγιμότητας ξεπερνά τα 10.000 μS/cm.

### 3.4 Μέτρηση αλατότητας

Η αλατότητα είναι μια παράμετρος που συνδέεται με την αγωγιμότητα. Ορίζεται ως η «συνολική ποσότητα των στερεών ουσιών σε γραμμάρια που περιέχονται σε 1 Kg νερό, όταν όλα τα ανθρακικά ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) έχουν μετατραπεί σε οξειδία, τα βρωμιούχα ( $\text{Br}^-$ ) και ιωδιούχα ( $\text{I}^-$ ) έχουν αντικατασταθεί από χλωριούχα ( $\text{Cl}^-$ ) ιόντα και έχει οξειδωθεί όλη η οργανική ύλη» (Νταρακάς Ε., 2009). Η αλατότητα ορίζεται ως μέρη επί τοις χιλίοις (ppt ή ‰). Η αλατότητα μετριέται απ' ευθείας με τα γνωστά αγωγιμόμετρα.

<b>Αλατότητα</b>			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	0,44 ppt	0,87 ppt	0,00 ppt
2 <sup>η</sup> μέτρηση	0,44 ppt	0,88 ppt	0,00 ppt

3 <sup>η</sup> μέτρηση	0,44 ppt	0,88 ppt	0,00 ppt
------------------------	----------	----------	----------

**Πίνακας 2.40:** Αποτελέσματα μέτρησης της αλατότητας με τη χρήση του αγωγιμόμετρου.

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα το νερό αντίστροφης ώσμωσης έχει μηδενική συγκέντρωση αλάτων. Συνεπώς η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης έχει επιτύχει να απομακρύνει την ποσότητα αλάτων που υπήρχαν στο νερό. Στο νερό γεώτρησης παρατηρούμε ότι οι τιμές της αλατότητας βρίσκονται μέσα στα επιθυμητά και ανώτατα όρια (0.5 ppt και 1 ppt αντίστοιχα). Η ποσότητα των αλάτων είναι συγκεντρωμένη στο νερό απόβλητο.

### 3.5 Μέτρηση COD

Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης του ασβεστίου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του ανακλασιμέτρου. Τα αποτελέσματα (mg/L) COD ορίζονται ως τα mg του O<sub>2</sub> που καταναλώνονται ανά λίτρο δείγματος σε συνάρτηση με τις ορισμένες συνθήκες του πειράματος. Στη διαδικασία αυτή, το δείγμα θερμαίνεται για δύο ώρες με ισχυρό οξειδωτικό, διχρωμικό κάλιο. Η οξείδωση των οργανικών ενώσεων προκαλεί την αναγωγή του διχρωμικού ιόντος (Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>) και υπολογίζεται η ποσότητα του αναγόμενου πράσινου χρωμικού ιόντος (Cr<sup>3+</sup>). Η μέθοδος αυτή είναι ικανή να προσδιορίζει συγκεντρώσεις 0-150 mg/l COD.

COD			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	3 mg/l	5 mg/l	2 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	2 mg/l	5 mg/l	2 mg/l

**Πίνακας 2.41:** Αποτελέσματα μέτρησης του COD με τη χρήση του φασματοφωτομέτρου

Από τα αποτελέσματα μέτρησης του COD παρατηρούμε ότι η μικρότερη τιμή COD αντιστοιχεί στο νερό αντίστροφης ώσμωσης. Ωστόσο η διαφορά δεν είναι μεγάλη σε σχέση με το δείγμα του νερού γεώτρησης. Το δείγμα του νερού απόβλητου όμως έχει σχεδόν την διπλάσια τιμή, γεγονός

που υποδηλώνει την ικανότητα της μεθόδου της αντίστροφης ώσμωσης να ελαττώνει και την τιμή COD.

### 3.6 Μέτρηση TOC

Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης του ολικού οργανικού άνθρακα πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του φασματοφωτομέτρου. Οι τιμές του TOC είναι ενδεικτικές για πιθανή μόλυνση του δείγματος νερού από λύματα και άλλα απόβλητα. Η μέθοδος περιλαμβάνει την οξειδωση του άνθρακα του δείγματος σε διοξείδιο του άνθρακα παρουσία υπερθειϊκού διαλύματος. Το διοξείδιο του άνθρακα διαχέεται σε ένα δείκτη-διάλυμα που είναι ενδεικτικό της τιμής pH του διαλύματος, όπου και σε ανθρακικό οξύ. Η προκύπτουσα αλλαγή χρώματος είναι ανάλογη προς της συγκέντρωσης του άνθρακα στο δείγμα. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή μπορεί να γίνει προσδιορισμός TOC συγκεντρώσεων 5.0 – 80 mg/l.

