

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΑΠΟΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΥΦΑΛΜΥΡΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ  
NANOΔΙΗΘΗΣΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Του Δημητρίου.Μ.Καρακωστή

Εξεταστική Επιτροπή  
Θεόδωρος Μαρκόπουλος, Καθηγητής (επιβλέπων)  
Βασίλειος Γκέκας, Καθηγητής  
Εμμανουήλ Μανούτσογλου, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΧΑΝΙΑ  
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2009



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη μεμβρανών νανοδιήθησης ως προς την καταλληλότητα τους στην αποσκλήρυνση υφάλμυρου νερού.

Στην Ελλάδα σε πολλές περιοχές υπάρχουν εμφανίσεις καρστικών σχηματισμών καθώς και ανθρακικών πετρωμάτων όπου συμβάλλουν στην αύξηση της ολικής σκληρότητας των φυσικών νερών. Επίσης στις παράκτιες περιοχές της Ελλάδος παρατηρείται επαφή ή εισχώρηση του θαλασσινού νερού σε υδροφόρα στρώματα. Οι υπάρχοντες μέθοδοι, θεωρούνται οικονομικά ασύμφοροι, λόγω των αυξημένων απαιτήσεων σε ενέργεια.

Τα πειράματα για την αξιολόγηση των μεμβρανών νανοδιήθησης έγιναν στο Εργαστήριο Φαινομένων Μεταφοράς & Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής. Για την διεκπεραίωση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η μονάδα DssLabStak M20.

## **ABSTRACT**

The purpose of this final project is the study of nanofiltration membranes and their suitability in the process of softening subsaline water, as an alternative to the existing methods which are considered financially impractical due to the increased demands in energy.

In many regions of Greece there are appearances of karstic formations as well as carbonic rocks which contribute to the increase of hardness of natural water. Also in the coastal regions of Greece, occurrences are found of the intrusion of the sea water in aquifers.

The experiments carried out for the evaluation of the membranes of nanofiltration took place in the Laboratory of the Transport Phenomena and Environmental Thermodynamics, and were processed with the DssLabStak M20 unit.

## **ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Βασίλειο Γκέκα και τον καθηγητή Θεόδωρο Μαρκόπουλο για την καθοδήγηση, επίβλεψη και συνεισφορά σε όλα τα στάδια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Όπως επίσης και τον αναπληρωτή καθηγητή Εμμανουήλ Μανούτσογλου για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μεταπτυχιακό φοιτητή Γεώργιο Φουντούλη, ο οποίος με βοήθησε να προσαρμοστώ στο Εργαστήριο παρέχοντας μου όλες τις πληροφορίες και συμβουλές κατά την διάρκεια των πειραμάτων.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....                                                                         | 9  |
| 1.1. Υφάλμυρο νερό .....                                                                          | 9  |
| 1.2. Επαφή γλυκού – αλμυρού νερού: έννοιες και ορολογία.....                                      | 10 |
| 1.3. Στατική ισορροπία της διεπιφάνειας: Νόμος των Ghyben-Herzberg .....                          | 11 |
| <br>                                                                                              |    |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ : ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΩ .....                         | 15 |
| 2.1. Ορισμός της Μembrάνης .....                                                                  | 15 |
| 2.2. Διεργασίες Μembrανών .....                                                                   | 16 |
| 2.3. Ορολογία της διεργασίας μεμβανών με ωθούσα δύναμη την πίεση.....                             | 20 |
| 2.4 Τρόποι λειτουργίας.....                                                                       | 21 |
| 2.5 Όροι απόδοσης της μεμβράνης (Membrane performance parameters) .....                           | 22 |
| 2.6 Ασυνεχής και Συνεχής Λειτουργία.....                                                          | 25 |
| 2.7 Όροι απόδοσης σε επίπεδο εγκατάστασης .....                                                   | 27 |
| 2.8 Πόλωση της συγκέντρωσης (concentration polarization) – φαινόμενο «στομώματος» (fouling) ..... | 27 |
| 2.8.1 Πόλωση συγκέντρωσης -ΠΣ (concentration polarization - CP) .....                             | 28 |
| 2.8.2 Το φαινόμενο του στομώματος .....                                                           | 33 |
| 2.8.3 Σύγκριση φαινομένου πόλωσης συγκέντρωσης και «στομώματος» .....                             | 36 |
| 2.8.4 Τρόποι Αντιμετώπισης .....                                                                  | 38 |
| <br>                                                                                              |    |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ – ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ .....                                               | 39 |
| 3.1 Ορισμός Σκληρότητας.....                                                                      | 39 |
| 3.1.1 Άλατα σκληρότητας .....                                                                     | 39 |
| 3.1.2 Χαρακτηρισμός σκληρότητας .....                                                             | 40 |
| 3.1.3 Βαθμοί σκληρότητας .....                                                                    | 41 |
| 3.1.4 Κατάταξη των νερών ως προς τη σκληρότητα .....                                              | 43 |
| 3.2 Μέθοδοι Αποσκλήρυνσης - Αποσκλήρυνση με χημικές ενώσεις.....                                  | 44 |
| 3.3 Αποσκλήρυνση με ανόργανους φυσικούς και τεχνητούς ανταλλάκτες.....                            | 47 |
| 3.3.1 Φυσικοί ζεόλιθοι.....                                                                       | 47 |
| 3.3.2 Τεχνητοί ζεόλιθοι - Περμουτίτες.....                                                        | 49 |
| 3.4 Αποσκλήρυνση με οργανικούς τεχνητούς ανταλλάκτες ρητίνες.....                                 | 49 |
| 3.4.1 Ρητίνες κατιονικής εναλλαγής.....                                                           | 49 |

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4.2 Ρητίνες ανιονικής εναλλαγής.....                                                    | 51 |
| 3.5 Αντίστροφη Όσμωση.....                                                                | 52 |
| 3.5.1 Αρχή της Μεθόδου.....                                                               | 52 |
| 3.5.2 Πρώτες ύλες Μembranών στην Αντίστροφη Όσμωση.....                                   | 55 |
| 3.5.2.1 Οξική κυτταρίνη.....                                                              | 55 |
| 3.5.2.2 Πολυαμιδικές μεμβράνες.....                                                       | 56 |
| 3.5.2.3 Πολυσουλφόνες (PS).....                                                           | 57 |
| 3.5.3 Μembrάνες στην Αντίστροφη όσμωση.....                                               | 58 |
| 3.5.3.1 Σωληνοειδή στοιχεία μεμβρανών (tubular module).....                               | 59 |
| 3.5.3.2 Δισκοειδή στοιχεία μεμβρανών (plate and frame modules).....                       | 60 |
| 3.5.3.3 Στοιχεία μεμβρανών σπειροειδούς περιέλιξης (spiral wound modules).....            | 61 |
| 3.5.3.4 Στοιχεία μεμβρανών κοίλων ινών (hollow fiber modules).....                        | 62 |
| 3.5.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου.....                                    | 65 |
| 3.6 Νανοδιήθηση - Εφαρμογές της Νανοδιήθησης.....                                         | 66 |
| 3.7 Πλεονεκτήματα από τη χρήση αποσκληρυμένου νερού.....                                  | 73 |
| <br>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....                                                     | 75 |
| 4.1 Περιγραφή της μονάδας.....                                                            | 75 |
| 4.2 Μembrάνες.....                                                                        | 77 |
| 4.3 Τρόπος Λειτουργίας του DSS LabStak M20.....                                           | 78 |
| 4.4 Συναρμολόγηση της μεμβράνης και του spacer (plate stack).....                         | 79 |
| 4.4.1 Βήματα Συναρμολόγησης.....                                                          | 79 |
| 4.4.2 Συμπίεση και Αποσυμπίεση της Μembrάνης.....                                         | 82 |
| 4.4.3 Έναρξη Λειτουργίας.....                                                             | 84 |
| 4.4.4 Έλεγχοι κατά την διάρκεια του πειράματος.....                                       | 85 |
| 4.4.5 Λήξη λειτουργίας της μονάδας.....                                                   | 86 |
| 4.5 Συντήρηση/Αποθήκευση Μembrανών.....                                                   | 86 |
| <br>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΚΟΠΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ - ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΝΕΡΟΥ.....                    | 88 |
| 5.1 Σκοπός πειραμάτων.....                                                                | 88 |
| 5.2 Παράμετροι χαρακτηρισμού νερού.....                                                   | 90 |
| 5.2.1 Αγωγιμότητα.....                                                                    | 90 |
| 5.2.2 Μέθοδος Μέτρησης ιόντων $\text{Ca}^{+2}$ , $\text{Mg}^{+2}$ (ολική σκληρότητα)..... | 91 |
| <br>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....                              | 93 |
| 6.1 Διαδικασία πειραμάτων.....                                                            | 93 |

|                                              |     |
|----------------------------------------------|-----|
| 6.2 Αποτελέσματα Πειραμάτων .....            | 94  |
| 6.3 Συμπεράσματα – Προτάσεις για έρευνα..... | 129 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....                            | 130 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α .....                            | 132 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β .....                            | 135 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ .....                            | 137 |



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1. Υφάλμυρο νερό

Υφάλμυρο (brackish water) ονομάζεται το νερό το οποίο έχει μεγαλύτερο ποσοστό αλατότητας από το φρέσκο νερό (fresh water) και λιγότερο ποσοστό από το θαλασσινό. Εμφανίσεις υφάλμυρου νερού υπάρχουν στα δέλτα των ποταμών, σε κλειστές ενδοκρατονικές λεκάνες καθώς και σε παράκτια υδροφόρα στρώματα.

Πίνακας 1.1 Η αλατότητα του νερού σε i)φρέσκο νερό ii)υφάλμυρο νερό iii)αλατούχο νερό και iv)θαλασσινό νερό

| Water salinity based on dissolved salts in parts per thousand (ppt) |                |              |       |
|---------------------------------------------------------------------|----------------|--------------|-------|
| Fresh water                                                         | Brackish water | Saline water | Brine |
| < 0.5                                                               | 0.5 – 30       | 30 – 50      | > 50  |

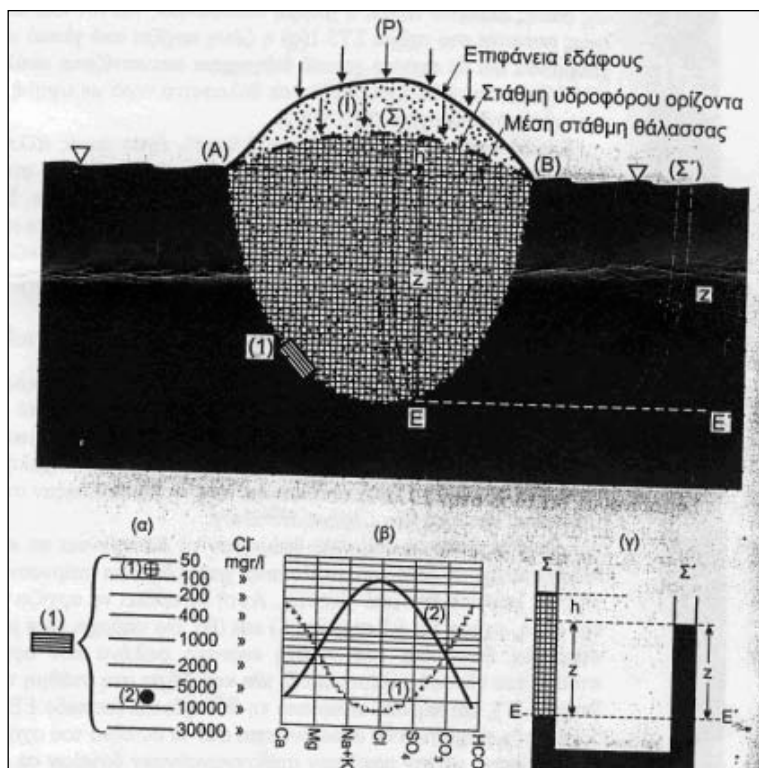
Στα υδροφόρα στρώματα που βρίσκονται δίπλα στην θάλασσα το νερό τους έρχεται σε επαφή με το θαλασσινό νερό.

Είναι γνωστό ότι το θαλασσινό νερό είναι ακατάλληλο για κάθε χρήση από τον άνθρωπο(οικιακή, βιοτεχνική, βιομηχανική, αρδευτική κ.λπ.).

Τόσο στην Ελλάδα όσο και διεθνώς οι παράκτιες περιοχές έχουν μεγαλύτερη πληθυσμιακή πυκνότητα από ότι οι ενδοχωρικές και επίσης σε αυτές παρατηρείται μεγάλη και έντονη οικονομική δραστηριότητα.

## 1.2. Επαφή γλυκού – αλμυρού νερού: έννοιες και ορολογία

Για να απλοποιήσουμε την κατάσταση δεχόμαστε ότι έχουμε ένα στρογγυλό νησί, δομημένο γεωλογικά και με ομοιόμορφο περατό υλικό. π.χ. από άμμο. Τότε το νερό της κατείσδυσης (I) θα σχηματίζει ένα υδροφόρο στρώμα από γλυκό νερό (Εικ.1.1). Επειδή το γλυκό νερό της κατείσδυσης (που προέρχεται από τη βροχή) είναι ελαφρότερο (έχει ειδικό βάρος περίπου  $\rho_{\phi} = 1.004 \text{ gr/cm}^3$ , ενώ το θαλασσινό περίπου  $\rho_{\theta} = 1.040 \text{ gr/cm}^3$ ), θα «επιπλέει» πάνω στο θαλασσινό ως ένα «παγόβουνο», Εικ.1.1. Δηλαδή το γλυκό νερό του υδροφόρου θα επιπλέει πάνω από το θαλασσινό που θα υπόκειται και θα βρίσκεται σε βαθύτερα τμήματα του υπεδάφους, όπως συμβαίνει με δύο μη μιγνύμενα υγρά. Όμως η επαφή αυτή του γλυκού νερού δεν γίνεται με μία απλή γραμμή, αλλά με μία ζώνη, Εικ.1.1(α), που στη βιβλιογραφία αναφέρεται ζώνη διεπιφάνειας, ή ζώνη διάφασης, ή ζώνη διάχυσης, ή ζώνη μετάβασης, για λόγους που αναλύονται παρακάτω. [Γενική Υδρογεωλογία-Γ τόμος, Γεώργιος Σούλιος]



Εικ.1.1 Επαφή γλυκού-αλμυρού νερού και ο νόμος των Ghyben-Herzberg.

(1) Ζώνη Μετάβασης, (α) περιεκτικότητα σε ιόντα Cl της ζώνης μετάβασης, (β) χημικό διάγραμμα από τα σημεία (1) και (2) της ζώνης μετάβασης, (γ) μανομετρικό (υδραυλικό) ισοδύναμο του της επαφής γλυκού – αλμυρού νερού. [Σούλιος, 1999]

Η ζώνη αυτή μπορεί να έχει πάχος λίγων μέτρων ως μερικών ή αρκετών δεκάδων μέτρων. Σχηματικά πολλές φορές παρουσιάζεται ως μια γραμμή. Είναι η γραμμή διάφασης γιατί είναι γραμμή επαφής δύο διαφορετικών φάσεων, της φάσης γλυκού νερού και της φάσης αλμυρού νερού, ή γραμμή διεπιφάνειας για τον ίδιο λόγο. Όπως φαίνεται στην Εικ1.1.(α), η ζώνη αρχίζει από γλυκό νερό με λίγα χλωριόντα και στο σχετικό χημικό διάγραμμα απεικονίζεται ανάλογα (Εικ1.1.β-1) και καταλήγει σχεδόν σε θαλασσινό νερό με υψηλή περιεκτικότητα χλωριόντων (Εικ1.1.β-2).

Επειδή από τη φάση του αλμυρού νερού, έστω χωρίς άλλη υδραυλική διεργασία, γίνεται μοριακή διάχυση χλωριόντων με βάση φυσικοχημικές διεργασίες για αυτό η ζώνη αυτή λέγεται και «ζώνη διάχυσης». Επίσης λέγεται και «ζώνη μετάβασης» ή και «ζώνη διάφασης» γιατί από τη μία φάση του γλυκού νερού περνάμε σε αυτήν του αλμυρού νερού. Τέλος, «ζώνη διεπιφάνειας» γιατί σχηματικά ως μια επιφάνεια χωρίζει τις δύο φάσεις. [Γενική Υδρογεωλογία-Γ τόμος, Γεώργιος Σούλιος]

### 1.3. Στατική ισορροπία της διεπιφάνειας: Νόμος των Ghyben-Herzberg

Ο πρώτος που ασχολήθηκε ιδιαίτερα με το θέμα της επαφής γλυκού-αλμυρού νερού ήταν ο Ολλανδός Ghyben (το 1889) και αυτό είναι λογικό γιατί η Ολλανδία ως «Κάτω Χώρα» αντιμετώπιζε έντονο σχετικό πρόβλημα. Επίσης ο Γερμανός Herzberg λίγο αργότερα (το 1905) ασχολήθηκε επίσης με το ίδιο πρόβλημα. Έτσι οι δύο αυτοί ερευνητές κατέληξαν στον ομώνυμο τους τύπο: τον τύπο των *Ghyben-Herzberg*.

Οι δύο αυτοί επιστήμονες θεώρησαν τη διεπιφάνεια σε στατική κατάσταση και όχι σε δυναμική κατάσταση, χωρίς δηλαδή να παίρνουν υπόψη τους τις ροές που αναγκαστικά γίνονται. Αυτή θα πρέπει να αρχίζει αναγκαστικά από την ακτή, Εικ1.1, σημεία (Α) και (Β). Θα υπάρχει τότε μία στατική ισορροπία. Θεωρούμε ένα συνεχές εικονικό σωλήνα που αρχίζει από τη στάθμη του υδροφόρου (Σημείο Σ) και καταλήγει στη στάθμη της θάλασσας (σημείο Σ'), και περνάει κάτω από τη διεπιφάνεια (επίπεδο ΕΕ') (Εικ1.1) Αυτός σχηματικά θα απεικονίζεται από το σωλήνα της Εικ1.1 γ. Σύμφωνα με την αρχή των συγκοινωνούντων δοχείων σε ένα οποιοδήποτε οριζόντιο επίπεδο, π.χ. το ΕΕ' που περνάει ακριβώς από τη διεπιφάνεια, η υδροστατική πίεση Ρ θα είναι ακριβώς ίδια και στο ένα και στο άλλο σκέλος

του σωλήνα στο επίπεδο EE'. Άρα θα έχουμε:

$$P = (z + h)\rho_\phi \text{ (Εικ.1.1, σημείοE) και } P = z\rho_\theta \text{ (Εικ1.1, σημείοE')}$$

Όπου

$\rho_\phi$  και  $\rho_\theta$  = το ειδικό βάρος του γλυκού και του θαλασσινού νερού αντίστοιχα,

$z$  = το βάθος του γλυκού νερού από τη μέση στάθμη της θάλασσας

$h$  = το ύψος της στάθμης του υδροφόρου στρώματος από τη μέση στάθμη της θάλασσας (επίπεδο 0).

Από τις δύο πιο πάνω σχέσεις έχουμε:

$$(z + h)\rho_\phi = z\rho_\theta \quad (\text{Εξ.1.1})$$

ή τελικά

$$z = \frac{\rho_\phi}{\rho_\theta - \rho_\phi} h = \frac{\rho_\phi}{\Delta_\rho} h = ch \Leftrightarrow \frac{\rho_\phi}{\Delta_\rho} = \frac{\rho_\phi}{\rho_\theta - \rho_\phi} = c \quad (\text{Εξ.1.2})$$

Η εξίσωση αυτή (Εξ.1.2), είναι γνωστή ως εξίσωση των Ghyben-Herzberg και εκφράζει τον ομώνυμο νόμο. Παίρνοντας υπόψη τις συνήθεις διακυμάνσεις των τιμών των  $\rho_\phi$  και

$\rho_\theta$ , το κλάσμα  $\frac{\rho_\phi}{\Delta_\rho} = \frac{\rho_\phi}{\rho_\theta - \rho_\phi} = c$ , παίρνει τιμές περίπου από 25 μέχρι 40.

Άρα η (Εξ.1.2) γίνεται

$$z=25 \cdot h \text{ έως } z=40 \cdot h \quad (\text{Εξ.1.3})$$

Η εξίσωση(1.2) και η αντίστοιχη αριθμητική, εξίσωση(1.3) σημαίνει ότι το γλυκό νερό του υδροφόρου στρώματος «επιπλέει» πάνω στο θαλασσινό νερό ως «παγόβουνο».Αν

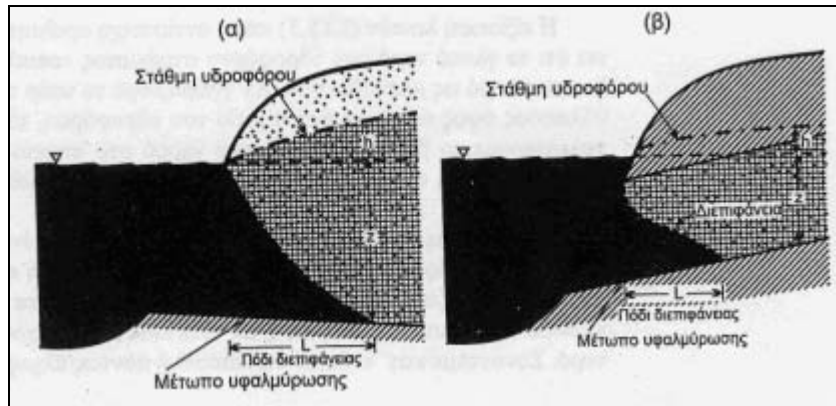
γνωρίζουμε το ύψος της στάθμης του υδροφόρου στρώματος από τη μέση στάθμη της θάλασσας σε ένα σημείο,  $h$ , τότε μπορούμε να υπολογίσουμε το βάθος  $z$  του γλυκού νερού στο σημείο αυτό.