TOC		
Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
49,0 mg/l	Εκτός ορίων	0 mg/l

**Πίνακας 2.42:** Αποτελέσματα μέτρησης του TOC με τη χρήση του φασματοφωτομέτρου

Από τα αποτελέσματα μέτρησης του COD παρατηρούμε ότι η τιμή COD στο νερό αντίστροφης ώσμωσης είναι μηδενική. Αντίθετα η τιμή του νερού γεώτρησης είναι σχετικά μεγάλη. Η τιμή του δείγματος του απόβλητου νερού όμως βρίσκεται εκτός ορίων, γεγονός που υποδηλώνει την ικανότητα της μεθόδου της αντίστροφης ώσμωσης να ελαττώνει και την τιμή COD.

### 3.7 Μέτρηση ολικών στερεών

Η μέτρηση των ολικών διαλυμένων στερεών πραγματοποιήθηκε με το αγωγιμόμετρο. Το όργανο μετρά συγκεντρώσεις 0.1 mg/L - 199.9 g/L.

<b>TDS</b>			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	498 mg/l	898 mg/l	10,31 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	498 mg/l	904 mg/l	10,24 mg/l
3 <sup>η</sup> μέτρηση	498 mg/l	905 mg/l	10,52 mg/l

**Πίνακας 2.43:** Αποτελέσματα μέτρησης των ολικών στερεών με τη χρήση του αγωγιμόμετρου.

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα διαπιστώνουμε ότι η τιμή των ολικών διαλυμένων στερεών του νερού γεώτρησης είναι κοντά στα ανώτατα επιθυμητά όρια 500 mg/l. Άνω αυτής της τιμής το νερό αποκτά μια ιδιαίτερη γεύση. Το νερό αντίστροφης ώσμωσης έχει πολύ χαμηλή τιμή, αντίθετα με το απόβλητο νερό, όπου βρίσκεται συγκεντρωμένη όλη η ποσότητα των απομακρυσμένων ολικών διαλυμένων στερεών.

### 3.8 Μέτρηση $\text{NO}_3^-$

Η μέτρηση των ανιόντων  $\text{NO}_3^-$  πραγματοποιήθηκε με δύο μεθόδους. Η μία με τη χρήση του ανακλασιμέτρου (Reflectometer) και η άλλη μέθοδος εκτελέστηκε με τη χρήση του φασματοφωτομέτρου HACH. Η μέθοδος προσδιορισμού των  $\text{NO}_3^-$  βασίζεται σε μια αντίδραση αναγωγής, που πραγματοποιείται παρουσία του μετάλλου καδμίου. Τα αναγόμενα  $\text{NO}_2^-$  στη συνέχεια αντιδρούν με το σουλφανιλικό οξύ σε όξινο περιβάλλον, σχηματίζοντας ένα ενδιάμεσο διαζωνικό άλας. Το άλας ενώνεται με το γεντισικό οξύ για να σχηματίσει ένα πορτοκαλί προϊόν Amber.

- Ανακλασίμετρο

Η ένταση χρώματος είναι ενδεικτική της συγκέντρωσης των  $\text{NO}_3^-$ . Το όργανο είναι κατάλληλο για συγκεντρώσεις 3-90 mg/l. Στην περίπτωση του νερού αντίστροφης όσμωσης, οι μετρήσεις των  $\text{NO}_3^-$  είναι εκτός ορίων.

$\text{NO}_3^-$			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	29 mg/l	50 mg/l	1 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	30 mg/l	51 mg/l	1 mg/l
3 <sup>η</sup> μέτρηση	28 mg/l	49 mg/l	1 mg/l

**Πίνακας 2.44:** Αποτελέσματα των συγκεντρώσεων των  $\text{NO}_3^-$  σύμφωνα με το ανακλασίμετρο.

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα, διαπιστώνουμε ότι η χαμηλότερη συγκέντρωση των ιόντων  $\text{NO}_3^-$  αντιστοιχεί στο νερό της αντίστροφης ώσμωσης, ενώ οι συγκεντρώσεις του απόβλητου νερού είναι υψηλές. Οι τιμές αυτές υποδηλώνουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου της αντίστροφης ώσμωσης. Οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων του νερού γεώτρησης βρίσκονται μέσα στα επιθυμητά όρια.

- Φασματοφωτόμετρο

Η μέτρηση των  $\text{NO}_3^-$ -N με τη χρήση του φασματοφωτομέτρου πραγματοποιείται σε μήκος κύματος 500 nm. Το όργανο έχει εύρος συγκεντρώσεων 0.00-30.0 mg/l  $\text{NO}_2^-$  - N.