*Σύμφωνα με την Εξ.1.2 και την Εξ.1.3, αν σε ένα σημείο η στάθμη παράκτιου υδροφορέα κατέβει και βρεθεί για αρκετό χρονικό διάστημα (ώστε να υπάρξει αντίδραση με ροές στο όλο σύστημα), στο επίπεδο της θάλασσας, δηλαδή αν  $h=0$ , τότε εκεί δεν θα υπάρχει καθόλου γλυκό νερό αλλά μόνο θαλασσινό ή πάντως αλμυρό.*

Είναι γνωστό ότι σε οποιοδήποτε σημείο ενός υδροφόρου στρώματος, άρα και ενός παράκτιου, η στάθμη μεταβάλλεται, ανεβοκατεβαίνει μέσα στο χρόνο τόσο ενδοετήσια, όσο και υπερετήσια, δηλαδή μεταβάλλεται το  $h$ . Άρα θα μεταβάλλεται και το  $z$ , δηλαδή η θέση της διεπιφάνειας. Αν αυτή η διεπιφάνεια ανέβει για ορισμένο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια κατέβει, τότε αφήνει κάποια «ίχνη», δηλαδή υπολείμματα αλμυρότητας από εμποτισμό και ιοντοανταλλαγές της στερεάς φάσης με το θαλασσινό νερό και από εγκλωβισμό, υπολειμμάτων αλμυρού νερού ως νερό κατακράτησης (τριχοειδές νερό, υμενώδες νερό κ.λπ.). Έτσι με την υποχώρηση της διεπιφάνειας παραμένουν κάποια άλατα για αρκετό χρονικό διάστημα. Για αυτό το λόγο η επαφή γλυκού-αλμυρού νερού δεν είναι μια επιφάνεια (δηλ. μια γραμμή σε τομή), αλλά μια ζώνη (μια λωρίδα σε τομή). Αλλά ακόμα και αν δεν υπήρχε μετακίνηση της διεπιφάνειας θα δημιουργούνταν αυτή η ζώνη λόγω μοριακής διάχυσης, δηλαδή για φυσικοχημικούς λόγους, όμως τότε το πάχος θα ήταν μικρότερο.

Στην Εικ.1.2 έχουμε τη διάφαση: (α) σε ένα ελεύθερο παράκτιο υδροφόρο στρώμα, και (β) σε ένα υπό πίεση, σύμφωνα με τον νόμο των Ghyben-Herzberg, όχι σε ένα νησί, αλλά στην ακτή μιας εκτενούς χέρσου (ηπείρου). Διακρίνονται το μήκος  $L$  που απέχει ο πόδας της διεπιφάνειας από την τομή της με τη θάλασσα. Όταν η στάθμη του υδροφόρου (δηλ. το  $h$ ) υποχωρεί, τότε το μέτωπο της διεπιφάνειας, το μέτωπο υφαλμύρωσης προελαύνει προς την στεριά.

*Είναι προφανές ότι αν σε ένα σημείο ενός παράκτιου υδροφόρου στρώματος η στάθμη του υποχωρήσει πολύ για διάφορους λόγους (π.χ. άντληση, ξηρασία) και η υποχώρηση αυτή διαρκέσει αρκετό χρόνο, τότε θα ανέβει η διεπιφάνεια με κίνδυνο να αντληθεί αλμυρό νερό, αν η διεπιφάνεια φτάσει μέχρι την βάση του υδροληπτικού έργου (γεώτρηση φρέατος κ.λπ.).*



Εικ 1.2 Ζώνη διάφασης (diepifaneias), (α) σε ελεύθερο, και, (β) σε υπό πίεση υδροφόρο στρώμα

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ II**

### **Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ MEMBRANΗΣ : ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΩΝ**

#### **2.1. Ορισμός της Μεμβράνης**

Ο πρωταρχικός ρόλος μιας μεμβράνης είναι να ενεργεί ως ένα εκλεκτικό φράγμα (selective barrier). Επιτρέπει το πέρασμα ορισμένων συστατικών και συγκρατεί άλλα συστατικά του μίγματος. Στην ευρύτερη έννοια της η μεμβράνη θα μπορούσε να οριστεί ως μια «περιοχή ασυνέχειας» παρεμβαλλόμενη ανάμεσα σε δύο φάσεις. [Huang and Kammermeyer 1984a] Πιο συγκεκριμένα, η μεμβράνη ορίζεται ως μια διεπιφάνεια, η οποία είναι εκλεκτική στη μεταφορά μάζας των συστατικών ενός μείγματος επιτρέποντας τη διέλευση ορισμένων και παρεμποδίζοντας τη διέλευση άλλων.

Αυτή η διεπιφάνεια μπορεί να είναι μοριακά ομοιογενής, δηλαδή εντελώς ομοιόμορφη στη σύνθεση και τη δομή, ή η διεπιφάνεια μπορεί να είναι χημικώς ή φυσικώς ετερογενής, δηλαδή να περιέχει πόρους πεπερασμένων διαστάσεων ή να αποτελείται από κάποια μορφή στρωματοποιημένης δομής. [Baker 2000a]

Καίρια ιδιότητα της μεμβράνης και αναγκαία συνθήκη για τη λειτουργία της είναι η ημιπερατότητα. Αυτή εξασφαλίζεται με την φυσική δομή και τη χημική σύσταση της μεμβράνης. Εκτός όμως από την ημιπερατότητα, το είδος του διαχωρισμού εξαρτάται και από έναν άλλο σημαντικό παράγοντα, την δρώσα δύναμη, η οποία ασκείται επί της μεμβράνης. Σε συνδυασμό οι δύο παράγοντες καθορίζουν τον κύριο μηχανισμό του διαχωρισμού και κατά συνέπεια το είδος της πρακτικής εφαρμογής μιας δεδομένης διεργασίας μεμβράνης.

Ο διαχωρισμός λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια της μεμβράνης ή στην μεμβράνη την ίδια, όπου οι μοριακές αλληλεπιδράσεις ανταγωνίζονται η μία την άλλη. Για την βελτίωση της ικανότητας διαχωρισμού, δύο παράγοντες πρέπει να εξετασθούν πλήρως. Ο ένας παράγοντας είναι η εκλεκτικότητα και ο άλλος είναι η ολική ροή για μια μεμβράνη. Και οι

δύο παράγοντες μπορεί να μελετηθούν μόνο όταν είναι γνωστός ο μηχανισμός μεταφοράς δια μέσου της μεμβράνης.

## 2.2. Διεργασίες Μεμβρανών

Η διεργασία μεμβράνης θεωρείται ως μια φυσική διεργασία (unit operation) κατά τη διάρκεια της οποίας λαμβάνει χώρα περισσότερο ή λιγότερο εκλεκτική μεταφορά μάζας δια μέσου της μεμβράνης ως αποτέλεσμα μια ωθούσας δύναμης (driving force). [Henry 1999]

Οι διεργασίες μεμβρανών με ωθούσα δύναμη την πίεση (δρώσα δύναμη, pressure driven membrane processes), η ηλεκτροδιάλυση και ο διαχωρισμός αερίου είναι πλήρως ενταγμένες στην βιομηχανική παραγωγή (industrially implemented) και γενικότερα θεωρούνται ως μια τεχνολογία της οποίας η πρακτική αξία έχει αποδειχθεί. [Baker 2000a, Henry 1999]

Πίνακας 2.1 Διεργασίες διαχωρισμού με μεμβράνες και ωθούσα δύναμη

| Ωθούσα Δύναμη                        | Διεργασία μεμβράνης                                     |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Διαφορά πίεσης (pressure difference) | Μικροδιήθηση (microfiltration)                          |
|                                      | Υπερδιήθηση (ultrafiltration)                           |
|                                      | Αντίστροφη όσμωση (reverse osmosis)                     |
|                                      | Νανοδιήθηση (nanofiltration)                            |
|                                      | Διεξάτμιση (pervaporation)                              |
| Διαφορά χημικού δυναμικού            | Pertraction                                             |
|                                      | Dialysis                                                |
|                                      | Διαχωρισμός αερίου (Gas separation)                     |
|                                      | Υγρές μεμβράνες (liquid membranes)                      |
| Διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού         | Ηλεκτροδιάλυσης (electrodialysis)                       |
|                                      | Ηλεκτροφόρηση μέσω μεμβράνης (membrane electrophoresis) |
|                                      | Ηλεκτρόλυση μέσω μεμβράνης (membrane electrolysis)      |
| Διαφορά θερμοκρασίας                 | Απόσταξη μέσω μεμβράνης (membrane distillation)         |

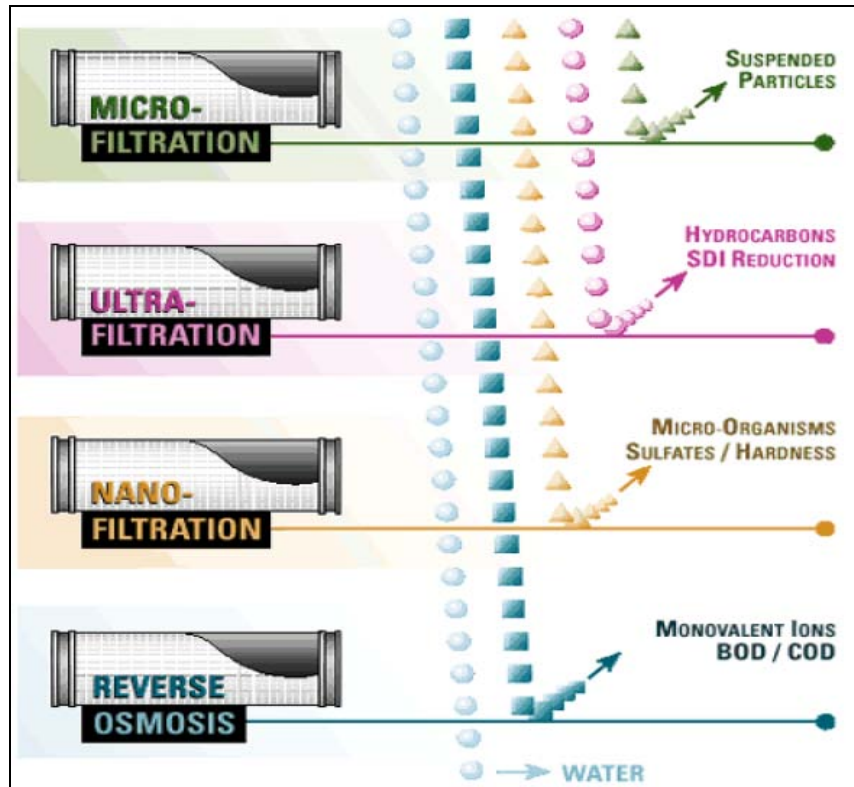


## Διεργασίες Μεμβρανών με Ωθούσα Δύναμη την Πίεση

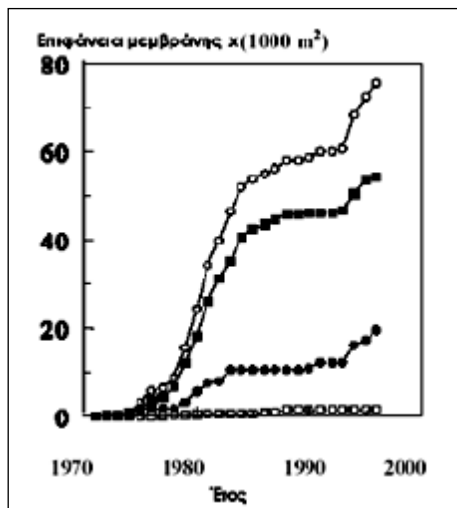
Στις διεργασίες μεμβρανών, όπου ωθούσα δύναμη είναι η διαφορά πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης ανήκουν: η αντίστροφη όσμωση, η νανοδιήθηση, η υπερδιήθηση και η μικροδιήθηση. Συνθήκες για ωθούσα δύναμη την πίεση εμφανίζονται επίσης σε πολλούς αντιδραστήρες μεμβρανών (membrane reactors). Η διαφορά πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης είναι συνώνυμη με τον όρο διαμεμβρανική πίεση (transmembrane pressure – TMP) [Γκέκας 1988, Henry 1999]

Ειδικότερα, τα κύρια χαρακτηριστικά των διεργασιών αυτών είναι:

- A.** Η μικροδιήθηση (MF) χαρακτηρίζεται από μέγεθος πόρων μεταξύ 0.05 και 2  $\mu\text{m}$  και πίεση λειτουργίας κάτω από 2 bar. Η μικροδιήθηση χρησιμοποιείται πρωταρχικά για τον διαχωρισμό σωματιδίων και βακτηριών από μικρότερες διαλυμένες ουσίες.
- B.** Η υπερδιήθηση (UF) χαρακτηρίζεται από μέγεθος μεταξύ 2 nm και 0.05  $\mu\text{m}$  και πίεση λειτουργίας μεταξύ 1 και 10 bar. Χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό κολλοειδούς φύσεως ουσιών όπως πρωτεϊνών από μικρότερα μόρια όπως τα σάκχαρα και τα άλατα.
- C.** Η νανοδιήθηση (NF) χαρακτηρίζεται από μέγεθος πόρων μεταξύ 0.5 nm και 2 nm και πίεση λειτουργίας ανάμεσα στα 5 και 40 bar. Χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό ανάμεσα στα σάκχαρα και άλλα οργανικά μόρια και πολυσθενή άλατα από την μία πλευρά και μονοσθενή άλατα και νερό από την άλλη πλευρά.
- D.** Η αντίστροφη όσμωση (RO) αφορά μεμβράνες οι οποίες θεωρούνται ότι δεν έχουν πόρους. Η τεχνική χρησιμοποιείται κυρίως για την αφαλάτωση νερού. Η πίεση λειτουργίας για την συγκεκριμένη διεργασία κυμαίνεται μεταξύ 10 και 100 bar.



Διάγραμμα 2.1 Διαχωρισμοί μέσω μεμβρανών με ωθούσα δύναμη την πίεση  
[Φυσικές και χημικές διεργασίες εξυγίανσης και παραγωγής πόσιμου νερού - Τ.Αλμπάνης 2008]



Διάγραμμα 2.2 Εγκατεστημένη επιφάνεια μεμβράνης παγκοσμίως στον τομέα των γαλακτομικών προϊόντων [Timmer 1998] (○: γάλα, ●: άλλα προϊόντα, ■: ορός γάλακτος (whey), σύνολο προϊόντων. [Timmer 1998]

Πίνακας 2.2 Γενικά Χαρακτηριστικά των Διεργασιών Μεμβρανών [Εφαρμογή τεχνολογίας μεμβρανών σε προωθημένη επεξεργασία αστικών αποβλήτων με στόχο την επαναχρησιμοποίηση – Δ.Φυτιλή 2007]

| Διεργασία Μεμβράνης | Κινητήριοις Δύναμη Λειτουργίας Μεμβράνης | Μέγεθος Πόρων      | Τυπικό Εύρος Λειτουργίας Μεμβράνης (μm) | Περιγραφή του Υγρού που διαπερνά τη μεμβράνη | Περιγραφή συγκατατούμενων συστατικών                             |
|---------------------|------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Μικροδιήθηση        | Διαφορά Υδροστατικής Πίεσης              | Μακροπόροι (>50nm) | 0.08-2.0                                | νερό + διαλυμένες ουσίες                     | TSS, θολότητα, μερικά βακτήρια+μικρόβια                          |
| Υπερδιήθηση         | Διαφορά Υδροστατικής Πίεσης              | Μεσοπόροι (2-50nm) | 0,005-0,2                               | νερό + μικρού μεγέθους μόρια                 | Κολλοειδή μακρομόρια, τα περισσότερα είδη βακτηριδίων, πρωτεΐνες |
| Νανοδιήθηση         | Διαφορά Υδροστατικής Πίεσης              | Μικροπόροι (>2nm)  | $10^{-3} - 10^{-2}$                     | νερό+πολύ μικρά μόρια, ιόντα                 | μικρά μόρια, μερική σκληρότητα, μικρόβια                         |
| Αντίστροφη οσμωση   | Διαφορά Υδροστατικής Πίεσης              | Μικροπόροι (>2nm)  | $10^{-4} - 10^{-3}$                     | νερό+πολύ μικρά μόρια, ιόντα                 | Πολύ μικρά μόρια, χρώμα, σκληρότητα, θειικά, Νιτρικά ιόντα       |
| Διάλυση             | Διαφορά Συγκέντρωσης                     | Μεσοπόροι (2-50nm) | -                                       | νερό + μικρά μόρια                           | Κολλοειδή μακρομόρια, τα περισσότερα είδη βακτηριδίων, πρωτεΐνες |
| Ηλεκτροδιάλυση      | Ελεκτρεργετική Δύναμη                    | Μικροπόροι (>2nm)  | -                                       | νερό + ιόντα                                 | ιονίζοντα άλατα                                                  |

Πίνακας 2.3 Χαρακτηριστικά Απόδοσης Διεργασιών Μεμβρανών [Εφαρμογή τεχνολογίας μεμβρανών σε προωθημένη επεξεργασία αστικών αποβλήτων με στόχο την επαναχρησιμοποίηση – Δ.Φυτιλή 2007]

| Παράμετρος         | MF     | UF       | NF       | RO      |
|--------------------|--------|----------|----------|---------|
| Θολότητα           | >99%   | 92-99%   | 92-99%   | 40-80%  |
| TSS                | 95-98% | 97-99,5% | 97-99,5% | 95-100% |
| TOC                | 45-65% | 35-60%   | 65-80%   | 85-95%  |
| BOD                | 75-90% | ~81%     | 80-90%   | 30-60%  |
| COD                | 70-85% | 46-70%   | 85-95%   | 85-95%  |
| Ολικό N            | ~12%   |          | ~16%     | ~16%    |
| Ολικός P           | ~14%   | ~26%     | ~32%     |         |
| Ολικά Κ/βακτηρίδια | 100%   | 90-100%  |          |         |
| Βακτήρια           | 100%   | 95-100%  |          |         |
| Μικρόβια           |        |          | 99%      | 99%     |

## 2.3 Ορολογία για της διεργασίες μεμβρανών με ωθούσα δύναμη την πίεση

### Τροφοδοσία (Feed)

Τροφοδοσία είναι η ποσότητα του υγρού που εισέρχεται σε ένα κελί μεμβράνης ή μονάδα ανά μονάδα χρόνου. [Γκέκας 1988]

### Πέρασμα – Διήθημα (Permeate)

Είναι το μέρος της τροφοδοσίας, το οποίο περνάει δια μέσου της μεμβράνης. [Γκέκας 1988]

### Συγκρατηθείσα Φάση ή Υπόλειμμα (Retentate)

Είναι η φάση που δεν περνάει δια μέσου της μεμβράνης.  
[Γκέκας 1988]

### Κελί Μεμβράνης και Μονάδα (Membrane Module and Plant)

Είναι η μικρότερη πρακτικώς μονάδα, η περιέχουσα μία ή περισσότερες μεμβράνες και τις δομές υποστήριξης. [Γκέκας 1988]

### Διαχωρισμοί

Ορίζονται οι διεργασίες, κατά τις οποίες από ένα διάλυμα ή μίγμα λαμβάνονται δύο ή περισσότερα προϊόντα διαφορετικής σύστασης μη διαφορετικών φυσικών ιδιοτήτων.

### Διαμορφώσεις της μεμβράνης (Membrane Configurations)

Είναι οι χωροταξικές διατάξεις της μεμβράνης. Υπάρχουν πολλά είδη μεμβρανών ανάλογα με την γεωμετρική διαμόρφωση τους (χωροταξική διάταξη), όπως :

1. επίπεδη (plate and frame)
2. ελικοειδή περιτύλιξη (spiral wound)
3. τετράφυλλη ελικοειδείς περιτύλιξη (four leaf spiral wound)
4. πορωδών ινών (hollow fiber)

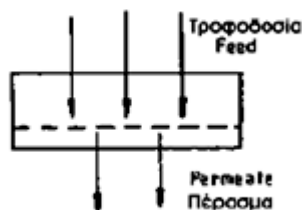
5. σωληνοειδείς (tubular)
6. μονολιθικές (monolithic)

Οι σωληνοειδείς και οι μονολιθικές είναι ανόργανες μεμβράνες.

## 2.4 Τρόποι λειτουργίας (Modes of module or plant operation)

### Διήθηση Μετωπικής Τροφοδοσίας (Dead end filtration)

Είναι τρόπος λειτουργίας όπου ολόκληρη η τροφοδοσία εξαναγκάζεται να περάσει δια μέσου της μεμβράνης. [Γκέκας 1988]

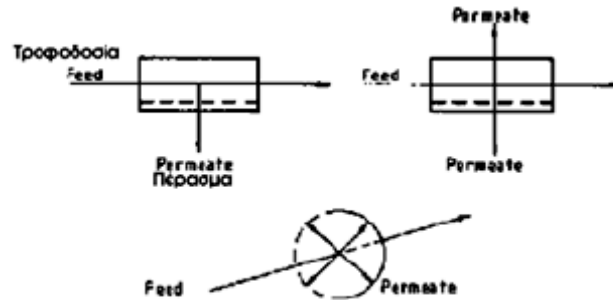


Εικ 2.1 Σχηματική παράσταση διήθησης μετωπικής τροφοδοσίας

Σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας η φάση του υπολείμματος δεν ταυτίζεται απαραίτητα με τη φάση της τροφοδοσίας. Η μέθοδος της κατά μέτωπο τροφοδοσίας χρησιμοποιείται κυρίως στην κλασική διήθηση και σε μέρος των εφαρμογών της στην μικροδιήθηση. Σε όλες τις άλλες εφαρμογές έχει επικρατήσει η μέθοδος της εφαπτομενικής τροφοδοσίας (cross flow).

### Διήθηση Εφαπτομενικής Τροφοδοσίας (Cross flow filtration or parallel flow or tangential flow)

Είναι τρόπος λειτουργίας όπου η τροφοδοσία ρέει παράλληλα προς τη μεμβράνη ενώ το πέρασμα (permeate) έχει εγκάρσια διεύθυνση ροής. [Γκέκας 1988]



Εικ. 2.2 Τρεις εναλλακτικοί τρόποι διήθησης εφαπτομενικής ροής

Αυτή η μέθοδος έχει στόχο τον περιορισμό των εναποθέσεων του υλικού πάνω στην επιφάνεια της μεμβράνης, φαινόμενο που οδηγεί στην υποβάθμιση της απόδοσης της λειτουργίας της (fouling).

### Συνεχής (Continuous)

Είναι τρόπος λειτουργίας όπου η τροφοδοσία συνεχώς οδηγείται στη μονάδα, ενώ το υπόλειμμα (retentate) και το πέρασμα (permeate) συνεχώς απομακρύνονται από τη μονάδα στην επιθυμητή συγκέντρωση συστατικών. [Γκέκας 1988]

## **2.5 Όροι απόδοσης της μεμβράνης (Membrane performance parameters)**

### Ροή (Flux)

Είναι ο όγκος ή η μάζα του διηθήματος ή οποιουδήποτε συστατικού στο διήθημα, που διέρχεται δια μέσου της μεμβράνης ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου. Συμβολίζεται με  $J$ . Μονάδες είναι: ογκομετρική ροή  $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ή  $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , ροή μάζας  $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , μοριακή ροή  $\text{kmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , ροή αερίου  $\text{Nm}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Ο ορισμός είναι γενικός και περιλαμβάνει οποιοδήποτε υγρό ή αέριο σε ένα υγρό ρεύμα. [Γκέκας 1988]

Η Ροή (flux) σχετίζεται με την δρώσα δύναμη με ένα απλό μοντέλο ευθείας αναλογίας :

$$\text{Ροή} = \text{Διαπερατότητα} * \text{Δρώσα Δύναμη}$$

όπου εναλλακτικά μερικές φορές αντί της διαπερατότητας της μεμβράνης χρησιμοποιείται το αντίστροφο της αντίστασης, εφόσον ισχύει :

$$\text{Διαπερατότητα} := 1/\text{Αντίσταση}$$

Μια πρώτη κατάταξη πετυχαίνεται με βάση το είδος της ασκούμενης δρώσας δύναμης. Η δρώσα δύναμη νοείται σαν η διαφορά των τιμών μιας βασικής ιδιότητας ανάμεσα στις δύο πλευρές της μεμβράνης, την πλευρά του υπολείμματος και την πλευρά του περάσματος (διηθήματος). Θεωρητικά, η βασική ιδιότητα για τη μεταφορά μάζας ενός συστατικού προκύπτει πάντοτε να είναι το ηλεκτροχημικό του δυναμικό. Στην πράξη χρησιμοποιούμε μια από τις παρακάτω συνιστώσες:

- τη διαφορά συγκέντρωσης ενός συστατικού
- τη διαφορά πίεσης
- τη διαφορά ηλεκτρική τάσης

Μπορούμε επίσης να διακρίνουμε τρία βασικά είδη μηχανισμών:

- Μεμβράνες με πορώδη δομή παρουσιάζουν ημιπερατότητα που οφείλεται στη διαφορά μεγέθους.
- Φορτισμένες ηλεκτρικά μεμβράνες χρησιμοποιούν τον ηλεκτροστατικό διαχωρισμό, όπως π.χ. στην ηλεκτροδιάλυση
- Μεμβράνες με απουσία πόρων λειτουργούν με διαφορές διαλυτότητας των συστατικών στο υλικό τους. Παραδείγματα αποτελούν η αντίστροφη όσμωση και η υπερεξάτμιση.

#### Ελάχιστο Μοριακό Βάρος συγκράτησης ουσίας (molecular mass cut off – MMOC)

Χαρακτηρίζεται μια μεμβράνη (συχνά νανοδιήθησης ή υπερδιήθησης) δηλώνοντας τα μικρότερα μοριακού βάρους συστατικά τα οποία συγκρατούνται σε ένα δοσμένο συντελεστή

συγκράτησης, συνήθως 0.90. Είναι ένας σχετικός όρος, ο οποίος διαφέρει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή, καθώς χρησιμοποιούνται διαφορετικά διαλύματα σε διαφορετικούς βαθμούς συγκράτησης. Δεν είναι με κανένα τρόπο μια απόλυτη παράμετρος χαρακτηρισμού για τις μεμβράνες.

#### Διαπερατότητα (Permeability)

Η ροή ενός συστατικού μέσα από τη μεμβράνη ανά μονάδα δρώσας δύναμης (ωθούσας δύναμης). Συμβολίζεται με L. [Γκέκας 1988]

#### Συντελεστής Συγκράτησης ή απόρριψης

Αποτελεί μια σχέση συγκεντρώσεων του συστατικού στο υπόλειμμα και στο διήθημα και δίνεται σαν ποσοστό επί της εκατό:

$$R = \frac{C_f - C_p}{C_f} * 100 \quad (\text{Εξ. 2.1})$$

όπου:

|       |                                     |
|-------|-------------------------------------|
| R     | Συντελεστής συγκράτησης ή απόρριψης |
| $C_f$ | Συγκέντρωση αλάτων στην τροφοδοσία  |
| $C_p$ | Συγκέντρωση αλάτων στο πέρασμα      |

Όλες οι παραπάνω παράμετροι απόδοσης μεμβράνης εξαρτώνται από τις συνθήκες λειτουργίας της μεμβράνης, την πίεση (γενικά δρώσα δύναμη), τη ροή της τροφοδοσίας και τη θερμοκρασία.

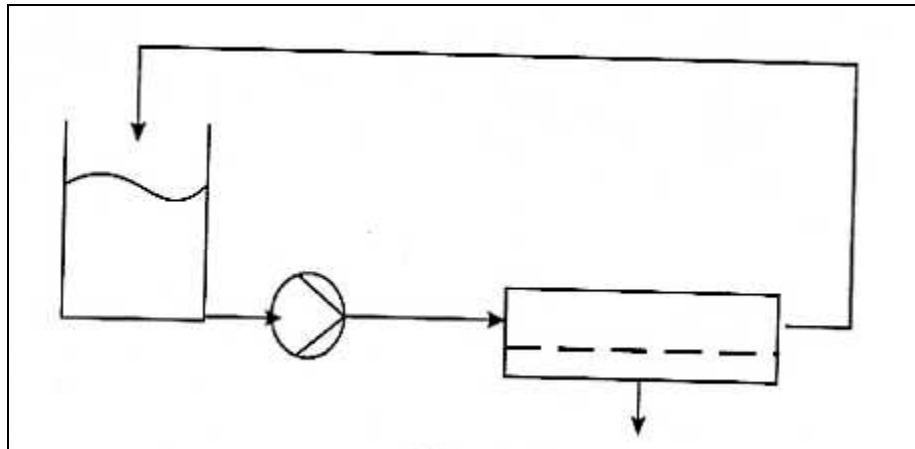


## 2.6 Ασυνεχής και Συνεχής Λειτουργία

Αρχές ασυνεχούς, ημισυνεχούς και συνεχούς λειτουργίας εφαρμόζονται παρόμοιες με αυτές που γενικά ισχύουν σε όλες τις βιομηχανικές διεργασίες. Σε όλες τις περιπτώσεις, ο τρόπος ανακυκλοφορίας του υπολείμματος αποτελεί μια επιπλέον παράμετρο επιλογής. Ακολουθούν παραδείγματα συστημάτων ασυνεχής και συνεχής ακολουθίας.

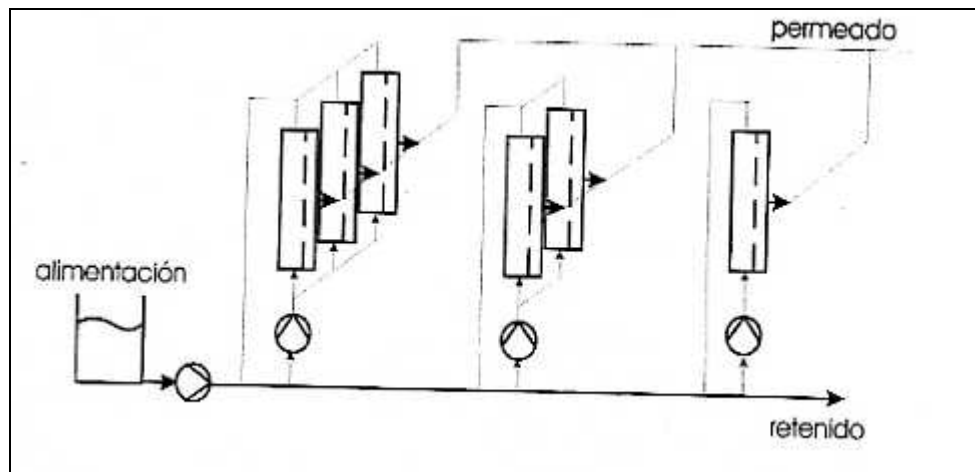
### Παράδειγμα Ασυνεχής λειτουργίας

Στην ασυνεχή λειτουργία η Εικ.2.3 δείχνει ολική επαναφορά του υπολείμματος στο δοχείο τροφοδοσίας με μία αντλία.

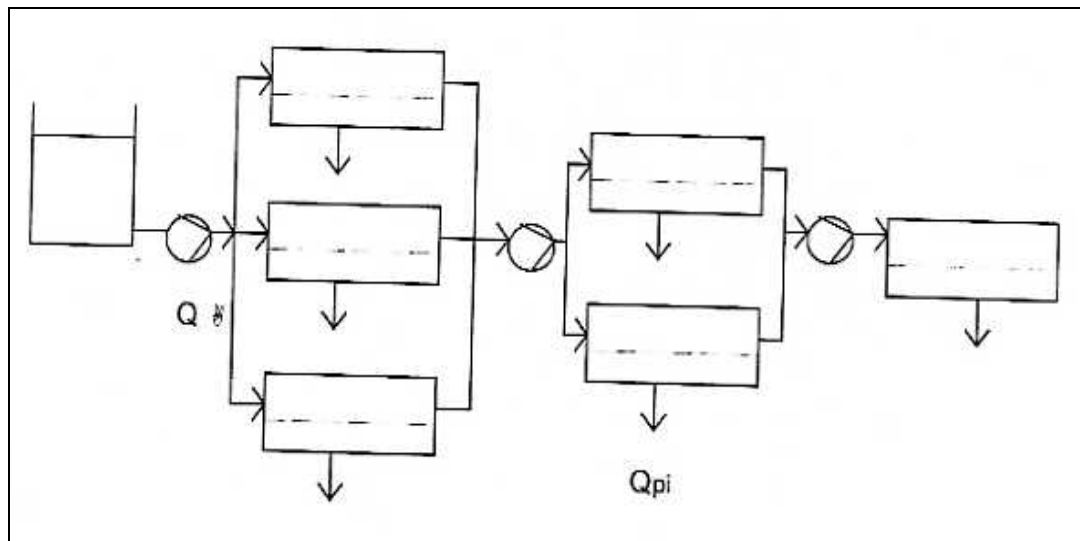


Εικ. 2.3

## Παράδειγμα Συνεχής Λειτουργίας



Εικ. 2.4 Διήθημα (permeado) – Υπόλειμμα (retenido) – Τροφή (alimentacion)



Εικ. 2.5 Το υπόλειμμα δεν επιστρέφει στο δοχείο τροφοδοσίας αλλά ο διαχωρισμός συνεχίζεται με την χρήση άλλων μεμβρανών που βρίσκονται σε σειρά.

## 2.7 Όροι απόδοσης σε επίπεδο εγκατάστασης

Ως παράμετροι απόδοσης για μια ολόκληρη εγκατάσταση, εκτός από αυτές που χαρακτηρίζουν την μεμβράνη, χρησιμοποιούνται επίσης :

### Βαθμός Ανάκτησης (%)

Αναφέρεται στη σχέση των όγκων διηθήματος και τροφοδοσίας, με κύρια χρήση στην αντίστροφη όσμωση και στην ανάκτηση ύδατος.

### Βαθμός Ογκομετρικής μείωσης

Είναι η σχέση του τελικώς επιτυγχανόμενου όγκου στο υπόλειμμα και του αρχικού όγκου τροφοδοσίας.

### Βαθμός Συμπύκνωσης ενός συστατικού

Είναι η σχέση της τελικής του συγκέντρωσης στο υπόλειμμα με την αντίστοιχη αρχική στην τροφοδοσία.

Οι παραπάνω ορισμοί ισχύουν κατά την ασυνεχή λειτουργία. Για τη συνεχή λειτουργία, οι όγκοι πρέπει να αντικατασταθούν με παροχές και οι συγκεντρώσεις να αναφέρονται στις παροχές τροφοδοσίας και υπολείμματος, αντίστοιχα.

## 2.8 Πόλωση της συγκέντρωσης (concentration polarization) – φαινόμενο «στομώματος» (fouling)

Κατά την διαδικασία διαχωρισμού με μεμβράνες και ωθούσα δύναμη εμφανίζονται συχνά το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης (*concentration polarization*) και το φαινόμενο του «στομώματος» (Fouling). [Γκέκας 2000]

### 2.8.1 Πόλωση συγκέντρωσης -ΠΣ (concentration polarization - CP)

Επειδή τα συστατικά του μίγματος τροφοδοσίας διαπερνούν τη μεμβράνη με διαφορετικούς ρυθμούς, βαθμίδες συγκέντρωσης εμφανίζονται στο υγρό και στις δύο άκρες της μεμβράνης. Το φαινόμενο καλείται πόλωση συγκέντρωσης – ΠΣ (concentration polarization). [Baker 2000c] Δηλαδή, στο φαινόμενο της συγκέντρωσης οι ουσίες βρίσκονται πολύ κοντά στην επιφάνεια της μεμβράνης αλλά παραμένουν σε ενυδατωμένη φάση στο διάλυμα.

Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και σε άλλες διεργασίες, οι οποίες περιλαμβάνουν μεταφορά μάζας ή θερμότητας κατά μήκος μιας διεπιφάνειας.

Αυτή η αύξηση της συγκέντρωσης δημιουργεί μια οπισθέλκουσα ροή διάχυσης στον κύριο όγκο του ρεύματος τροφοδοσίας (diffusive flow), αλλά ύστερα από μια δοσμένη χρονική περίοδο επέρχονται συνθήκες μόνιμης κατάστασης. Η ροή της διαλυμένης ουσίας προς την επιφάνεια της μεμβράνης λόγω συναγωγής θα εξισορροπηθεί από τη ροή της διαλυμένης ουσίας μέσα από τη μεμβράνη συν την ροή διάχυσης από την επιφάνεια της μεμβράνης (Διάγραμμα 2.3). [Porter 1972, Mulder 1995, Cheryan 1998c]:

$$Jc + D \frac{dc}{dx} = Jc_p \quad (\text{Εξ. 2.2})$$

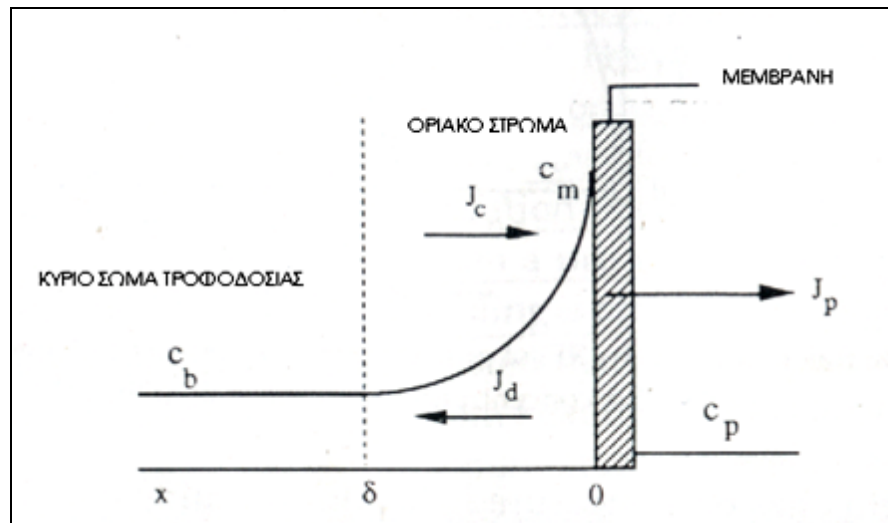
Οι οριακές συνθήκες είναι :

$$\begin{aligned} x = 0 &\rightarrow c = c_m \\ x = \delta &\rightarrow c = c_b \end{aligned} \quad (\text{Εξ. 2.3})$$

και η ολοκλήρωση της εξίσωσης (2.2) οδηγεί στη σχέση του μοντέλου του λεπτού υμένα (stagnant film-model) [Zydney 1996d]

$$\ln \frac{c_m - c_p}{c_b - c_p} = \frac{J\delta}{D} \quad \text{ή} \quad (\text{Εξ.2.4})$$

$$\frac{c_m - c_p}{c_b - c_p} = e^{\frac{J\delta}{D}} \quad (\text{Εξ. 2.5})$$



Διάγραμμα 2.3 Προφίλ συγκέντρωσης υπό συνθήκες μόνιμης κατάστασης (Πόλωση Συγκέντρωσης) ( $J_p$  διήθημα,  $J_c$  τροφοδοσία,  $J_d$  ροή διάχυσης)

Όμως ο λόγος του συντελεστή διάχυσης προς το πάχος του οριακού στρώματος καλείται συντελεστής μεταφοράς μάζας  $k$  και εάν εισάγουμε τον πραγματικό συντελεστή συγκράτησης ή απόρριψης  $R_{int}$  [Mulder 1995, Field 1996]:

$$R_{int} = 1 - \frac{c_p}{c_m} \quad (\text{Εξ. 2.6})$$

όπου :

|                |                                     |
|----------------|-------------------------------------|
| R              | Συντελεστής συγκράτησης ή απόρριψης |
| C <sub>m</sub> | Συγκέντρωση αλάτων στην τροφοδοσία  |
| C <sub>p</sub> | Συγκέντρωση αλάτων στο πέρασμα      |

και η εξ. (2.5) παίρνει τη μορφή:

$$\frac{c_m}{c_b} = \frac{e^{\frac{J}{k}}}{R_{int} + (1 - R_{int})e^{\frac{J}{k}}} \quad (\text{Εξ. 2.7})$$

Ο λόγος c<sub>m</sub>/c<sub>b</sub> ονομάζεται ενδεικτική σταθερά της συγκέντρωσης πόλωσης (concentration polarization modulus). Αυτός ο λόγος αυξάνει με αύξηση της ροής του διαλύτη J, με αύξηση του πραγματικού συντελεστή συγκράτησης R<sub>int</sub>, και με τη μείωση του συντελεστή μεταφοράς μάζας [Mulder 1995, Baker 2000c].