$\text{NO}_3^-$ -N			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	6,8 mg/l	9,2 mg/l	1,7 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	6,5 mg/l	9,7 mg/l	1,4 mg/l
3 <sup>η</sup> μέτρηση	6,6 mg/l	9,0 mg/l	1,5 mg/l

**Πίνακας 2.45:** Αποτελέσματα των συγκεντρώσεων των  $\text{NO}_3^-$ -N σύμφωνα με το φασματοφωτόμετρο.

NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	29,9 mg/l	40,7 mg/l	7,3 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	28,9 mg/l	43,0 mg/l	6,2 mg/l
3 <sup>η</sup> μέτρηση	29,2 mg/l	39,7 mg/l	6,6 mg/l

**Πίνακας 2.46:** Αποτελέσματα των συγκεντρώσεων των NO<sub>3</sub><sup>-</sup> σύμφωνα με το φασματοφωτόμετρο.

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρούμε ότι οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις NO<sub>3</sub><sup>-</sup> αντιστοιχούν στα δείγματα του νερού αντίστροφης ώσμωσης. Τόσο οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων του νερού γεώτρησης όσο και του απόβλητου νερού είναι υψηλές, ωστόσο βρίσκονται μέσα στα επιθυμητά και ανώτατα επιτρεπτά όρια της νομοθεσίας (25 και 50 mg/l αντίστοιχα). Ο ΠΟΥ έχει ορίσει ανώτατο όριο τα 10 mg/l πέρα από τα οποία υπάρχει κίνδυνος για την υγεία. Ο ανώτατες τιμές είναι δυνατό να οφείλονται σε αστικά ή βιομηχανικά απόβλητα, διαρροές από χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, χρήση αζωτούχων λιπασμάτων σε αγροτικές περιοχές και ζωικά απόβλητα.

### 3.9 Μέτρηση NO<sub>2</sub><sup>-</sup>

Ο προσδιορισμός των NO<sub>2</sub><sup>-</sup> πραγματοποιήθηκε με δυο μεθόδους, με τη χρήση του ανακλασιμέτρου και με το φασματοφωτόμετρο. Ο προσδιορισμός των ανιόντων NO<sub>2</sub><sup>-</sup> βασίζεται στην αντίδραση των NO<sub>2</sub><sup>-</sup> με το σουλφανιλικό οξύ προς σχηματισμό ενός ενδιάμεσου διαζωνικού άλατος. Το άλας στη συνέχεια δεσμεύεται με το χρωμοτροπικό οξύ και παράγεται ένα σύμπλοκο. Το διάλυμα αποκτά ένα ροζ χρώμα, η ένταση του οποίου είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των NO<sub>2</sub><sup>-</sup>. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων απεικονίζονται παρακάτω:

- Ανακλασίμετρο

NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
------------------------------



	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	0,02 mg/l	0,04 mg/l	0,02 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	0,03 mg/l	0,03 mg/l	0,00 mg/l
3 <sup>η</sup> μέτρηση	0,02 mg/l	0,03 mg/l	0,01 mg/l

**Πίνακας 2.47:** Αποτελέσματα της συγκέντρωσης του  $\text{NO}_2^-$  σύμφωνα με τη μέθοδο του ανακλασιμέτρου.

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα διαπιστώνουμε ότι το νερό αντίστροφης ώσμωσης έχει μικρές συγκεντρώσεις ιόντων  $\text{NO}_2^-$ , ωστόσο όχι από τις μικρότερες τιμές. Από τις τιμές των συγκεντρώσεων  $\text{NO}_2^-$  στο νερό απόβλητο, οι οποίες είναι και οι υψηλότερες, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης ήταν αποτελεσματική στην απομάκρυνση των ιόντων  $\text{NO}_2^-$ .

- Φασματοφωτόμετρο

Η μέτρηση των  $\text{NO}_2^-$ -N με τη χρήση του φασματοφωτομέτρου πραγματοποιείται σε μήκος κύματος 507 nm. Το όργανο έχει εύρος συγκεντρώσεων 0.00-0.300 mg/l  $\text{NO}_2^-$  - N.

<b><math>\text{NO}_2^-</math> - N</b>			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	0,014 mg/l	0,013 mg/l	0,011 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	0,013 mg/l	0,014 mg/l	0,012 mg/l
3 <sup>η</sup> μέτρηση	0,014 mg/l	0,014 mg/l	0,012 mg/l

**Πίνακας 2.48:** Αποτελέσματα της συγκέντρωσης του  $\text{NO}_2^-$  -N σύμφωνα με τη μέθοδο του φασματοφωτομέτρου.

<b><math>\text{NO}_2^-</math></b>			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	0,045 mg/l	0,044 mg/l	0,036 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	0,041 mg/l	0,046 mg/l	0,038 mg/l

3 <sup>η</sup> μέτρηση	0,045 mg/l	0,046 mg/l	0,040 mg/l
------------------------	------------	------------	------------

**Πίνακας 2.49:** Αποτελέσματα της συγκέντρωσης του NO<sub>2</sub><sup>-</sup> σύμφωνα με τη μέθοδο του φασματοφωτομέτρου.