Όταν η διαλυμένη ουσία συγκρατείται πλήρως από τη μεμβράνη (R<sub>int</sub>=1.0 και c<sub>p</sub>=0) η εξ.(2.5) γίνεται:

$$\frac{c_m}{c_b} = e^{\frac{J}{k}} \quad (\text{Εξ. 2.8})$$

Η εξίσωση (2.8) είναι η βασική εξίσωση για τη συγκέντρωση πόλωσης, η οποία σε απλή μορφή φανερώνει τους δύο παράγοντες (τη ροή και το συντελεστή μεταφοράς μάζας) και την προέλευση τους (μεμβράνη και ρευστοδυναμική) υπεύθυνους για το φαινόμενο. Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας συνδέεται με το αριθμό Sherwood (Sh):

$$Sh = \frac{k d_h}{D} = a Re^b Sc^c \quad (\text{Εξ. 2.9})$$

όπου  $Re$  είναι ο αριθμός Reynolds ( $Re = \rho v d h / \eta$ ),  $Sc$  είναι ο αριθμός Schmidt ( $Sc = \nu / D$ ),  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες,  $\rho$  η πυκνότητα,  $dh$  η υδραυλική διάμετρος,  $\eta$  το δυναμικό ιξώδες,  $v$  η ταχύτητα ροής,  $D$  ο συντελεστής διάχυσης, και  $a, b$  και  $c$  είναι ρυθμιζόμενες παράμετροι. [Porter 1972, Zydney 1996d]

Από τα ανωτέρω φαίνεται ότι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας  $k$  είναι κυρίως συνάρτηση της ταχύτητας ροής της τροφοδοσίας ( $v$ ), του συντελεστή διάχυσης της διαλυμένης ουσίας ( $D$ ), της πυκνότητας, του ιξώδους και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κελιού της μεμβράνης. Αυτές οι ιδιότητες (συντελεστής διάχυσης, ιξώδες  $\eta$ , και πυκνότητα  $\rho$ ) ελάχιστα μεταβάλλονται στην οριζόντια διεύθυνση. Αλλά στην κάθετη διεύθυνση δεν μπορούν να θεωρηθούν σταθερές λόγω της συγκέντρωσης πόλωσης. Εξαιτίας των υψηλών συγκεντρώσεων στο τοίχωμα της μεμβράνης οι φυσικές ιδιότητες μεταβάλλονται τόσο πολύ έτσι ώστε οι εμπειρικές συσχετίσεις του συντελεστή μεταφοράς μάζας δεν μπορούν να περιγράψουν τη μεταφορά μάζας [Mulder 1995].

Η έκταση του εν λόγω φαινομένου μπορεί να μειωθεί με το χειρισμό της ροής  $J$  και του συντελεστή μεταφοράς μάζας  $k$ . Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας εξαρτάται και από την ταχύτητα ροής. Επειδή ο συντελεστής διάχυσης δεν μπορεί να αλλάξει (μόνο με την αύξηση της θερμοκρασίας), ο συντελεστής μεταφοράς μάζας μπορεί να αυξηθεί με την αύξηση της ταχύτητας τροφοδοσίας κατά μήκος της μεμβράνης και με την αλλαγή του γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κελιού της μεμβράνης. [Porter 1972, Field 1996, Cheryan 1998c].

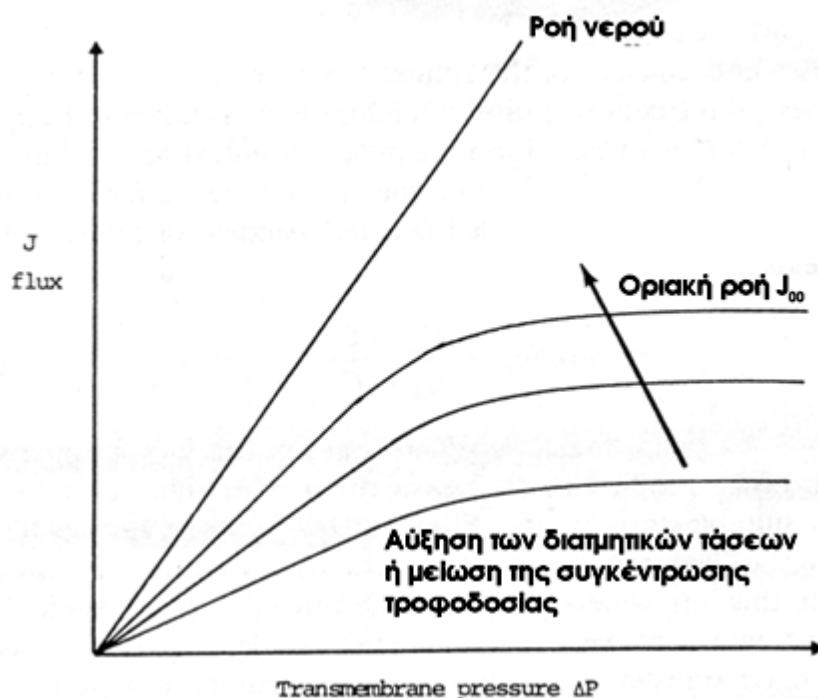
### **Μοντέλα περιγραφής της συγκέντρωσης πόλωσης**

Γενικότερα, η ροή του καθαρού νερού μέσω της μεμβράνης είναι απευθείας ανάλογη της εφαρμοζόμενης πίεσης σύμφωνα με τη σχέση:

$$J = \frac{\Delta P}{\eta \cdot R_m} \quad (\text{Εξ. 2.10})$$

όπου  $R_m$  είναι η υδροδυναμική αντίσταση της μεμβράνης (σημείωση: αρκετές φορές

αναφέρεται και η υδραυλική διαπερατότητα  $LP=1/\eta Rm$ ). Η υδροδυναμική αντίσταση  $Rm$  είναι μια σταθερά της μεμβράνης και δεν εξαρτάται από τη σύσταση τροφοδοσίας ή την εφαρμοζόμενη πίεση. Όταν όμως προστεθεί διαλυμένη ουσία στο νερό η παρατηρούμενη συμπεριφορά είναι εντελώς διαφορετική ιδίως στην μικροδιήθηση και στην υπερδιήθηση. Με την αύξηση της πίεσης η ροή αυξάνεται, αλλά ύστερα από την εφαρμογή μιας συγκεκριμένης (ελάχιστης) πίεσης, η ροή δεν αυξάνεται άλλο με αύξηση της πίεσης (Διάγραμμα. 2.4). Η μέγιστη αυτή ροή ονομάζεται οριακή ροή (limitation flux)  $J_{\infty}$ . [Field 1996]



Διάγραμμα 2.4 Η οριακή ροή (limitation flux) κατά την εκδήλωση του φαινομένου της συγκέντρωσης πόλωσης και η γραμμική εξάρτηση της ροής με την εφαρμοζόμενη πίεση απουσία του φαινομένου.

[Διδακτορική διατριβή Ιωάννη Ξιάρχου]

Αυτό το φαινόμενο εξηγείται ως εξής: Τα μόρια του διαλύτη (νερού) διαπερνούν τη μεμβράνη, αλλά τα μεγαλύτερα μόρια της διαλυμένης ουσίας συσσωρεύονται στην επιφάνεια της μεμβράνης. Εξαιτίας του μεγέθους τους, ο ρυθμός με τον οποίο τα μόρια της διαλυμένης ουσίας διαχέονται από την επιφάνεια της μεμβράνης στο κύριο σώμα του διαλύματος είναι σχετικά μικρός. Αυτές οι διαλυμένες ουσίες (κολλοειδής φύσεως και



μακρομόρια) γίνονται τόσο συμπυκνωμένες στην επιφάνεια της μεμβράνης οπότε ένα στρώμα gel σχηματίζεται και δρα ως ένα δευτερεύον στρώμα στη ροή δια μέσω της μεμβράνης. Ο σχηματισμός αυτού του στρώματος στην επιφάνεια των μεμβρανών υπερδιήθησης παράγει μια οριακή ροή ή ένα πλατό ροής. Με τη δημιουργία αυτού του στρώματος, η αύξηση της εφαρμοζόμενης πίεσης δεν αυξάνει την ροή αλλά απλά αυξάνει το πάχος αυτού του στρώματος.[Mulder1995, Field 1996, Zydney 1996d, Cheryan 1998c]

## **2.8.2 Το φαινόμενο του στομώματος**

Ένα πολύ περιοριστικό βήμα στην τεχνολογία μεμβρανών είναι το φαινόμενο του «στομώματος» (fouling). Το φαινόμενο του fouling παρουσιάζεται ως μια συνεχής πτώση της ροής περάσματος με το χρόνο. Με τον πιο αυστηρό ορισμό, η πτώση της ροής θα πρέπει να λαμβάνει χώρα όταν όλες οι παράμετροι λειτουργίας, όπως η πίεση, ο ρυθμός ροής, η θερμοκρασία, και συγκέντρωση τροφοδοσίας, παραμένουν σταθερά. Επειδή οι συνέπειες του φαινομένου είναι σημαντικές, την τελευταία δεκαετία έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στην κατανόηση του μηχανισμού εκδήλωσης του φαινομένου και τον μετριασμό των συνεπειών του. [Cheryan 1996c]

### **Χαρακτηριστικά του «στομώματος»**

Η ροή περάσματος στις πραγματικές διεργασίες είναι συνήθως πολύ μικρότερη από αυτή του καθαρού διαλύτη (π.χ. νερού) για τους κάτωθι λόγους [Cheryan 1996c, Zydney 1996e]:

- Μεταβολές στις ιδιότητες της μεμβράνης: Αυτές μπορεί να συμβούν ως αποτέλεσμα της φυσικής ή χημικής φθοράς της μεμβράνης. Καθώς οι διεργασίες μεμβρανών είναι εξαρτώμενες από την πίεση, είναι πιθανόν η μεμβράνη σε υψηλές πιέσεις να υποστεί βαθμιαία παραμόρφωση λόγω τάνυσης (creep) ή συμπίεσης (compaction). Η χημική φθορά από την άλλη πλευρά, μπορεί να συμβεί εάν το pH, η θερμοκρασία και άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες βρίσκονται σε ασυμβατότητα με τη συγκεκριμένη μεμβράνη. Επίσης, οι κύκλοι καθαρισμού με δραστικά μέσα μειώνουν σημαντικά τον

χρόνο ζωής της μεμβράνης.

- Μεταβολές στις ιδιότητες του ρεύματος τροφοδοσίας: Η ροή του διαλύτη στις μεμβράνες υπερδιήθησης και μικροδιήθησης συνήθως θεωρείται ότι είναι ένα φαινόμενο ιξώδους ροής, που περιγράφεται από την εξίσωση Hagen – Poiseuille ή από εξισώσεις μεταφοράς μάζας. Συνεπώς, καθώς το ιξώδες και η πυκνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας μεταβάλλονται, η διάχυση αλλάζει επειδή μεγαλώνει η συγκέντρωση των στερεών και η ροή θα έπρεπε να είναι χαμηλότερη σε σχέση με το καθαρό νερό μόνο από υδροδυναμικές συσχετίσεις.
- Πόλωση Συγκέντρωσης: Τα φαινόμενα ύφεσης της ροής λόγω του στομώματος της μεμβράνης συχνά συνδέονται λανθασμένα με την πόλωση συγκέντρωσης. Σύμφωνα με την θεωρία το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης θα πρέπει να είναι αντιστρεπτό με τη μείωση της εφαρμοζόμενης πίεσης, την ελάττωση της συγκέντρωσης τροφοδοσίας ή με αύξηση της εφαπτομενικής ταχύτητας ροής (cross – flow velocity) ή της τύρβης (turbulence). Εάν αυτό συμβαίνει η ελάττωση της ροής οφείλεται στη συγκέντρωση πόλωσης και όχι στο στόμωμα (fouling).

Εκτός από τους παραπάνω λόγους, η πτώση της ροής μπορεί να αποδοθεί και στο «στόμωμα» των μεμβρανών (membrane fouling), που χαρακτηρίζεται από την αναντιστρεπτή πτώση της ροής. Η πτώση της ροής, ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο σύστημα, μπορεί να συμβεί σε ένα ή περισσότερα στάδια, συνήθως ταχέως στα πρώτα λεπτά και με μία βαθμιαία πτώση της ροής στη συνέχεια. Το φαινόμενο του fouling οφείλεται στην απόθεση και συσσώρευση των συστατικών τροφοδοσίας, π.χ. αιωρούμενα σωματίδια, μη διερχόμενες διαλυμένες ουσίες ή ακόμη και διερχόμενες διαλυμένες ουσίες στην επιφάνεια της μεμβράνης και/ή μέσα στους πόρους της μεμβράνης. Σχεδόν όλα τα συστατικά τροφοδοσίας έχουν την τάση να προκαλούν στόμωμα σε κάποιο βαθμό στη μεμβράνη. Η φύση και η έκταση του στομώματος της μεμβράνης επηρεάζεται ισχυρά από τη φυσικοχημική φύση της μεμβράνης και της/των διαλυμένης/ων ουσίας/ων. Η χημεία της επιφάνειας της μεμβράνης, οι αλληλεπιδράσεις διαλυμένης ουσίας – διαλυμένης ουσίας και διαλυμένης ουσίας – μεμβράνης αποτελούν βασικά στοιχεία για την κατανόηση του φαινομένου του fouling.

Το είδος του διαχωρισμού διήθησης και ο τύπος της χρησιμοποιούμενης μεμβράνης καθορίζουν την έκταση του στομώματος. Οι ουσίες που προκαλούν στόμωμα (foulants) μπορεί να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες [Fane et al. 1987, Cheryan 1996c, Zydney 1996e, Field 1996]:

- ♦ Οργανικές (μακρομόρια, βιολογικές ουσίες κ.α.)
- ♦ Ανόργανες (υδροξείδια μετάλλων, άλατα ασβεστίου κ.α.)
- ♦ Particulates

Το φαινόμενο του στομώματος είναι πολύ συγκεκριμένο για μια δεδομένη εφαρμογή. Το φαινόμενο του στομώματος (fouling) για ένα διάλυμα εξαρτάται από τις φυσικές και χημικές παραμέτρους όπως η συγκέντρωση, η θερμοκρασία, το pH, η ιοντική ισχύς ή το υλικό της μεμβράνης. Καθώς η πόλωση συγκέντρωσης και το στόμωμα της μεμβράνης είναι εγγενή φαινόμενα των διεργασιών υπερδιήθησης, δεν είναι δυνατόν να παραχθούν μεμβράνες οι οποίες δεν υφίστανται στόμωμα. Ωστόσο, ο στόχος είναι η κατά το δυνατόν μείωση του στομώματος όσο είναι δυνατόν. Το στόμωμα χαρακτηρίζεται από ιδιαιτερότητα για μια συγκεκριμένη εφαρμογή και λόγω της πολυπλοκότητας της φύσης του είναι πολύ δύσκολο να περιγραφεί από μια γενική θεωρία [Field 1996]. Μια πολύ απλή σχέση που τυγχάνει ευρείας χρήση είναι :

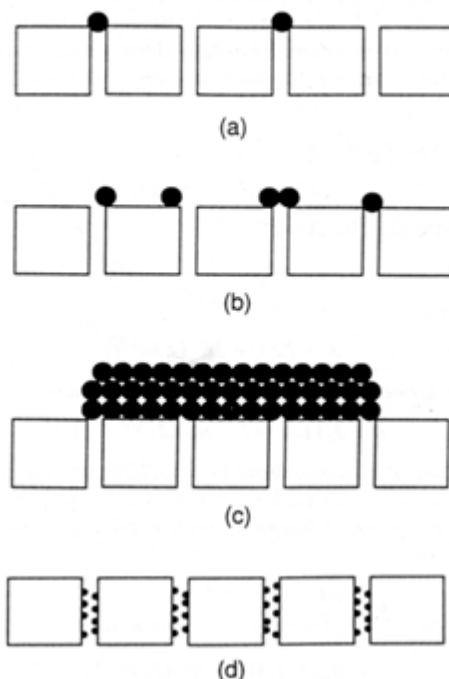
$$J=J_0t^n \quad (\text{Εξ. 2.11})$$

όπου J είναι η πραγματική ροή, J<sub>0</sub> είναι η αρχική ροή και n εκθέτης, ο οποίος είναι συνάρτηση της ταχύτητας εφαιπτομενικής ροής. Αξιόπιστες τιμές της πτώσης ροής είναι απαραίτητες για μια διεργασία. Αυτές οι τιμές μπορεί να αποκτηθούν από πιλοτικά πειράματα. [Field 1996, Cheryan 1998d]

Το φαινόμενο του στομώματος (fouling) μπορεί να διακριθεί σε επιφανειακό (surface fouling) και μπλοκάρισμα των πόρων. Διακρίνονται διάφοροι τρόποι μπλοκαρίσματος των πόρων (Εικ. 2.6), οι οποίοι είναι συνάρτηση του μεγέθους και του σχήματος στερεού/διαλυμένης ουσίας σε σχέση με την κατανομή πόρων της μεμβράνης [Field 1996]:

- πλήρης μπλοκάρισμα των πόρων - η είσοδος του πόρου είναι σφραγισμένη

- γεφύρωμα πόρων – μερική παρεμπόδιση της εισόδου των πόρων.
- εσωτερικό μπλοκάρισμα των πόρων - υλικό που δεν κατακρατείται από τη μεμβράνη προσροφάτε ή παγιδεύεται στο τοίχωμα των πόρων ή στο υπόστρωμα της μεμβράνης.



Εικ. 2.6 Μηχανισμοί στομώματος (fouling) των μεμβρανών (α) πλήρες μπλοκάρισμα πόρων, (β) μερικό μπλοκάρισμα πόρων, (γ) σχηματισμός στρώματος «cake», (δ) εσωτερικό μπλοκάρισμα πόρων [Διδακτορική διατριβή Ιωάννη Ξιάρχου]

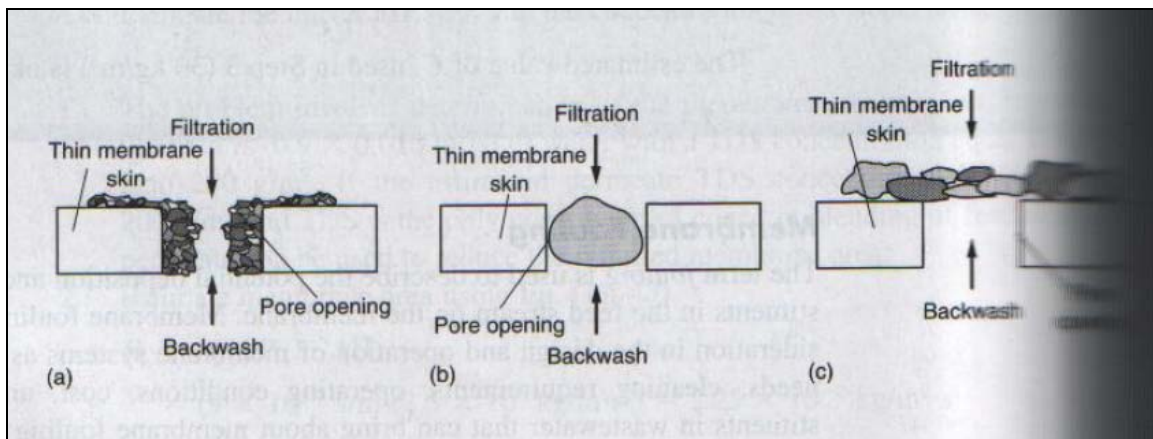
### 2.8.3 Σύγκριση φαινομένου πόλωσης συγκέντρωσης και «στομώματος»

Η πόλωση της συγκέντρωσης θεωρείται ως το πρώτο βήμα προς το "στόμωμα" (fouling), δηλαδή την απόθεση των συστατικών στην επιφάνεια ή ακόμα και ανάμεσα στους πόρους μιας συνθετικής μεμβράνης. Ένα συστατικό που συσσωρεύεται πλησίον του τοιχώματος της μεμβράνης αλλά βρίσκεται ακόμα στο διάλυμα, συμβάλει στο φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης. Όταν το συστατικό αφήνει τη ρευστή φάση και προσροφάτε ή συσσωρεύεται στην επιφάνεια της μεμβράνης τότε συμβάλει στο "στόμωμα". Παρόλα αυτά η ΠΣ δεν αποτελεί προϋπόθεση για την εμφάνιση "στομώματος", για το οποίο ένα πρώτο βήμα

προσρόφησης θα ήταν αρκετό. [Field 1996, Γκέκας 2000]

Και τα δύο περιοριστικά φαινόμενα διαφοροποιούν τη συμπεριφορά της μεμβράνης σχετικά με την ροή διηθήματος (Flux) και τους συντελεστές συγκράτησης, απόρριψης (Retention) των συστατικών. Και τα δύο επίσης επαυξάνονται από την αύξηση της δρώσας δύναμης (Transmembrane Pressure). Η διαφορά είναι ότι οι επιδράσεις της Πόλωσης της Συγκέντρωσης είναι αντιστρεπτές, ενώ το «στόμωμα» ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας και τη χημική φύση των συστατικών και του υλικού της μεμβράνης, μπορεί να είναι μη αντιστρεπτό [Γκέκας 2000].

Μια άλλη διαφορά είναι στον βαθμό απόρριψης. Η πόλωση της συγκέντρωσης τον μειώνει λόγω της ανάπτυξης δευτερεύουσας δρώσας δύναμης (συγκέντρωσης μεταξύ συμπυκνώματος και υπερδιηθήματος), ενώ η στερεή εναπόθεση αυξάνει την απόρριψη, λόγω μείωσης της διαμέτρου των πόρων (μερικό φράξιμο, στένωση εσωτερικής διαμέτρου στο κανάλι ενός πόρου) αντίστοιχα για την συγκράτηση στο φαινόμενο CP, η συγκράτηση του συστατικού σε μια μεμβράνη με "διαρροή" μειώνεται λόγω της εμφάνισης δευτερογενών δρωσών δυνάμεων διαφορών συγκεντρώσεων, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Στην περίπτωση του "στομώματος" (fouling) λόγω του φραξίματος των πόρων η συγκράτηση έχει την τάση να αυξάνεται [Γκέκας 2000].



Εικ. 2.7 α)Στένεμα πόρων β)Φράξιμο πόρων γ)Σχηματισμός στρωμάτων ακαθαρσιών  
[Εφαρμογή τεχνολογίας μεμβρανών σε προωθημένη επεξεργασία αστικών αποβλήτων με στόχο την επαναχρησιμοποίηση – Δ.Φυτιλή 2007]

#### 2.8.4 Τρόποι Αντιμετώπισης

Παρόλα που το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης και το Fouling είναι αναπόφευκτα κατά την διάρκεια διαχωρισμού με μεμβράνες, υπάρχουν τρόποι μείωσης τους, όπως καθαρισμός, επιλογή κατάλληλης μεμβράνης και επιλογή σωστών συνθηκών λειτουργίας. Οι μεμβράνες μπορούν να καθαριστούν είτε με φυσικούς τρόπους, είτε με βιολογικούς είτε με χημικούς.

Ένας άλλος τρόπος ελαχιστοποίησης εμφάνισης των δύο παραπάνω φαινομένων είναι, να χρησιμοποιείται η κατάλληλη μεμβράνη για συγκεκριμένη χρήση. Αυτό γίνεται αν είναι γνωστή η προέλευση και η σύσταση της τροφοδοσίας (feed). Έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεμβράνες οι οποίες είναι λιγότερο επιρρεπείς στο φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης και του Fouling, με βάση τα χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι καταπολέμησης των δύο παραπάνω φαινομένων. Μία από αυτές είναι η μέθοδος Pall Filtration, που αφορά δονούμενη μεμβράνη έτσι, ώστε να μην ευνοείται και να αποτρέπεται κάθε τάση για εναπόθεση. Μια άλλη μέθοδος είναι η περιοδική αναστροφή της ροής (back flushing), δηλαδή να υποχρεώνεται με κάποια διάταξη κάποια ποσότητα του διηθήματος να περάσει στη φάση του συμπυκνώματος. Κάποιοι κατασκευαστές πραγματοποιούν με επιτυχία το flushing με πεπιεσμένο αέρα από την κατεύθυνση του υπερδιηθήματος. Τέλος, μια παραλλαγή της μεθόδου της αναστροφής της ροής με συχνές αναστροφές σε εξαιρετικά βραχεία χρονικά διαστήματα είναι η Backshock.[Νανοδιήθηση, Μ.Νικολοπούλου 2001]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙΙ

### ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ – ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ

#### 3.1 Ορισμός Σκληρότητας

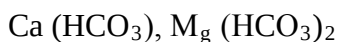
Η σκληρότητα των νερών αποδίδεται στο σύνολο των υδατοδιαλυτών αλάτων του ασβεστίου και μαγνησίου που περιέχονται σε αυτά. Ο όρος σκληρότητα καθιερώθηκε από το γεγονός ότι τα άλατα του ασβεστίου και μαγνησίου εμποδίζουν το σχηματισμό σαπουνάδας αν δεν απομακρυνθούν από τα νερά ή αν δεν καταβυθιστούν σε δυσδιάλυτα άλατα.

Τα συνήθη σαπούνια (ελαιοσάπωνες) καταβυθίζουν το ασβέστιο και το μαγνήσιο των νερών σε δυσδιάλυτα άλατα (άλατα ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου, με ελαϊκά, στεατικά και παλμιτικά ιόντα). Αντίθετα στα μαλακά νερά, που περιέχονται μικρές ποσότητες, είτε ασήμαντες ασβεστίου και μαγνησίου, σχηματίζεται σαπουνάδα.

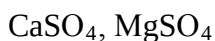
##### 3.1.1 Άλατα σκληρότητας

Τα κυριότερα άλατα του ασβεστίου και μαγνησίου με τα οποία εμπλουτίζονται τα όμβρια νερά, στην επιφανειακή και υπόγεια διαδρομή τους, προς τα επιφανειακά και υπόγεια υδροφόρα και στο χρόνο της διαμόρφωσης, αραίωσης και συμπύκνωσης είναι:

##### **α. Διττανθρακικές ενώσεις ασβεστίου και μαγνησίου**



##### **β. Θεικά άλατα ασβεστίου και μαγνησίου**



##### **γ. Χλωριούχα άλατα ασβεστίου και μαγνησίου**

$\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$

**δ. Νιτρικά άλατα ασβεστίου και μαγνησίου**

$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$

**3.1.2 Χαρακτηρισμός σκληρότητας**

Η σκληρότητα των νερών εντάσσεται στις παρακάτω κατηγορίες:

**α. Ολική σκληρότητα**

Τη συνιστούν το σύνολο των υδατοδιαλυτών αλάτων του ασβεστίου και μαγνησίου που περιέχονται στα νερά.

**β. Παροδική σκληρότητα ή επικαθήμενη**

Τη συνιστούν μόνο το σύνολο των διττανθρακικών ενώσεων του ασβεστίου και μαγνησίου  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$  που περιέχονται στα νερά.

**γ. Μόνιμη σκληρότητα, μη επικαθήμενη**

Τη συνιστούν το σύνολο των υδατοδιαλυτών αλάτων θεικών, χλωριούχων και νιτρικών ασβεστίου και μαγνησίου που περιέχονται στα νερά.  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$

**δ. Σκληρότητα ασβεστίου**

Τη συνιστούν το σύνολο των υδατοδιαλυτών αλάτων του ασβεστίου, διττανθρακικά, θειικά, χλωριούχα και νιτρικά  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  που περιέχονται στα νερά.

**ε. Σκληρότητα μαγνησίου**

Τη συνιστούν το σύνολο των υδατοδιαλυτών αλάτων του μαγνησίου, διττανθρακικά, θειικά, χλωριούχα και νιτρικά  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ .



### 3.1.3 Βαθμοί σκληρότητας

Η σκληρότητα των νερών εκφράζεται σε ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{CaCO}_3$ ) είτε σε οξείδιο του ασβεστίου ( $\text{CaO}$ ) ανάλογα, και καθορίζεται από το βαθμό σκληρότητας.

#### α. Γαλλικοί βαθμοί - °Fr

Εκφράζουν τη σκληρότητα του ασβεστίου και μαγνησίου σε γραμμάρια ισοδύναμης ποσότητας ανθρακικού ασβεστίου ( $\text{CaCO}_3$ ) που περιέχονται ανά 100 λίτρα νερού.

#### β. Γερμανικοί βαθμοί - °dh

Εκφράζουν τη σκληρότητα του ασβεστίου και μαγνησίου σε γραμμάρια ισοδύναμης ποσότητας οξειδίου του ασβεστίου ( $\text{CaO}$ ) που περιέχονται ανά 100 λίτρα νερού.

#### γ. Αγγλικοί βαθμοί - °e

Εκφράζουν τη σκληρότητα του ασβεστίου και μαγνησίου σε γραμμάρια ισοδύναμης ποσότητας ανθρακικού ασβεστίου ( $\text{CaCO}_3$ ) που περιέχονται ανά 70 λίτρα νερού.

#### δ. Σκληρότητα σε ppm

Εκφράζει τη σκληρότητα ασβεστίου και μαγνησίου σε ισοδύναμη ποσότητα ανθρακικού ασβεστίου ( $\text{CaCO}_3$ ) που περιέχονται στα νερά και δίδεται σε ppm.

#### ε. Σκληρότητα σε Αγγλικούς Βόθρους κλίμακας Clark

Εκφράζουν τη σκληρότητα ασβεστίου και μαγνησίου σε ισοδύναμη ποσότητα ανθρακικού ασβεστίου εκπεφρασμένη σε γραμμάρια κόκκων (grains) ανά αυτοκρατορικό γαλόνι (imperial gallon) που ισοδυναμεί με 4,543 λίτρα νερού. Ένας κόκκος (grain) ισούται με 0,648 g ( $\text{CaCO}_3$ ).

#### στ. Σκληρότητα Η.Π.Α.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής η σκληρότητα ασβεστίου και μαγνησίου εκφράζεται σε ισοδύναμη ποσότητα ανθρακικού ασβεστίου, εκπεφρασμένη σε γραμμάρια κόκκων (grain) ανά αμερικάνικο γαλόνι νερού. Ένα U.S γαλόνι ισούται με 3.785 Lt νερού.

### ζ. Μονάδα σκληρότητας val

Η μονάδα σκληρότητας val χρησιμοποιείται για ορισμένες εργασίες και κυρίως για νερά τροφοδότησης ατμολεβητών υψηλής πίεσης. Οι μονάδες val και mval (χιλιοστοβάλ) εκφράζουν τη σκληρότητα σε meq ιόντων ασβεστίου ( $\text{Ca}^{++}$ ) ή σε meq, ανθρακικού ασβεστίου ( $\text{CaCO}_3$ ), είτε σε meq οξειδίου του ασβεστίου ( $\text{CaO}$ ), που περιέχονται σε ένα λίτρο νερό.

### η. Σκληρότητα ασβεστίου και μαγνησίου

Σε ορισμένες περιπτώσεις και για ειδικούς λόγους η σκληρότητα που οφείλεται στα ιόντα ασβεστίου ( $\text{Ca}^{++}$ ) και στα ιόντα μαγνησίου ( $\text{Mg}^{++}$ ) αναφέρεται χωριστά.

|                                                     |   |        |
|-----------------------------------------------------|---|--------|
| Ισοδύναμο ασβεστίου 40/2                            | → | 20     |
| Ισοδύναμο μαγνησίου 24.32/2                         | → | 12.16  |
| Σκληρότητα ανθρακικού ασβεστίου ( $\text{CaCO}_3$ ) | → | 100.00 |
| Σκληρότητα ανθρακικού μαγνησίου ( $\text{MgCO}_3$ ) | → | 84.32  |
| Σχέση $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$                 | → | 1.186  |

θ. Η σκληρότητα ανθρακικού ασβεστίου σε Γαλλικούς Βαθμούς ισοδυναμεί με τη σκληρότητα του μαγνησίου πολλαπλασιαζόμενη με το συντελεστή 1.186  $\text{CaCO}_3 = \text{MgCO}_3 * 1.186$

- Για τη σκληρότητα οξειδίου του ασβεστίου (Γερμανικοί βαθμοί σκληρότητας) ισχύει η σχέση  $\text{CaO}/\text{MgO} \rightarrow 56/40.32 = 1.4$

- Η σκληρότητα του ασβεστίου σε Γερμανικούς βαθμούς ισοδυναμεί με τη σκληρότητα μαγνησίου πολλαπλασιαζόμενη με το συντελεστή 1.4  $\text{CaO} = \text{MgO} * 1.4$

Πίνακας 3.1 Στον πίνακα αναγράφονται οι βαθμοί σκληρότητας και η ανά λίτρο περιεκτικότητα των νερών σε ανθρακικό ασβέστιο και οξείδιο του ασβεστίου

| Βαθμοί σκληρότητας | Ένωση ασβεστίου   | mg / lt |
|--------------------|-------------------|---------|
| Γαλλικοί °Fr       | CaCO <sub>3</sub> | 10,00   |
| Γερμανικοί °dh     | CaO               | 10,00   |
| Αγγλικοί °e        | CaCO <sub>3</sub> | 14,28   |

Πίνακας 3.2 Πίνακας μετατροπής βαθμών σκληρότητας

| Πίνακας μετατροπής βαθμών σκληρότητας |                   |                |                          |                                |       |
|---------------------------------------|-------------------|----------------|--------------------------|--------------------------------|-------|
| Γαλλικοί<br>° Fr                      | Γερμανικοί<br>°dh | Αγγλικοί<br>°e | ppm<br>CaCO <sub>3</sub> | Κόκκοι<br>Grains/USA<br>Gallon | mval  |
| 1.00                                  | 0.560             | 0.70           | 10.0                     | 0.583                          | 0.200 |
| 1.78                                  | 1.000             | 1.24           | 17.9                     | 1.044                          | 0.357 |
| 1.43                                  | 0.800             | 1.00           | 14.3                     | 0.829                          | 0.286 |
| 0.10                                  | 0.056             | 0.07           | 1.0                      | 0.058                          | -     |
| 1.71                                  | 0.958             | 1.20           | 17.1                     | 1.000                          | -     |
| 5.01                                  | 2.800             | 3.50           | -                        | -                              | 1.000 |

### 3.1.4 Κατάταξη των νερών ως προς τη σκληρότητα

α. Τα νερά ως προς τη σκληρότητα σε Γερμανικούς Βαθμούς χαρακτηρίζονται:

Πίνακας 3.3

|               |          |
|---------------|----------|
| Πολύ μαλακά   | <4 dh    |
| Μαλακά        | 4-8 dh   |
| Μέτρια Σκληρά | 8-12 dh  |
| Αρκετά Σκληρά | 12-18 dh |
| Σκληρά        | 18-30 dh |
| Πολύ σκληρά   | >30 dh   |

β. Ως προς τη σκληρότητα σε Γαλλικούς βαθμούς χαρακτηρίζονται:

Πίνακας 3.4

|             |            |
|-------------|------------|
| Μαλακά      | <10 ° Fr   |
| Ημίσκληρα   | 10-20 ° Fr |
| Σκληρά      | 20-30 ° Fr |
| Πολύ σκληρά | >30 ° Fr   |

γ. Ως προς τη σκληρότητα σε ppm χαρακτηρίζονται:

Πίνακας 3.5

|             |             |
|-------------|-------------|
| Μαλακά      | <100 ppm    |
| Ημίσκληρα   | 100-200 ppm |
| Σκληρά      | 200-300 ppm |
| Πολύ σκληρά | >300 ppm    |

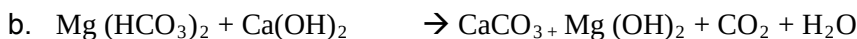
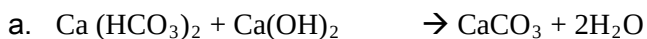
Τα σκληρά νερά προκαλούν εναποθέσεις δυσδιάλυτων αλάτων «πουρί» στα σκεύη θέρμανσης και βρασμού νερού, σε πλυντήρια πιάτων και πλύσης ρούχων, σε σιδερωτήρια, σε προθερμαντήρες, σε θερμοσίφωνες, σε λέβητες κ.λπ.

Δυσχεραίνουν το βρασμό των οσπρίων και του κρέατος, δεν έχουν ευχάριστη γεύση και ιδιαίτερα σε καταναλωτές που έχουν συνηθίσει να πίνουν μαλακά νερά. Καφές και τσάι χάνουν πολύ από τη γεύση τους με τα σκληρά νερά. Σε ορισμένες Βιομηχανίες (σαπωνοποιίας, βυρσοδεψίας, Βαφείων, χημικών και φαρμακευτικών προϊόντων, υφαντουργίας κ.α.) τα σκληρά νερά προκαλούν σημαντικές ζημιές στην παραγωγή και στην ποιότητα των προϊόντων, με μεγάλες οικονομικές επιπτώσεις.

## Μέθοδοι Αποσκλήρυνσης

### 3.2 Αποσκλήρυνση με χημικές ενώσεις

Με τη χρησιμοποίηση, σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ανάλογης ποσότητας και μόνο υδροξειδίου του ασβεστίου  $\text{Ca(OH)}_2$ , επιτυγχάνεται εξανθράκωση και απομάκρυνση των αλάτων της παροδικής σκληρότητας. Κατ' αυτήν τα διτ-τανθρακικά άλατα του ασβεστίου και μαγνησίου καταβυθίζονται ως δυσδιάλυτα άλατα του ανθρακικού ασβεστίου  $\text{CaCO}_3$  και του υδροξειδίου του μαγνησίου  $\text{Mg(OH)}_2$ .



Η διαλυτότητα του ανθρακικού ασβεστίου στους  $18^\circ\text{C}$  και σε PH 9.4 είναι 13 ppm. Η διαλυτότητα του υδροξειδίου του μαγνησίου στους  $18^\circ\text{C}$  και σε PH 10.6 είναι 9 ppm. Με τη χρησιμοποίηση υδρασβέστου και ανθρακικού νατρίου επιτυγχάνεται πλήρης αποσκλήρυνση των φυσικών νερών.

Σύμφωνα με τις παραπάνω αντιδράσεις καταβυθίζονται τα άλατα της **παροδικής σκληρότητας**. Τα άλατα της **μονίμου σκληρότητας** καταβυθίζονται σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις:

Πίνακας 3.6

|                            |   |                          |               |                                                     |   |
|----------------------------|---|--------------------------|---------------|-----------------------------------------------------|---|
| $\text{CaSO}_4$            | + | $\text{Na}_2\text{CO}_3$ | $\rightarrow$ | $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{CaCO}_3$            | ↓ |
| $\text{MgSO}_4$            | + | $\text{Ca}(\text{OH})_2$ | $\rightarrow$ | $\text{CaSO}_4 + \text{Mg}(\text{OH})_2$            | ↓ |
| $\text{CaSO}_4$            | + | $\text{Na}_2\text{CO}_3$ | $\rightarrow$ | $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{CaCO}_3$            | ↓ |
| $\text{CaCl}_2$            | + | $\text{Na}_2\text{CO}_3$ | $\rightarrow$ | $2\text{NaCl} + \text{MgCO}_3$                      |   |
| $\text{MgCl}_2$            | + | $\text{Na}_2\text{CO}_3$ | $\rightarrow$ | $2\text{NaCl} + \text{MgCO}_3$                      |   |
| $\text{MgCO}_2$            | + | $\text{CO}(\text{HO})_2$ | $\rightarrow$ | $\text{CaCO}_3 + \text{Mg}(\text{OH})_2$            | ↓ |
| $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ | + | $\text{Na}_2\text{CO}_3$ | $\rightarrow$ | $2\text{NaNO}_3 + \text{CaCO}_3$                    | ↓ |
| $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ | + | $\text{Ca}(\text{HO})_3$ | $\rightarrow$ | $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + \text{Mg}(\text{OH})_2$ | ↓ |
| $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ | + | $\text{Na}_2\text{CO}_3$ | $\rightarrow$ | $2\text{NaNO}_3 + \text{CaCO}_3$                    | ↓ |

Τα ανθρακικά και θειικά άλατα του ασβεστίου  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$  όπως και εκείνα του υδροξειδίου του μαγνησίου καταβυθίζονται σε αλκαλικό περιβάλλον με σόδα ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Η διαλυτότητα του θειικού ασβεστίου  $\text{CaSO}_4$  στους  $18^\circ\text{C}$  είναι περίπου 18%. Ένεκα της σχετικά υψηλής διαλυτότητας του θειικού ασβεστίου και της λεπτότητας των ιζημάτων του ανθρακικού ασβεστίου και των υδροξειδίων μαγνησίου, σιδήρου, μαγγανίου, αργιλίου κ.ά., τα αποσκληρυμένα με τη μέθοδο αυτή νερά δεν είναι διαυγή. Έχουν μικροαιωρήματα και αρκετή θολερότητα.

Για τους παραπάνω λόγους και για πλήρη διαυγάσει τα αποσκληρυμένα με την αναφερόμενη μέθοδο νερά οδηγούνται σε κωνικές δεξαμενές καθίζησης, στις οποίες η ταχύτητα ροής των αποσκληρυμένων νερών δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 0,1 m/sec, για να παρέχεται αρκετός χρόνος καθίζησης των δυσδιάλυτων αιωρούμενων ιζημάτων στις κωνικές δεξαμενές.

Τα σχετικά διαυγή αποσκληρυμένα νερά, που παίρνονται με σωληνώσεις από θέσεις κείμενες λίγο πιο κάτω από την επιφάνεια της ήρεμης ροής, φέρονται στα ταχυδιωλιστήρια για πλήρη διαυγάσει, όταν η απαιτούμενη παροχή είναι πολύ μεγάλη. Αν η απαιτούμενη

ποσότητα αποσκληρυμένου νερού δεν είναι μεγάλη χρησιμοποιούνται ανάλογες δεξαμενές καθίζησης και στη συνέχεια τα νερά οδηγούνται σε απλά διυλιστήρια πυριτικής άμμου άδικης κοκκομετρικής διαβάθμισης.

### 3.3 Αποσκλήρυνση με ανόργανους φυσικούς και τεχνητούς ανταλλάκτες

Οι ιοντοανταλλάκτες είναι ανόργανες φυσικές ή τεχνητές ενώσεις με διάφορο γεωχημική και εδαφοχημική σύνθεση αλάτων, είτε πολυμερείς χημικές οργανικές ενώσεις διαφόρου τύπου.