Παρατηρώντας τους παραπάνω πίνακες μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις NO<sub>2</sub><sup>-</sup> ανήκουν στα δείγματα του νερού της αντίστροφης ώσμωσης. Οπότε η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης είναι αποτελεσματική για την απομάκρυνση των NO<sub>2</sub><sup>-</sup>. Η συγκέντρωση των NO<sub>2</sub><sup>-</sup> δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1 mg/l.

### 3.10 Μέτρηση Ca<sup>+2</sup>

- Ανακλασίμετρο (Reflectometer)

Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης του ασβεστίου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του ανακλασιμέτρου. Η μέθοδος βασίζεται στην αντίδραση των ιόντων ασβεστίου με τη φθαλεΐνη. Η παρουσία μωβ χρώματος στο διάλυμα πιστοποιεί την πραγματοποίηση της αντίδρασης. Το ανακλασίμετρο έχει εύρος συγκέντρωσης αμμωνιακών ιόντων 5 – 125 mg/l Ca<sup>+2</sup>. Πρέπει να σημειωθεί ότι το νερό απόβλητο είχε πολύ υψηλή συγκέντρωση ασβεστίου και έτσι χρειάστηκε να αραιωθεί.

Ca <sup>+2</sup>			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	77 mg/l	168 mg/l	<5 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	80 mg/l	160 mg/l	<5 mg/l
3 <sup>η</sup> μέτρηση	78 mg/l	170 mg/l	<5 mg/l

**Πίνακας 2.50:** Αποτελέσματα της συγκέντρωσης του Ca<sup>+2</sup> σύμφωνα με τη μέθοδο του ανακλασιμέτρου.

Παρατηρώντας τον πίνακα 2.50 παρατηρούμε ότι η υψηλότερη συγκέντρωση των ιόντων ασβεστίου υπάρχει στο νερό απόβλητο. Αντίθετα

στο νερό αντίστροφης ώσμωσης η συγκέντρωση είναι πολύ χαμηλή. Αυτό αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου της αντίστροφης ώσμωσης στην απομάκρυνση του ασβεστίου. Γενικότερα αποδεκτό θεωρείται ένα δείγμα νερό με συγκέντρωση κάτω των 100 mg/l.

### 3.11 Μέτρηση $Mg^{+2}$

- Ανακλασίμετρο

Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης του ασβεστίου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του ανακλασιμέτρου. Η μέθοδος βασίζεται στην αντίδραση των ιόντων μαγνησίου με την φθαλεΐνη, που οδηγεί στην εμφάνιση μιας μωβ απόχρωσης στο διάλυμα. Το όργανο προσδιορίζει συγκεντρώσεις 5 – 100 mg/l  $Mg^{+2}$ .

$Mg^{+2}$			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	28 mg/l	62 mg/l	<5 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	27 mg/l	65 mg/l	<5 mg/l
3 <sup>η</sup> μέτρηση	29 mg/l	62 mg/l	<5 mg/l

**Πίνακας 2.51:** Αποτελέσματα της συγκέντρωσης  $Mg^{+2}$  σύμφωνα με τη μέθοδο του ανακλασιμέτρου.

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι η υψηλότερη συγκέντρωση των ιόντων μαγνησίου υπάρχει στο νερό απόβλητο. Αντίθετα στο νερό αντίστροφης ώσμωσης η συγκέντρωση είναι πολύ χαμηλή. Αυτό αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου της αντίστροφης ώσμωσης στην απομάκρυνση του ασβεστίου. Οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων του νερού γεώτρησης είναι σχετικά υψηλότερες, ωστόσο βρίσκονται μέσα στα

επιθυμητά και ανώτατα επιτρεπτά όρια της νομοθεσίας (30 και 50 mg/l αντίστοιχα).

### 3.12 Μέτρηση $\text{NH}_4^+$

- Reflectometer

Παρακάτω απεικονίζονται τα αποτελέσματα από τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των  $\text{NH}_4^+$  με τη βοήθεια του οργάνου του ανακλασιμέτρου. Το ανακλασίμετρο παρουσιάζει όριο ευαισθησίας για συγκεντρώσεις 0,2 – 7,0 mg/l  $\text{NH}_4^+$ . Η μέθοδος στηρίζεται στην αντίδραση των ιόντων αμμωνίου με έναν χλωριωντικό παράγοντα για το σχηματισμό μονοχλωραμινών. Στη συνέχεια το προϊόν αυτό αντιδρά με μια φαινολική ένωση για το σχηματισμό ενός μπλε ινδοφαινολικού παραγώγου. Η ένταση του χρώματος προσδιορίζεται με το ανακλασίμετρο.

$\text{NH}_4^+$			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	0,4 mg/l	0,4 mg/l	0,3 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	0,4 mg/l	0,4 mg/l	0,3 mg/l
3 <sup>η</sup> μέτρηση	0,4 mg/l	0,3 mg/l	0,3 mg/l

**Πίνακας 2.52:** Αποτελέσματα της συγκέντρωσης των  $\text{NH}_4^+$  σύμφωνα με τη μέθοδο του ανακλασιμέτρου.

Παρατηρώντας τον πίνακα 2.52 διαπιστώνουμε ότι δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές στις τιμές των αμμωνιακών ιόντων μεταξύ του νερού γεώτρησης, του απόβλητου νερού και του νερού αντίστροφης ώσμωσης. Σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία, στη χώρα μας, η ανώτατη παραδεκτή συγκέντρωση ιόντων αμμωνίου στο πόσιμο νερό, είναι 0,5 ml/ l. Η μέθοδος

της αντίστροφης ώσμωσης φαίνεται ότι βοηθά στην ελάττωση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών ιόντων κατά 1 βαθμό.

### 3.13 Μέτρηση $\text{SO}_4^{-2}$

Η μέτρηση των  $\text{SO}_4^{-2}$  με τη χρήση του φασματοφωτομέτρου πραγματοποιείται σε μήκος κύματος 450 nm. Το όργανο έχει εύρος συγκεντρώσεων 0 - 70 mg/l  $\text{SO}_4^{-2}$ . Η μέθοδος στηρίζεται στην αντίδραση των θειϊκών ιόντων με το βάριο με τη χρήση του αντιδραστηρίου Sulfate Ver 4, σχηματίζοντας ένα αδιάλυτο σύμπλοκο. Προκαλείται μια θολερότητα στο διάλυμα, η ένταση της οποίας είναι ενδεικτική της συγκέντρωσης του  $\text{SO}_4^{-2}$ .

$\text{SO}_4^{-2}$			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	35 mg/l	64 mg/l	4 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	34 mg/l	62 mg/l	4 mg/l
3 <sup>η</sup> μέτρηση	35 mg/l	62 mg/l	5 mg/l

**Πίνακας 2.53:** Αποτελέσματα της συγκέντρωσης  $\text{SO}_4^{-2}$  σύμφωνα με τη μέθοδο του φασματοφωτομέτρου.

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι η υψηλότερη συγκέντρωση των θειϊκών ιόντων υπάρχει στο νερό απόβλητο. Αντίθετα στο νερό αντίστροφης ώσμωσης η συγκέντρωση είναι πολύ χαμηλή. Αυτό αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου της αντίστροφης ώσμωσης στην απομάκρυνση των θειϊκών ιόντων. Οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων του νερού γεώτρησης είναι σχετικά υψηλότερες από του νερού αντίστροφης ώσμωσης, ωστόσο βρίσκονται μέσα στα επιθυμητά και ανώτατα επιτρεπτά όρια της νομοθεσίας (25 και 250 mg/l αντίστοιχα).

### 3.14 Μέτρηση $\text{SO}_3^{-2}$

Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των ιόντων  $\text{SO}_3^{-2}$  πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του ανακλασιμέτρου. Η μέθοδος βασίζεται

στην αντίδραση των ιόντων  $\text{SO}_3^{-2}$  με ένα μείγμα εξακυανικού σιδηρικού καλίου, θειϊκού ψευδαργύρου και νιτροπρωσικού καλίου. Το αποτέλεσμα της αντίδρασης ανιχνεύεται με τον κόκκινο χρωματισμό του διαλύματος. Το όργανο έχει εύρος συγκέντρωσης από 10 έως 200 mg/l  $\text{SO}_3^{-2}$ .

$\text{SO}_3^{-2}$			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	<10 mg/l	<10 mg/l	<10 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	<10 mg/l	<10 mg/l	<10 mg/l
3 <sup>η</sup> μέτρηση	<10 mg/l	<10 mg/l	<10 mg/l

**Πίνακας 2.54:** Αποτελέσματα της συγκέντρωσης  $\text{SO}_4^{-3}$  σύμφωνα με τη μέθοδο του ανακλασιμέτρου.

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις και των τριών δειγμάτων νερού έδωσαν χαμηλές συγκεντρώσεις. Όλα τα δείγματα περιείχαν χαμηλές συγκεντρώσεις  $\text{SO}_3^{-2}$ , συνεπώς τα αποτελέσματα αυτά δεν μπορούν να αξιολογηθούν ως ενδεικτικά της αποτελεσματικότητας της μεθόδου.