Κατατάσσονται στις παρακάτω τρεις κατηγορίες:

- Φυσικοί ζεόλιθοι
- Τεχνητοί ζεόλιθοι ή περμουτίτες
- Πολυμερείς οργανικές χημικές ενώσεις ή ρητίνες ιοντοανταλλαγής

#### 3.3.1 Φυσικοί ζεόλιθοι

Είναι ένυδρα πυριτικά άλατα του αργιλίου γενικού τύπου:  $Al_2O_3 - mSiO_2 \cdot nH_2O$  όπου (m) εκφράζει τον αριθμό των μορίων του διοξειδίου του πυριτίου ( $SiO_2$ ) και (n) τον αριθμό των μορίων του νερού που απαρτίζουν τα μόρια των φυσικών «Ζεόλιθων». Τα υδάτινα διαλύματα των ενώσεων αυτών έχουν κολλοειδή σύσταση και ικανότητα, λόγω ισόμορφων αντικαταστάσεων πυριτίου από αργίλιο και αργιλίου από σίδηρο, να συγκρατούν κατιόντα καλίου, νατρίου, ασβεστίου, μαγνησίου, σιδήρου κ.ά. ( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Fe^{++}$ ) και να τα εναλλάσσουν ανάλογα με τα άλατα του νερού.

Με τα οξείδια καλίου, νατρίου, ασβεστίου κ.λπ. σχηματίζονται βασικοί κατιονικοί φυσικοί «Ζεόλιθοι» όπως αυτοί που φαίνονται στον Πίνακα 3.7:

Πίνακας 3.7

|                  |                                                                                                                                                                                                      |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Οι του νατρίου   | $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6 \text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$<br>$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4 \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ |
| Οι του καλίου    | $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6 \text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$<br>$\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4 \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$   |
| Οι του ασβεστίου | $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6 \text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$<br>$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6 \text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$                   |

Τα κολλοειδή των εδαφών που έχουν ιοντοανταλλακτικές ικανότητες είναι τύπου μοντμοριλονίτου, ιλλίτου, καολινίτου και χαρακτηρίζονται φυσικοί Ζεόλιθοι τύπου:

Πίνακας 3.8

|                 |                                                                                                                  |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Μοντμοριλονίτου | $\text{Mg} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot$                               |
| Ιλλίτου         | $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ |
| Καολινίτου      | $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                 |

Όταν οι φυσικοί Ζεόλιθοι είναι κορεσμένοι με νάτριο και διαρρέονται από φυσικά σκληρά νερά είτε βρίσκονται σε υδάτινο περιβάλλον σκληρών νερών εναλλάσσουν τα προσροφημένα απ' αυτούς κατιόντα νατρίου, με τα ιόντα του ασβεστίου και μαγνησίου των νερών και ενεργούν ως φυσικοί αποσκληρυντές. [Αξιολόγηση ζεολιθικών τοφών ως προς την καταλληλότητα τους για αποσκλήρυνση νερών, Βασιλεία Δασκαλάσκη]



### 3.3.2 Τεχνητοί ζεόλιθοι - Περμουτίτες

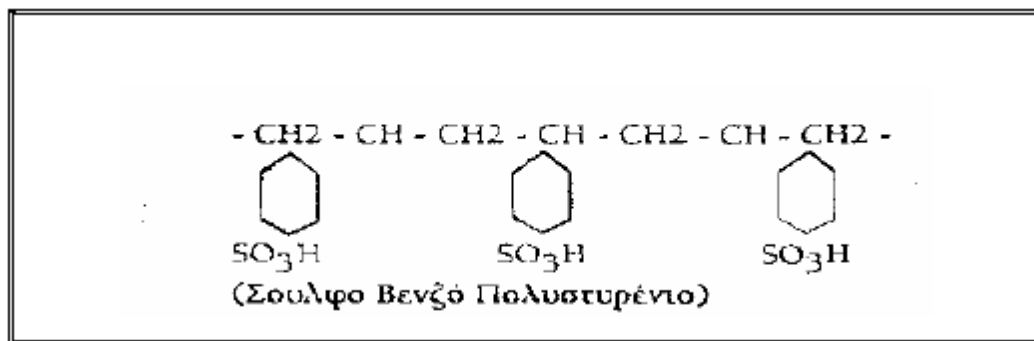
Η αντιστρεπτή ικανότητα των φυσικών ζεόλιθων να εναλλάσσουν κατιόντα χρησιμοποιήθηκε σε μεγάλο βαθμό για την αποσκλήρυνση των νερών. Μελετήθηκαν και παρασκευάστηκαν τεχνητοί βελτιωμένοι ζεόλιθοι, που είναι αποτελεσματικότεροι των φυσικών και χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις διάφορες βιομηχανίες για την αποσκλήρυνση των νερών. Οι βελτιωμένοι ανόργανοι τεχνητοί ζεόλιθοι φέρονται στο εμπόριο με την ονομασία **περμουτίτες**. [Αξιολόγηση ζεολιθικών τοφφών ως προς την καταλληλότητα τους για αποσκλήρυνση νερών, Βασιλεία Δασκαλάσκη]

### 3.4 Αποσκλήρυνση με οργανικούς τεχνητούς ανταλλάκτες ρητίνες ιοντοανταλλαγής

Έχουν μελετηθεί και παράγονται αρκετοί ειδικοί τύποι ιοντοανταλλακτικών ρητινών κατιονικής και ανιονικής εναλλαγής και χρησιμοποιούνται στη Βιομηχανία εξευγενισμένων προϊόντων και κύρια στη βελτίωση της ποιότητας του νερού.

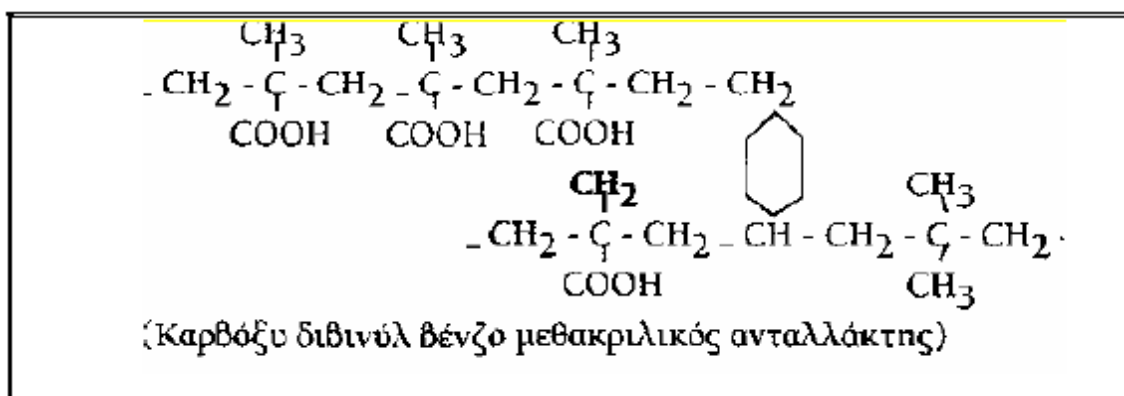
#### 3.4.1 Ρητίνες κατιονικής εναλλαγής

Είναι παράγωγα πολυστυρενίου με ελεύθερη δραστική σουλφομάδα ( $\text{SO}_3\text{H}$ ) σκληρού κατιονικού ανταλλάκτη με τον ακόλουθο συντακτικό τύπο:



Χημικός Τύπος I

Είτε παράγωγα μεθακρυλικού με ενεργό καρβοξυλομάδα (-COOH) μαλακού κατιονικού ανταλλάκτου με συντακτικό τύπο:



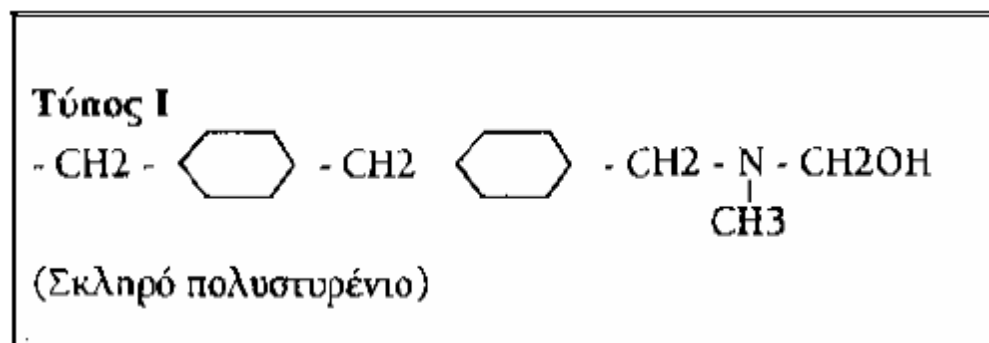
Χημικός Τύπος II

Αναφέρονται ακόμα κατιονικοί ανταλλάκτες μέσου τύπου και είναι μείγμα ακρυλικού και στυρενίου. Οι όξινοι κατιονικοί ανταλλάκτες εναλλάσσουν τα υδρογονοϊόντα των σούλφο και καρβοξυλομάδων με κατιόντα κάλιο, νάτριο, ασβέστιο, μαγνήσιο, κ.ά. ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ) που περιέχονται στα νερά. Έχουν συνολική ιοντοανταλλακτική ικανότητα 50 - 100 γραμμάρια ισοδύναμης ποσότητας ανθρακικού ασβεστίου ( $\text{CaCO}_3$ ) ανά λίτρο ρητίνης. Οι σκληροί ιοντοανταλλάκτες με δραστική σουλφομάδα αναγεννώνται με διαλύματα υδροχλωρικού οξέος συγκέντρωσης 6% - 10%, ενώ οι μαλακοί ιοντοανταλλάκτες με 3%. Οι αλκαλικοί σκληροί κατιοανταλλάκτες κύκλου νατρίου εναλλάσσουν τα ιόντα νατρίου των σουλφομάδων με ιόντα ασβεστίου και μαγνησίου, δηλαδή ενεργούν σαν αποσκληρυντές και όχι σαν αφαλατωτές. Έχουν ιοντοανταλλακτική ικανότητα 60 - 77 γραμμάρια ισοδύναμης

ποσότητας ανθρακικού ασβεστίου ( $\text{CaCO}_3$ ) ανά λίτρο ρητίνης και αναγεννώνται με διάλυμα 10% χλωριούχου νατρίου, (κύκλος νατρίου - αποσκλήρυνσης νερών). [Αξιολόγηση ζεολιθικών τοφφών ως προς την καταλληλότητα τους για αποσκλήρυνση νερών, Βασιλεία Δασκαλάσκη]

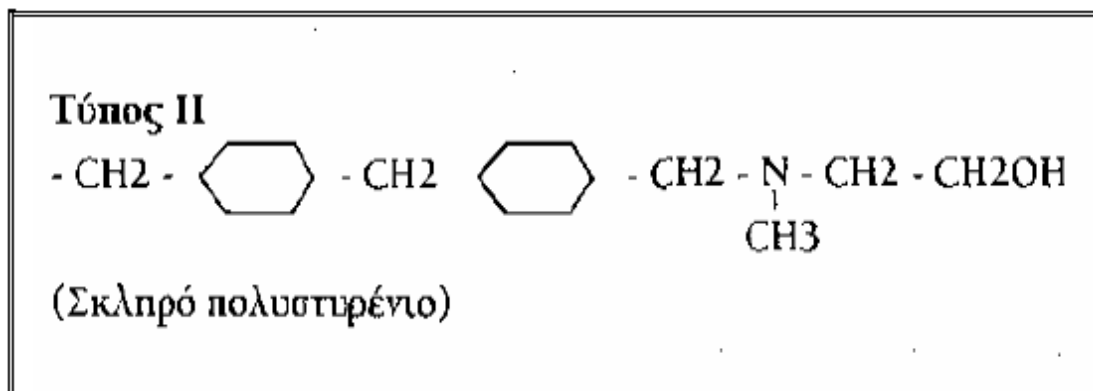
### 3.4.2 Ρητίνες ανιονικής εναλλαγής

Έχουν μελετηθεί και χρησιμοποιούνται δύο τύποι πολυμερών οργανικών χημικών ενώσεων με δραστική ομάδα υδροξυλιόντα ( $-\text{OH}$ ), την οποία εναλλάσσουν με χλωρίοντα και θειικά ιόντα ( $\text{Cl}$ ,  $\text{SO}_4$ .) που περιέχονται στα νερά. Ο τύπος της ρητίνης I είναι αζωτούχος ένωση πολυμερισμένου βενζολίου και τριών μεθυλομάδων και έχει τον ακόλουθο στερεοχημικό τύπο.



Χημικός Τύπος III

Ο τύπος της ρητίνης II είναι περίπου όμοιος με τον τύπο της ρητίνης I, διαφέρουν μόνο στο ότι ένα υδρογόνο της μεθυλομάδος ( $-\text{CH}_3$ ) έχει αντικατασταθεί με την αιθυλαλκοολική ομάδα ( $-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ ).



Χημικός Τύπος IV

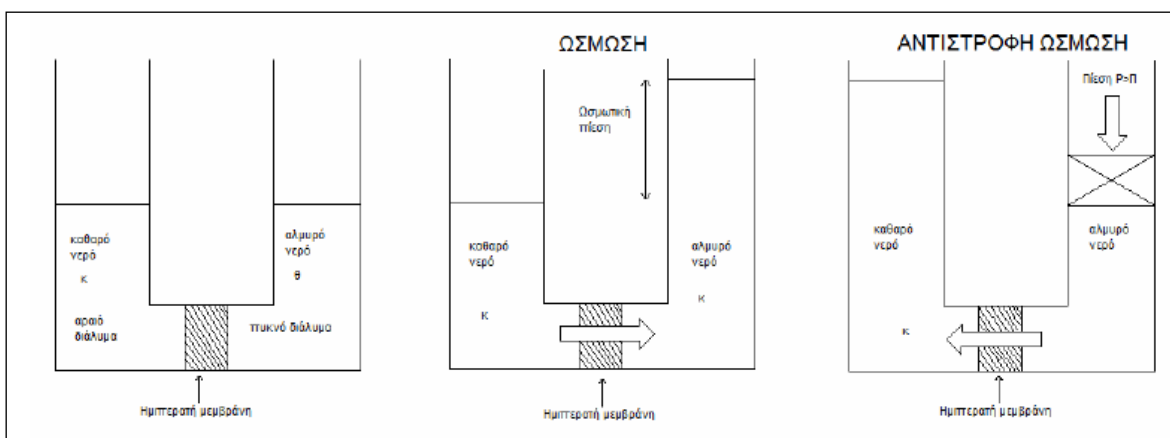
Ο τύπος της ρητίνης I είναι πλέον δραστικός και αποτελεσματικός και χρησιμοποιείται ευρύτατα. Η ολική ανιονική ικανότητα ανταλλαγής κυμαίνεται από 36-41 γραμμάρια ισοδύναμης ποσότητας ανθρακικού ασβεστίου ( $\text{CaCO}_3$ ) ανά λίτρο ρητίνης. Ο ανιονικός τύπος ρητίνης υδροξυλιόντος ( $-\text{OH}$ ) αναγεννάτε με διάλυμα καυστικού νατρίου ( $\text{NaOH}$ ) 4%.

### 3.5 Αντίστροφη Όσμωση

#### 3.5.1 Αρχή της Μεθόδου

Η διεργασία της αντίστροφης όσμωσης είναι συνέπεια της εφαρμογής μιας εξωτερικής πίεσης P, μεγαλύτερης της οσμωτικής Π, σε ένα πυκνό διάλυμα το οποίο διαχωρίζεται από ένα αραιό διάλυμα με ένα ημιπερατό τοίχωμα ή μια ημιπερατή μεμβράνη. Στην Εικ.3.1 που ακολουθεί διακρίνονται δύο θάλαμοι, ο κ και ο θ. Στον θάλαμο κ υπάρχει καθαρό νερό ενώ στον θ, θαλασσινό ή αλμυρό νερό. Τα δύο νερά χωρίζονται από μια ημιπερατή μεμβράνη Μ και βρίσκονται σε συνήθη ατμοσφαιρική πίεση. Λόγω της διαφοράς δυναμικού στις δύο πλευρές της μεμβράνης, παρατηρείται διάχυση νερού (δηλαδή του διαλύτη) από τον θάλαμο κ προς τον θάλαμο θ, μέσω της μεμβράνης. Δεν είναι κανονική ροή δια των πόρων της μεμβράνης αλλά διάχυση των μορίων του νερού μέσα από τα κενά της μοριακής δομής του πλέγματος της μεμβράνης. [Διπλωματική εργασία Εφαρμογή μονάδας αφαλάτωσης με χρήση αιολικής ενέργειας στο νησί της Πάτμου, Α.Καλλονιάτης, 2008]

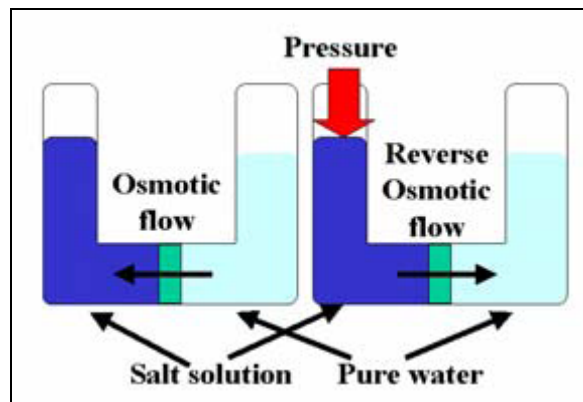
Εικ 3.1 Η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης



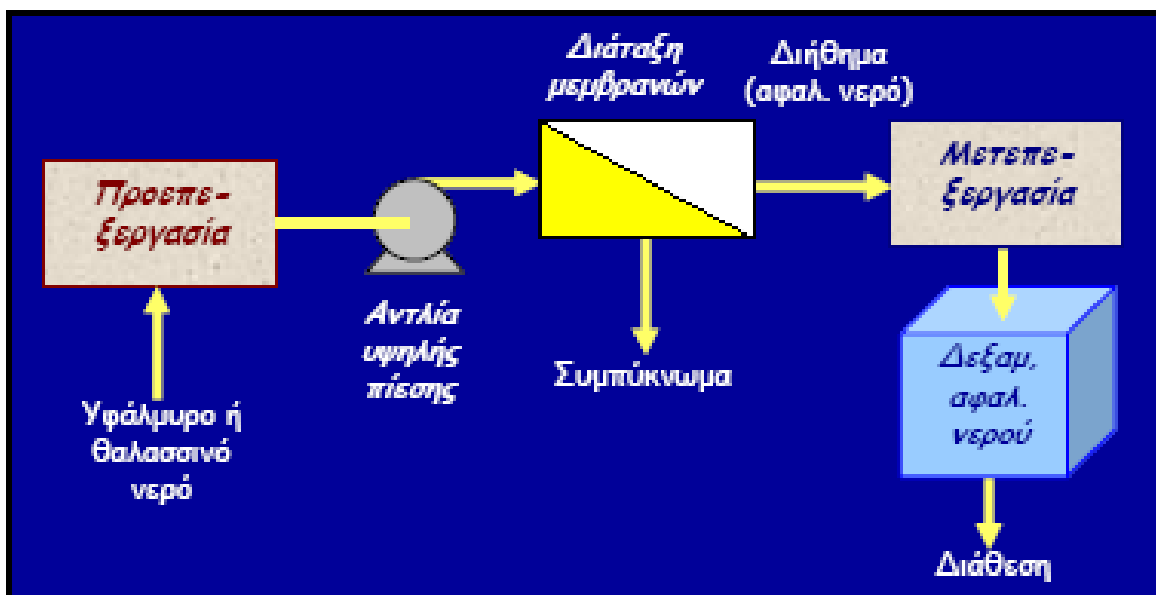
Η κινητικότητα των μορίων του νερού στη διεπιφάνεια νερού-μεμβράνης είναι μεγαλύτερη από αυτή των αλάτων (διαλυμένη ουσία) με αποτέλεσμα τα άλατα (δ.ο.) να απορρίπτονται από τη μεμβράνη και να παραμείνουν στον θάλαμο κ. Το καθαρό νερό που διαχέεται μέσα από τη μεμβράνη ελαττώνει την πίεση και αυξάνει την συγκέντρωση των αλάτων του καθαρού νερού, ενώ συγχρόνως αραιώνει το θαλάσσιο νερό και αυξάνει την πίεση στον θάλαμο θ. Η αύξηση αυτή εμφανίζεται ως υδροστατική διαφορά της στάθμης των δύο διαλυμάτων. Αυτή η αύξηση της υδροστατικής πίεσης έχει ως συνέπεια τη βαθμιαία ελάττωση της ροής του νερού από τον θάλαμο κ στον θάλαμο θ. Σε κάποιο σημείο της διαρκώς ελαττωμένης ποσότητας νερού που διαχέεται προς τον θάλαμο θ, η αύξηση της υδροστατικής πίεσης αντισταθμίζει τη ροή και αποκαθίσταται μια κινητική ισορροπία, όπου το νερό ρέει προς τις δύο κατευθύνσεις. Στο σημείο της ισορροπίας η υδροστατική διαφορά της πίεσης ονομάζεται οσμωτική πίεση. Εφόσον δεν επεμβαίνουν άλλοι εξωτερικοί παράγοντες παραμένει σταθερή στο σημείο ισορροπίας. Αυτό ονομάζεται φαινόμενο της όσμωσης.