### 3.15 Μέτρηση $\text{K}^+$

- Ανακλασίμετρο

Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης του ασβεστίου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του ανακλασιμέτρου. Η μέθοδος βασίζεται στην αντίδραση των ιόντων καλίου με το Kalignost (τριφαινυλο βορικό νάτριο), που καταλήγει στο σχηματισμό ενός ελαφρά διαλυτού συμπλόκου. Παρατηρήθηκε ότι μετά την προσθήκη των αντιδραστηρίων, προκαλείται θολερότητα στο δείγμα, ανάλογης της συγκέντρωσης του  $\text{K}^+$ . Το όργανο έχει εύρος συγκεντρώσεων 1,0 – 25,0 mg/l  $\text{K}^+$ .

<b>K<sup>+</sup></b>			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	1,5 mg/l	2,6 mg/l	<1.0 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	1,7 mg/l	2,6 mg/l	<1.0 mg/l
3 <sup>η</sup> μέτρηση	1,5 mg/l	2,6 mg/l	<1.0 mg/l

**Πίνακας 2.55:** Αποτελέσματα της συγκέντρωσης K<sup>+</sup> σύμφωνα με τη μέθοδο του ανακλασιμέτρου.

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις καλίου αντιστοιχούν στα δείγματα του νερού αντίστροφης ώσμωσης, υποδηλώνοντας για ακόμα μια φορά την αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Τόσο οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων του νερού γεώτρησης όσο και του απόβλητου νερού είναι σχετικά υψηλότερες, ωστόσο βρίσκονται μέσα στα επιθυμητά και ανώτατα επιτρεπτά όρια της νομοθεσίας (10 και 12 mg/l αντίστοιχα). Η συγκέντρωση του καλίου επηρεάζεται από ορυκτά, λιπάσματα και το θαλασσινό νερό.

### 3.16 Μέτρηση PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>

Η μέθοδος προσδιορισμού των PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> βασίζεται στην αντίδραση των ορθοφωσφορικών ιόντων με τα ιόντα του μολυβδαινίου σε θειϊκό διάλυμα σχηματίζοντας μολυβδοφωσφορικό οξύ που ανάγεται σε φωσφομολυβδαινικό σύμπλοκο (PBP). Η μέτρηση με τη χρήση του ανακλασιμέτρου και του φασματοφωτομέτρου.

- Ανακλασίμετρο

Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του ανακλασιμέτρου. Το όργανο προσδιορίζει εύρος συγκεντρώσεων 0,1 – 5,0 mg/l PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>.

<b>PO<sub>4</sub><sup>-3</sup></b>
------------------------------------

	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	0,3 mg/l	0,8 mg/l	0,2 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	0,3 mg/l	0,8 mg/l	0,1 mg/l
3 <sup>η</sup> μέτρηση	0,3 mg/l	0,7 mg/l	0,2 mg/l

**Πίνακας 2.56:** Αποτελέσματα της συγκέντρωσης  $\text{PO}_4^{-3}$  σύμφωνα με τη μέθοδο του ανακλασιμέτρου.

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις  $\text{PO}_4^{-3}$  αντιστοιχούν στα δείγματα του νερού αντίστροφης ώσμωσης, υποδηλώνοντας για ακόμα μια φορά την αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Τόσο οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων του νερού γεώτρησης όσο και του απόβλητου νερού είναι σχετικά υψηλότερες, ωστόσο βρίσκονται μέσα στα επιθυμητά και ανώτατα επιτρεπτά όρια της νομοθεσίας (10 και 12 mg/l αντίστοιχα).

- Φασματοφωτόμετρο

Η μέτρηση των  $\text{PO}_4^{-3}$  με τη χρήση του φασματοφωτομέτρου πραγματοποιείται σε μήκος κύματος 880 nm. Το όργανο έχει εύρος συγκεντρώσεων 0.00-5.00 mg/l  $\text{PO}_4^{-3}$ .

<b><math>\text{PO}_4^{-3}</math></b>			
	Νερό γεώτρησης	Νερό απόβλητο	Νερό αντίστροφης ώσμωσης
1 <sup>η</sup> μέτρηση	0,30 mg/l	0,77 mg/l	0,16 mg/l
2 <sup>η</sup> μέτρηση	0,26 mg/l	0,80 mg/l	0,17 mg/l
3 <sup>η</sup> μέτρηση	0,28 mg/l	0,71 mg/l	0,18 mg/l

**Πίνακας 2.57:** Αποτελέσματα της συγκέντρωσης  $\text{PO}_4^{-3}$  σύμφωνα με τη μέθοδο του φασματοφωτομέτρου.

Παρατηρώντας τον πίνακα 2.57 παρατηρούμε ότι η υψηλότερη συγκέντρωση των ορθοφωσφορικών ιόντων υπάρχει στο νερό απόβλητο. Αντίθετα στο νερό αντίστροφης ώσμωσης η συγκέντρωση είναι πολύ χαμηλή. Αυτό αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου της αντίστροφης



ώσμωσης στην απομάκρυνση των ορθοφωσφορικών ιόντων. Το ανώτατο επιτρεπτό όριο των φωσφορικών στο επιφανειακό νερό σύμφωνα με τη νομοθεσία είναι 0,4-0,7 mg/l. Οι υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να οφείλονται στην αποσύνθεση των οργανικών υλών, τη ρύπανση από φωσφορικά λιπάσματα, ακόμα και αστικά λύματα.

#### 4. Συμπεράσματα

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη μιας μονάδας αντίστροφης ώσμωσης. Για να αξιολογηθεί η απόδοση του συστήματος εκτελέστηκαν μια σειρά από πειράματα με τη χρήση των κατάλληλων οργάνων και αντιδραστηρίων. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών αξιοποιήθηκαν, κρίνοντας την ποιότητα του παραγόμενου νερού. Το νερό αυτό συγκρίθηκε με το αρχικό δείγμα νερού, καθώς και το απόβλητο νερό.

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του pH, της ολικής σκληρότητας, των χλωριόντων ( $\text{Cl}^-$ , ελεύθερη και ολική συγκέντρωση  $\text{Cl}_2$ ), των ολικών στερεών, της αγωγιμότητας, αλατότητας, θρεπτικών αλάτων ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ), του χημικά απαιτούμενου COD, του ολικού οργανικού άνθρακα TOC, καθώς και των ιόντων  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  και του  $\text{Mg}^{+2}$ .

Από την προσεκτική μελέτη των αποτελεσμάτων καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η πιλοτική μονάδα της αντίστροφης είναι μια ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος για την απομάκρυνση των ανεπιθύμητων ουσιών και της βελτίωσης της ποιότητας του παρεχόμενου νερού. Συγκεκριμένα η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης πέτυχε να μείωσε στο ελάχιστο τόσο τη σκληρότητα του νερού όσο και τη συγκέντρωση των χλωριόντων. Η αγωγιμότητα παρουσίασε επίσης σημαντική μείωση, ενώ η αλατότητα μηδενίστηκε. Σημαντική μείωση επίσης προκλήθηκε και στη τιμή του TOC, ενώ η τιμή του COD δεν παρουσίασε αξιόλογη μείωση. Επιπροσθέτως, η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης προκάλεσε αισθητή πτώση στην τιμή των ολικών διαλυμένων στερεών. Σχετικά με την συγκέντρωση των  $\text{NO}_3^-$  σύμφωνα με τα αποτελέσματα παρατηρείται πτώση στην τιμή τους, πράγμα που δεν παρατηρείται όμως για τη συγκέντρωση των  $\text{NO}_2^-$ . Όσον αφορά τα ιόντα, η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης προκαλεί ελάττωση στη συγκέντρωση των ιόντων  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$  και  $\text{SO}_4^{-2}$ , ενώ δεν έχει μεγάλη επίδραση στη συγκέντρωση των ιόντων  $\text{NH}_4^+$  και  $\text{SO}_3^{-2}$ .

Εν κατακλείδι όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω επιβεβαιώνουν την εφαρμογή της μεθόδου της αντίστροφης ώσμωσης σε συστήματα

επεξεργασίας του νερού. Ωστόσο χρειάζεται περαιτέρω ερευνητική μελέτη για την τελειοποίηση του συστήματος. Όπως θα πρέπει να δοθεί έμφαση στο νερό απόβλητο, για να μην είναι προκαλεί η απόρριψη του μόλυνση στο περιβάλλον.