Εάν τώρα εφαρμοστεί μια εξωτερική πίεση στην επιφάνεια του θαλασσινού νερού μεγαλύτερη της οσμωτικής ( $P \gg \Pi$ ) το φαινόμενο της όσμωσης αντιστρέφεται και τα μόρια του νερού διαχέονται από το θαλασσινό νερό προς το καθαρό, από τον θάλαμο θ προς τον θάλαμο κ. Η ταχύτητα ροής του νερού είναι ανάλογη με τη διαφορά της εφαρμοζόμενης πίεσης  $P$  και της οσμωτικής  $\Pi$ . Στη διεργασία της αντίστροφης όσμωσης η ροή του νερού

τροφοδοσίας είναι συνεχής, ενώ η ταχύτητά του ρυθμίζεται ώστε η συγκέντρωση άλμης να κρατείται σε ορισμένα όρια που να μην ελαττώνουν τη ροή του καθαρού νερού για την επικρατούσα πίεση. [Διπλωματική εργασία Εφαρμογή μονάδας αφαλάτωσης με χρήση αιολικής ενέργειας στο νησί της Πάτμου, Α.Καλλονιάτης, 2008]



Εικ.3.2 Φαινόμενο της Όσμωσης και Αντίστροφη Όσμωση [Μέθοδοι επεξεργασίας βιομηχανικού νερού, Ν.Ανδρίτσος]



Διάγραμμα 3.1 Διάγραμμα λειτουργίας μονάδας αφαλάτωσης με τη μέθοδο της αντίστροφης όσμωσης [Μέθοδοι επεξεργασίας βιομηχανικού νερού, Ν.Ανδρίτσος]

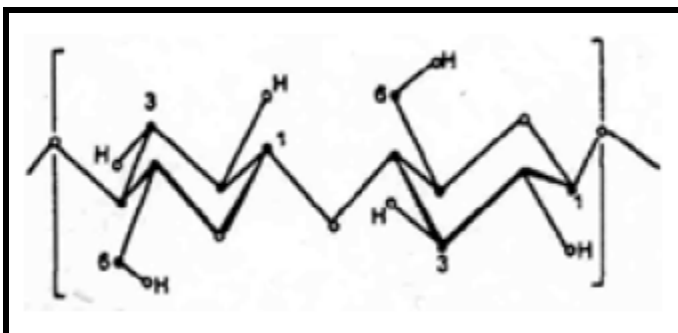
Αρχικά γίνεται άντληση του νερού από τη θάλασσα και στη συνέχεια γίνεται η προεπεξεργασία του. Αυτό γίνεται ώστε να απομακρυνθούν μεγάλα μόρια αλάτων που θα μπορούσαν να φράξουν τους πόρους των μεμβρανών και να αναπτύξουν μικροοργανισμούς στο νερό. Έπειτα, μέσω μιας αντλίας υψηλής πίεσης, το νερό περνάει μέσα από τις μεμβράνες όπου και γίνεται η αφαλάτωση του. Η πίεση της αντλίας ποικίλλει από 17-27 bar για το υφάλμυρο νερό και από 55-82 bar για το θαλασσινό νερό. Από τις μεμβράνες εξέρχεται το αφαλατωμένο νερό και το νερό με μεγάλη περιεκτικότητα σε άλατα, η λεγόμενη άλμη. Τέλος, η τελική επεξεργασία (μετεπεξεργασία) αποτελείται από συστήματα αποστείρωσης, σταθεροποίησης και εμπλουτισμού του νερού με μεταλλικά στοιχεία ώστε να πληρούνται οι επιθυμητές προδιαγραφές για τη χρήση του.

### **3.5.2 Πρώτες ύλες Μεμβρανών στην Αντίστροφη Όσμωση**

Παρότι για την παρασκευή των μεμβρανών έχουν χρησιμοποιηθεί περισσότερα από 130 υλικά για πρώτες ύλες, λίγα έχουν πετύχει εμπορικά και ακόμα λιγότερα έχουν εγκριθεί από το νόμο για χρήση τους στους τομείς του νερού και των τροφίμων. Κάποια από τα υλικά που χρησιμοποιούνται συχνά για την παρασκευή μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης είναι τα πολυαμίδια, οι πολυσουλφόνες, τα πολυιμίδια κ.α. [Cheryan 1998b, Merry 1996]

#### **3.5.2.1 Οξική κυτταρίνη**

Η αρχική πρώτη ύλη, που χρησιμοποιείται για την παρασκευή των μεμβρανών, είναι η κυτταρίνη η οποία είναι ένα πολυμερές από β-1,4 συνδεδεμένες μονάδες γλυκόζης (Εικ.3.3). Η κυτταρίνη και τα παράγωγα της είναι, γενικά, ευθύγραμμα και άκαμπτα μόρια, σε σχήμα ράβδου και αυτές οι ιδιότητες θεωρούνται σημαντικές στις εφαρμογές των μεμβρανών. Κύρια πηγή της κυτταρίνης είναι ο πολτός των ξύλων ή τριχίδια βαμβακόσπορου (cotton linters), εάν και υπήρξε ενδιαφέρον για μικροκρυσταλλική κυτταρίνη, η οποία είναι χημικά τροποποιημένος πολτός. [Συμβολή στον χαρακτηρισμό μεμβρανών, Ιωάννης Ξίάρχος, 2006]



Εικ. 3.3 Δομή κυτταρίνης

Η οξική κυτταρίνη (CA) παραλαμβάνεται από την κυτταρίνη με ακετυλίωση (αντίδραση με οξικό ανυδρίτη, οξικό οξύ και θειικό οξύ). Μία ακόμη σημαντική φυσική ιδιότητα της κυτταρίνης είναι ο βαθμός πολυμερισμού της που είναι 100-200, δηλαδή μοριακό βάρος περίπου 25000-80000.

Τα πλεονεκτήματα της οξικής κυτταρίνης και των παραγώγων της ως υλικά μεμβρανών συνοψίζονται παρακάτω:

- Υδροφιλικότητα, η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική στην ελαχιστοποίηση του «στομώματος» (fouling) των μεμβρανών.
- Υψηλές τιμές ροής για μεγάλο εύρος μεγέθους πόρων
- Σχετικά εύκολη παρασκευή
- Χαμηλό κόστος

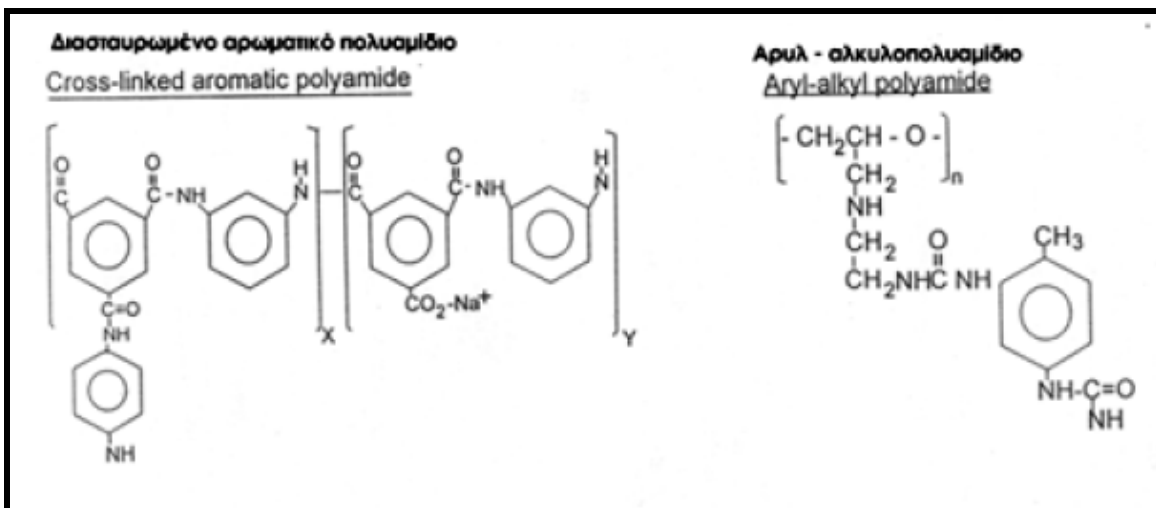
Ως μειονεκτήματα των μεμβρανών από οξική κυτταρίνη, αναφέρονται ενδεικτικά τα παρακάτω:

- Περιορισμένο θερμοκρασιακό εύρος: η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης είναι 30°C που είναι μειονέκτημα από την πλευρά της ροής (η υψηλή θερμοκρασία αυξάνει τη ροή) και της υγιεινής, αφού η χαμηλή θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας ευνοεί την ανάπτυξη μικροβίων.
- Περιορισμένο εύρος pH: η επιτρεπόμενη περιοχή είναι 2-8 (συνήθως 3-6)
- Χαμηλή ανθεκτικότητα στο χλώριο
- Υψηλή βιοαποικοδομησιμότητα κατά τη χρήση [Cheryan 1998b, Merry 1996]



### 3.5.2.2 Πολυαμιδικές μεμβράνες

Η τάξη αυτών των υλικών χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη ενός αμιδικού δεσμού στη δομή τους (-CONH-). Τυπικές δομές κάποιων πολυαμιδικών μεμβρανών δίνονται στην **Εικ 3.4**. Οι συγκεκριμένες μεμβράνες δεν παρουσιάζουν κάποια από τα συσχετιζόμενα προβλήματα με άλλες μεμβράνες όπως της οξικής κυτταρίνης. Π.χ. η αντοχή στο pH είναι μεγαλύτερη. Όμως δεν είναι τόσο ανθεκτικές στο χλώριο και παρουσιάζουν τάση στομώματος (fouling) [Cheryan 1998b, Merry 1996]



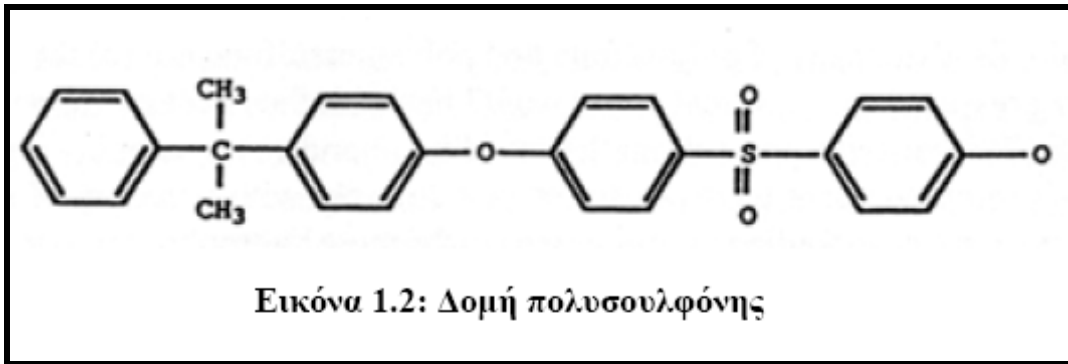
Εικ. 3.4 Τυπικές δομές πολυαμιδικών μεμβρανών

### 3.5.2.3 Πολυσουλφόνες (PS)

Οι πολυσουλφόνες χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη στη δομή τους επαναλαμβανόμενων μονάδων διφαινυλο-σουλφονών (diphenylene sulfone). Η ομάδα -SO<sub>2</sub> είναι αρκετά σταθερή και κάθε ένα από τα μόρια του οξυγόνου διαθέτει δύο ζεύγη αδέσμευτων ηλεκτρονίων. Οι επαναλαμβανόμενοι δακτύλιοι φαινυλίου προσδίδουν στο μόριο υψηλό βαθμό ακινησίας, ακαμψίας και αντοχής. Τέλος, οι ομάδες φαινυλοσουλφονών (phenyl sulfone) διαθέτουν υψηλή θερμική και οξειδωτική σταθερότητα. [Συμβολή στον χαρακτηρισμό μεμβρανών,

Οι πολυσουλφόνες (PS) χρησιμοποιούνται πολύ συχνά ως υλικά των μεμβρανών αντίστροφής όσμωσης (RO). Τα κυριότερα πλεονεκτήματα τους αναφέρονται παρακάτω:

- Ευρεία θερμοκρασιακή περιοχή: τυπικά ως ανώτατο όριο θερμοκρασίας θεωρούνται οι 75°C, αν και πολλοί κατασκευαστές υποστηρίζουν ότι οι μεμβράνες πολυσουλφόνης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες μέχρι 125°C.
- Ευρεία περιοχή του pH: οι PS μεμβράνες μπορούν να βρίσκονται συνεχώς εκτεθειμένες σε pH 1-13.
- Αρκετά καλή αντοχή στο χλώριο.
- Εύκολη κατασκευή.
- Καλή χημική αντοχή στους αλειφατικούς και αλογονωμένους υδρογονάνθρακες, στις αλκοόλες και τα οξέα.



Εικ. 3.5 Δομή πολυσουλφόνης

### 3.5.3 Μεμβράνες στην Αντίστροφη όσμωση

Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται για την αντίστροφη όσμωση πρέπει να έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Μεγάλη απόρριψη αλάτων με υψηλή διαπερατότητα διαλύτη.
- Ικανότητα να σχηματίζει λεπτά διαχωριστικά στρώματα μεγάλης αντοχής.
- Μεγάλο λόγο επιφάνειας προς όγκο.
- Μεγάλο εύρος λειτουργικών παραμέτρων, πίεσης, θερμοκρασίας και είδους διαλύματος τροφοδοσίας.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής. Η διάρκεια ζωής κυμαίνεται από 3-5 χρόνια, εξαρτώμενη από την ποιότητα του νερού προς επεξεργασία, τον τρόπο χρήσης και καθαρισμού.
- Μεγάλη αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια και βιολογικές επιθέσεις.
- Ικανότητα λειτουργίας σε μεγάλο εύρος pH.
- Χαμηλό κόστος.

Η διαπερατότητα των μεμβρανών σε νερό είναι σχετικά μικρή. Έτσι για να έχουμε ικανοποιητική παραγωγή νερού πρέπει η επιφάνεια να είναι μεγάλη. Από την δεκαετία του 60 μέχρι σήμερα έχουν δοκιμαστεί διάφορες διαμορφώσεις μεμβρανών ώστε να επιτύχουν μέγιστο λόγο επιφάνειας προς όγκο. Οι διαμορφώσεις αυτές είναι :

1. **Σωληνοειδή** στοιχεία μεμβρανών (tubular module).
2. **Δισκοειδή** στοιχεία μεμβρανών (plate and frame modules).
3. Στοιχεία μεμβρανών **σπειροειδούς περιέλιξης** (spiral wound modules).
4. Στοιχεία μεμβρανών **κοίλων ινών** (hollow fiber modules).

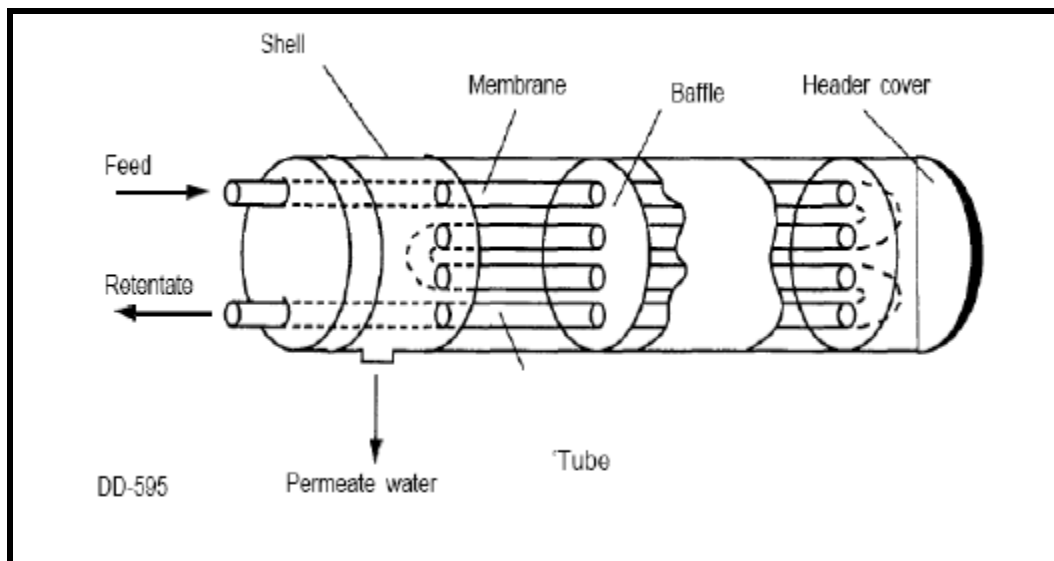
Οι δυο πρώτες χρησιμοποιούνται κυρίως για ερευνητικούς σκοπούς, ενώ οι δυο τελευταίες στο εμπόριο.

Παρακάτω αναλύονται περισσότερα τα είδη των μεμβρανών.

### **3.5.3.1 Σωληνοειδή στοιχεία μεμβρανών (tubular module)**

Στη διαμόρφωση αυτή τα στοιχεία των μεμβρανών έχουν τη μορφή σωλήνα διαμέτρου 0,7-2,5cm, οι οποίοι τοποθετούνται στο εσωτερικό ειδικών δοχείων με ανθεκτικά τοιχώματα.

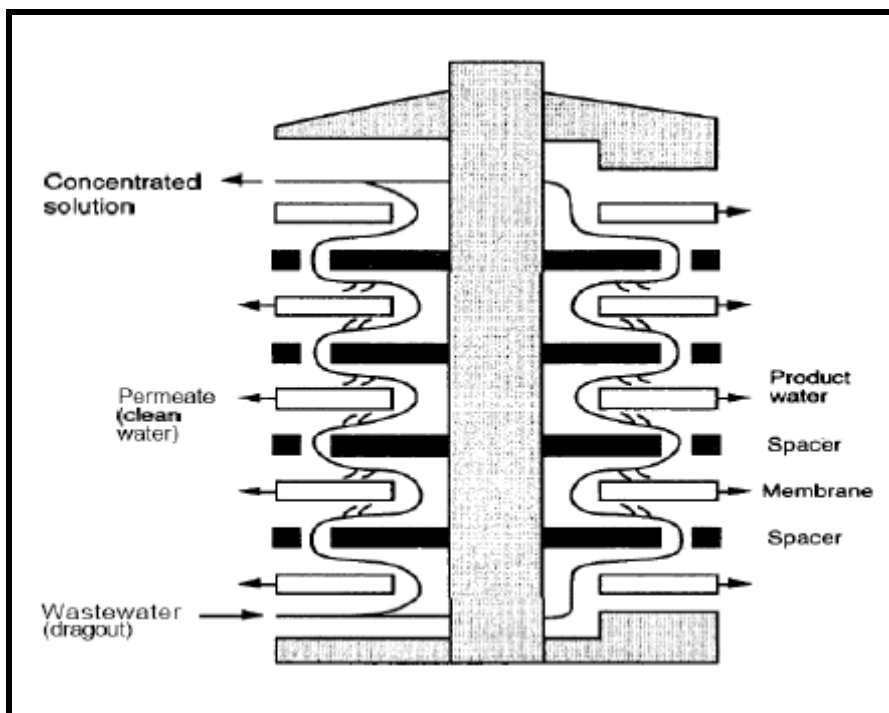
Η ενεργή επιφάνεια του στοιχείου της μεμβράνης βρίσκεται στο εσωτερικό της. Έτσι η άλμη διοχετεύεται στο εσωτερικό του στοιχείου της μεμβράνης. Το παραγόμενο νερό εξέρχεται κάθετα στη διεύθυνση της ροής, ενώ από το άλλο άκρο εξέρχεται η άλμη. Το δοχείο πίεσης μπορεί να περιέχει ένα ή περισσότερα στοιχεία μεμβρανών σχηματίζοντας ένα στοιχείο αντίστροφης όσμωσης. [Διπλωματική εργασία Εφαρμογή μονάδας αφαλάτωσης με χρήση αιολικής ενέργειας στο νησί της Πάτμου, Α.Καλλονιάτης, 2008]



Εικ.3.6 Σωληνοειδής μεμβράνη (Tubular module)

### 3.5.3.2 Δισκοειδή στοιχεία μεμβρανών (plate and frame modules)

Τα στοιχεία μεμβρανών εναλλάσσονται με διαχωριστήρες. Τα στοιχεία μεμβρανών έχουν τη μορφή φακέλου με διαχωριστήρα στο εσωτερικό τους. Έτσι το αλατούχο διάλυμα ρέει εξωτερικά του φακέλου των μεμβρανών μέσω των σχισμών που υπάρχουν. Το νερό διέρχεται από τις μεμβράνες στο εσωτερικό του φακέλου και εξέρχεται από την ειδική σχισμή από όπου συλλέγεται.