## 5. Βιβλιογραφία

Ξένη

- Cadotte J. E., 1981, Interfacially Synthetized Reverse Osmosis Membrane, US Patent 4,277,344
- Cheremisinoff Nicholas P., 2002, Handbook of water and wastewater treatment technologies, Butterworth-Heinemann, USA
- Cunningham – Saigon, 2001, Environmental Science, A global concern, McGraw-Hill Companies
- Duranceau Steven J., 2009, Desalination Post-Treatment Considerations, Florida water Resources Journal
- Goosen M. F. A., Sablani S. S., Al-Hinai H., Al-Obeidani S., Al-Belushi R. and D. Jackson, 2004, Fouling Of Reverse Osmosis And Ultrafiltration Membranes: A Critical Review, *Separation Science and Technology, Volume 39 (10) pp 2261-2298 (Marcel Dekker)*
- Kamiyama Y., Yoshioki N., Matsui K. and Nakagome K., (1984), New Thin Film Composite Reverse Osmosis Membranes And Spiral Wound Molecules, *Desalination* 51, 79
- Karagiannis Ioan. C., Soldatos Pet. G., (2007), Current status of water desalination in the Aegean Islands, *Desalination* 203 56–61
- Khawaji Akili D., Kutubkhanah Ibrahim K., Wie Jong-Mihn, 2008, Advances in seawater desalination technologies, *Desalination* 221 47–69
- Loeb S. and Sourirajan S., (1963), Sea Water Demineralization by Means of an Osmotic Membrane, in *Saline Water Conversion II*, R.F. Gould (ed.), *Advances in Chemistry Series Number 38*, American Chemical Society, Washington DC, pp. 117-132
- Reid C.E. and Breton E.J., *Water and Ion Flow Across Cellulosic Membranes*, *J. Appl. Polym. Sci.* 1, 133 (1959)
- Robert C. Rosaler, *Standard handbook of plant engineering*, 3<sup>rd</sup> edition, McGraw Hill, 2002, USA
- Skoog, Holler, Nieman, 2002, *Αρχές της Ενόργανης Ανάλυσης* (M. I. Καραγιάννης, K. H. Ευσταθίου, N. Χανιωτάκης), Εκδόσεις Κωσταράκης, Αθήνα

- Venkateswarlu K.S., 1996, Industrial and Power Station Water Treatment, New Age International, New Delhi
- Williams Michael E., 2003i, A Brief Review of Reverse Osmosis Membrane Technology, EET Corporation and Williams Engineering Services Company
- Williams Michael E., 2003ii, Review of Reverse Osmosis Theory, Williams Engineering Services Company, (<http://www.wescinc.com>)

## Ελληνική

- Αλεξάκης Αλέξανδρος Σ., 2003, Αφαλάτωση, Εκδόσεις Σιδέρη, Αθήνα, 2003
- Γεωργόπουλος Α., 2001, Γη ένας μικρός και εύθραυστος πλανήτης, Εκδόσεις Gutenberg, Αθήνα,
- Γκέκας Χ. Βασίλειος Χ., Σπυριδούλα Γ. Πρωϊμάκη, 2002, Φυσικοχημικές διεργασίες διαχωρισμών, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη
- Δεληγιάννη Ε., Μπελεσιώτης Β., 1995, Μέθοδοι και συστήματα αφαλάτωσης, Αθήνα
- Εσσάμ Σααμπάν Μωχάμεντ, 2009, Διερεύνηση τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για αφαλάτωση του θαλασσινού νερού με αντίστροφη ώσμωση, Διδακτορική διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα
- Ζανάκη Κ., 1996, Έλεγχος ποιότητας νερού, Εκδόσεις "ΙΩΝ", Αθήνα
- Καραϊσκάκης Γεώργιος Σ., 1998, Φυσικοχημεία, Εκδοτικός οίκος Τραυλός, Αθήνα
- Κλούρας Δ. Νικόλαος, 1995, Βασική Ανόργανη Χημεία, Εκδόσεις Τραυλός, Αθήνα
- Λυδάκης-Σημαντήρης Νικόλαος, 2007, Γενική Χημεία και Ενόργανη Ανάλυση: Θέματα και Εργαστηριακές Ασκήσεις, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη
- Μήτρακα Μ., 2001, Ποιοτικά χαρακτηριστικά και Επεξεργασία Νερού, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη
- Νταρακάς Ευθύμιος Νικ., 2009, Βασικές παράμετροι ελέγχου ποιότητας νερού και λυμάτων, Υδρεύσεις – αποχετεύσεις, Τεχνική περιβάλλοντος, Σημειώσεις για τη θεωρία και τα εργαστήρια των μαθημάτων, Τομέας

υδραυλικής & τεχνικής περιβάλλοντος, Τμήμα πολιτικών μηχανικών,  
Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2009

Σταυρουλάκης Γ, 2007, Εγχειρίδιο Εργαστηρίου Τεχνολογίας Ελέγχου  
Ποιότητας Νερού, Τμήμα Φυσικών πόρων και περιβάλλοντος, Τ.Ε.Ι  
Κρήτης