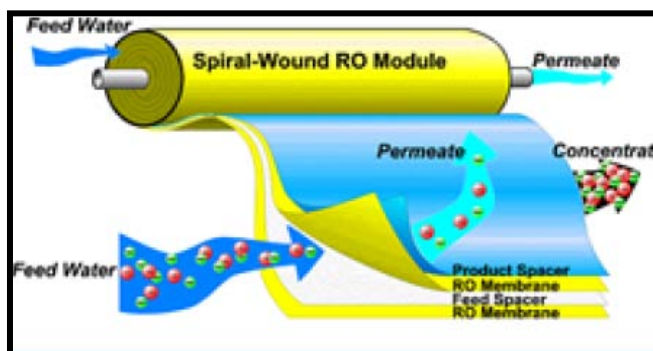


Εικ.3.7 Δισκοειδή στοιχεία μεμβρανών (plate and frame modules)

### 3.5.3.3 Στοιχεία μεμβρανών σπειροειδούς περιέλιξης (spiral wound modules)

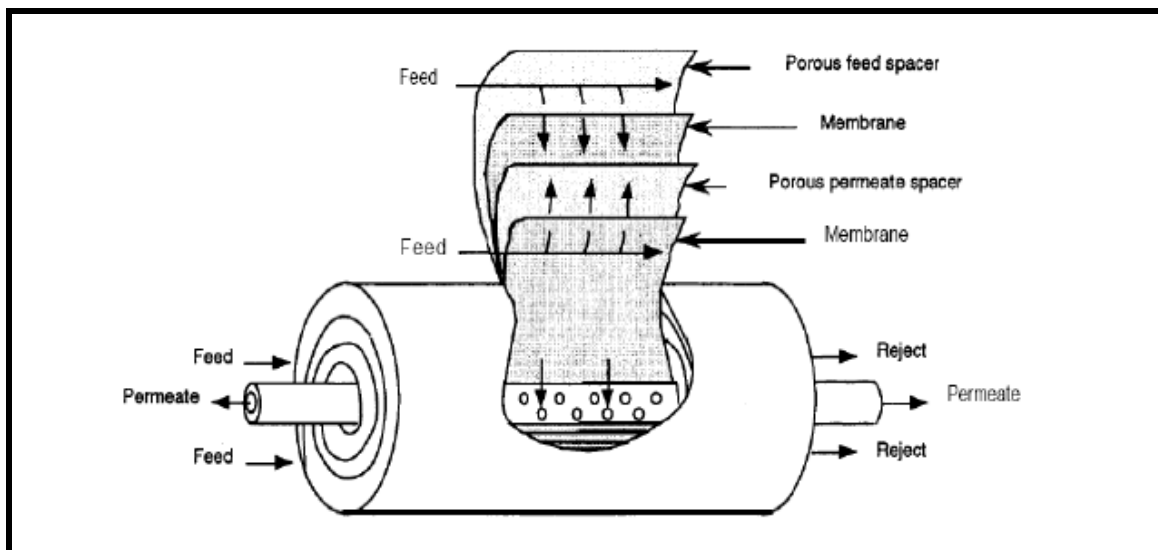
Στη διαμόρφωση αυτή δυο επίπεδα στοιχεία τοποθετούνται το ένα απέναντι από το άλλο με τις δραστικές επιφάνειές τους στην εξωτερική πλευρά. Μεταξύ των μεμβρανών τοποθετείται πορώδες πολυμερές υλικό. Το πορώδες φύλλο τοποθετείται έτσι ώστε οι μεμβράνες να μην έρχονται σε επαφή όταν ασκείται υψηλή πίεση. Στο εσωτερικό της μεμβράνης τοποθετείται ένας διάτρητος σωλήνας ο οποίος συλλέγει το παραγόμενο νερό.

Οι μεμβράνες τυλίγονται γύρω από τον σωλήνα συλλογής μαζί με το ειδικό πολυμερές πλέγμα σχηματίζοντας σπειροειδή περιέλιξη. Το πλέγμα δημιουργεί τον κατάλληλο χώρο μεταξύ των



μεμβρανών ώστε να μπορεί να κινείται το αλατούχο διάλυμα, ενώ ταυτόχρονα δημιουργεί

στροβίλους εμποδίζοντας τον σχηματισμό στρωτής ροής. Το όλο σύστημα καλύπτεται από ειδική ρητίνη με υαλοβάμβακα και τοποθετείται σε ειδικό δοχείο πίεσης. Το αλατούχο διάλυμα κινείται αξονικά κατά μήκος του σωλήνα συλλογής, ενώ το παραγόμενο νερό εισέρχεται εγκάρσια στο εσωτερικό του φακέλου, κινείται σπειροειδώς μέχρι να φτάσει στον σωλήνα συλλογής από το άκρο του οποίου εξέρχεται. Ένα ή περισσότερα στοιχεία μεμβρανών μπορούν να τοποθετηθούν σε σειρά κατά μήκος των δοχείων πίεσης σχηματίζοντας ένα στοιχείο αντίστροφης όσμωσης. Η πίεση λειτουργίας αυτών των στοιχείων φτάνει τα 80 bar, ενώ παρουσιάζουν υψηλό λόγο επιφάνειας προς όγκο. Σήμερα αποτελούν την πλέον διαδεδομένη διαμόρφωση μεμβρανών.

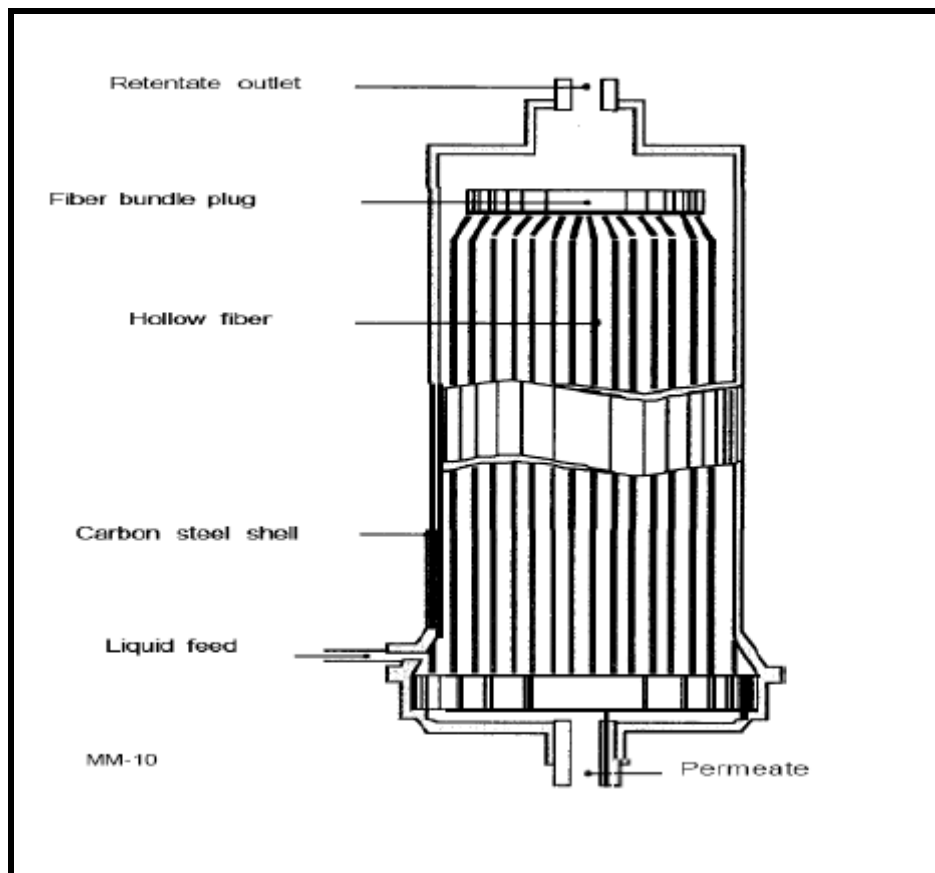


Εικ.3.8 Στοιχεία μεμβρανών σπειροειδούς περιέλιξης (spiral wound modules)

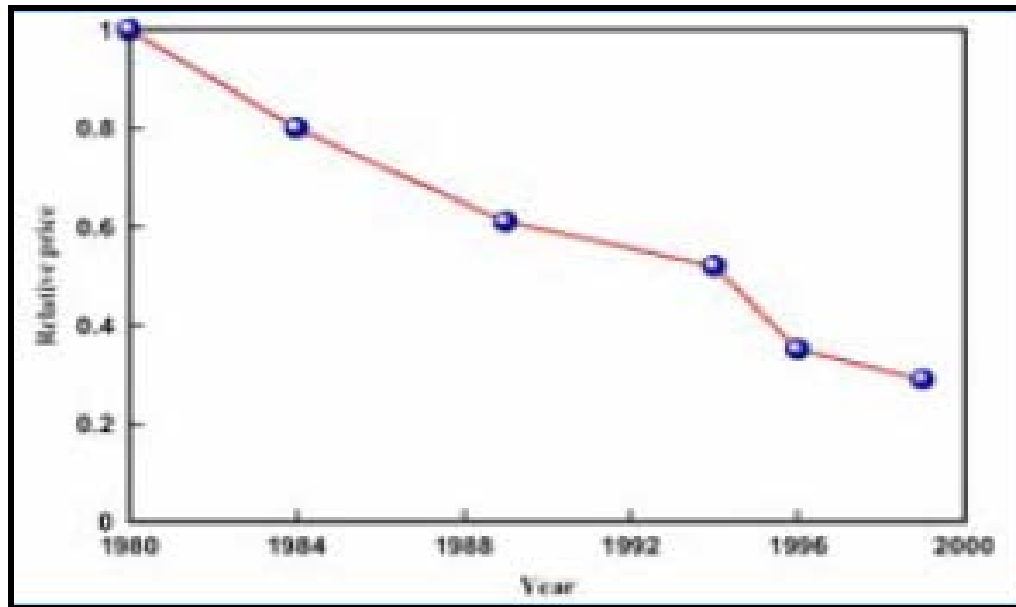
#### 3.5.3.4 Στοιχεία μεμβρανών κοίλων ινών (hollow fiber modules)

Στις μεμβράνες αυτής της διαμόρφωσης το αλατούχο διάλυμα κινείται κάθετα προς τις κοίλες ίνες υπό υψηλή πίεση. Λόγω της ασκούμενης πίεσης το νερό εισέρχεται στο εσωτερικό των κοίλων ινών που αποτελούν ασύμμετρες μεμβράνες και κινείται κατά μήκος τους και εξέρχεται από το ανοιχτό άκρο τους, που βρίσκεται σε ειδικό πορώδες υλικό. Το όλο σύστημα τοποθετείται σε ειδικό δοχείο πίεσης που αποτελεί το στοιχείο της αντίστροφης όσμωσης. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το μεγάλο εμβαδόν επιφάνειας

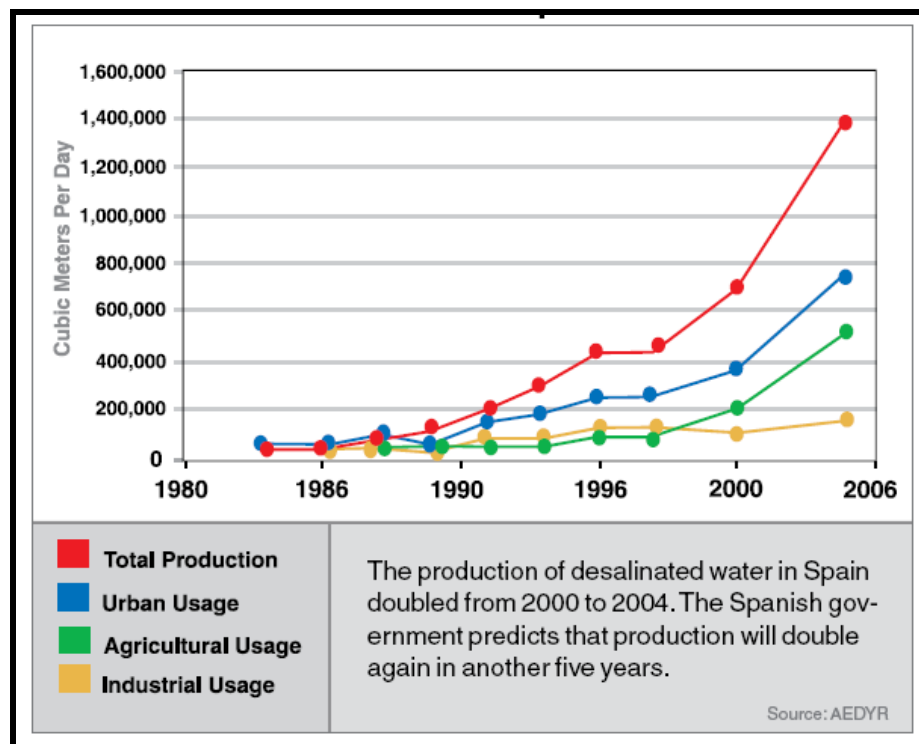
μεμβράνης για δεδομένο όγκο. Έτσι με τη διαμόρφωση αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν υλικά με μικρό συντελεστή διαπερατότητας σε νερό. Σοβαρό μειονέκτημα είναι ότι λόγω της κατασκευής τους λειτουργούν ως φίλτρα για τα αιωρούμενα συστατικά του διαλύματος τροφοδοσίας με αποτέλεσμα οι μεμβράνες αυτού του τύπου να μολύνονται εύκολα. [Διπλωματική εργασία Εφαρμογή μονάδας αφαλάτωσης με χρήση αιολικής ενέργειας στο νησί της Πάτμου, Α.Καλλονιάτης, 2008]



Εικ.3.9 Στοιχεία μεμβρανών κοίλων ινών (hollow fiber modules)



Διάγραμμα 3.2 Το κόστος των μεμβρανών μειώνεται σταθερά (Semiat 2000) (Relative price/year) [Μέθοδοι επεξεργασίας βιομηχανικού νερού, Ν.Ανδρίτσος]



Διάγραμμα 3.3 Χρήση αφαλατωμένου νερού στην Ισπανία. Η παραγωγή αφαλατωμένου νερού στην Ισπανία διπλασιάστηκε κατά την διάρκεια 2000-2004. Οι επιστήμονες λένε πως η παραγωγή θα ξανά διπλασιαστεί τα επόμενα πέντε χρόνια



### 3.5.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου

#### Πλεονεκτήματα

- Είναι μέθοδος λιγότερη ενεργοβόρα από τις μεθόδους απόσταξης.
- Η ενέργεια που απαιτούν οι αντλίες, οι οποίες εξασφαλίζουν την λειτουργία της εγκατάστασης, μπορούν να παρθούν από Ανανεώσιμες Πηγές ενέργειας (Αιολική ενέργεια, Ηλιακή ενέργεια).

#### Μειονεκτήματα

- Μεγάλες ποσότητες υγρών απόβλητων που περιέχουν τα απορριπτόμενα στοιχεία.

### 3.6 Νανοδιήθηση

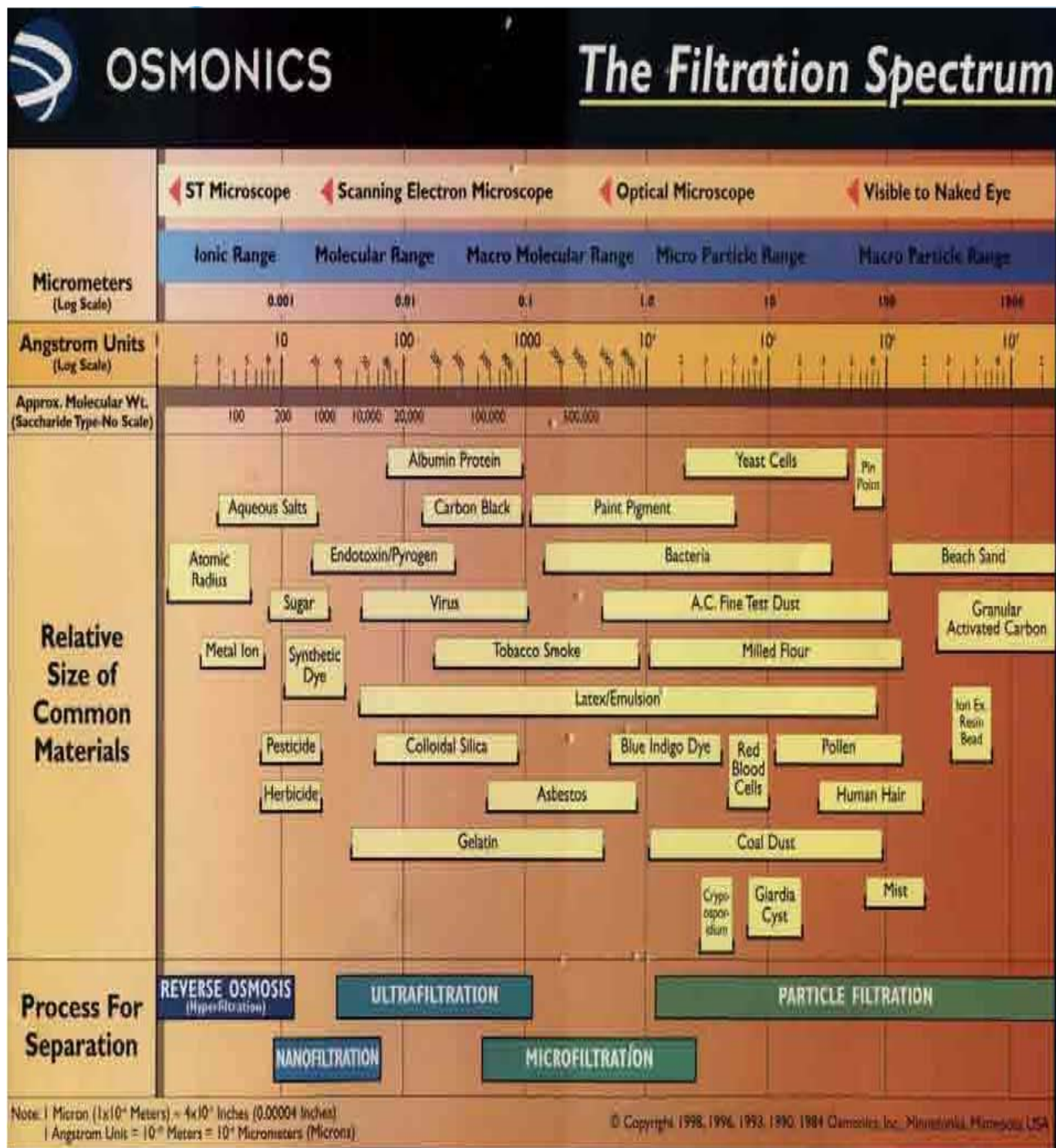
Η νανοδιήθηση είναι ένας όρος που επινοήθηκε περίπου πριν από δεκατέσσερα χρόνια για να ορίσει μεμβράνες, οι οποίες ήδη χρησιμοποιούνταν και αναφέρονταν ως ‘loose reverse osmosis’. Οι μεμβράνες αυτές έχουν διάμετρο πόρων περίπου ίση με ένα νανόμετρο και έχουν ως αποτέλεσμα την μερική συγκράτηση των αλάτων. Οι τυπικές μεμβράνες νανοδιήθησης επιτρέπουν την διέλευση ενός μεγαλύτερου ποσοστού μονοσθενών ιόντων αλάτων από ότι δισθενών ή τρισθενών ιόντων. Οι περισσότερες μεμβράνες νανοδιήθησης από πολυμερές φέρουν τυπικά φορτία, τα οποία απαγορεύουν την διέλευση ιόντων μεγαλύτερου σθένους από ότι μονοσθενών μέσα από την μεμβράνη.

Το υλικό κατασκευής των μεμβρανών είναι συνήθως η οξική κυτταρίνη (βλ. αντίστροφη ώσμωση) και πολυμερή πολυαμιδίου (PA), το οποίο χρησιμοποιείται πάνω στην μεμβράνη, με λεπτό κάλυμμα πολυαμιδίου. Κάποια από τα πλεονεκτήματα του PA είναι η ευρεία χημική αντίσταση και η ευρεία ανεκτικότητα στο pH. Όμως η ανεκτικότητα του στο χλώριο είναι μειωμένη.

Οι μεμβράνες διαχωρισμού της νανοδιήθησης καλύπτονται από έναν σύνθετο συνδυασμό χωρικού αποκλεισμού (steric exclusion) και επιφανειακών δυνάμεων αλληλεπίδρασης. Οι μεμβράνες φέρουν επιφανειακά φορτία τα οποία παρουσιάζουν μια ασυνήθιστη συμπεριφορά εκλεκτικότητας, η οποία δεν μπορεί να προβλεφτεί μόνο από τη βάση του μεγέθους των φυσικών πόρων. Το εύρος του MWCO (Molecular Weight Cutoff) στις μεμβράνες νανοδιήθησης μπορεί να ποικίλει σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με τις παραμέτρους λειτουργίας και τις χημικές αλληλεπιδράσεις ή επιφανειακές δυνάμεις, οι οποίες υπάρχουν ανάμεσα στην υπό εξέταση διαλυμένη ουσία και τη μεμβράνη.

Οι μεμβράνες της νανοδιήθησης και υπερδιήθησης, αν και είναι ουσιαστικά ταυτόσημες εξωτερικά με τις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης, εξυπηρετούν διαφορετικές λειτουργίες διαχωρισμού. Σημαντικά επίπεδα ανάκτησης πόρων, ικανότητα βελτίωσης και πρόληψης μόλυνσης αποτελούν τα κίνητρα επιβολής για τη βιομηχανία έτσι ώστε να συνεχίσει να χρησιμοποιεί νανοδιήθηση και υπερδιήθηση. [Νανοδιήθηση, Μ.Νικολοπούλου 2001]

Πίνακας 3.9 Οι μεμβράνες νανοδιήθησης καλύπτουν το κενό ανάμεσα στην αντίστροφη ώσμωση (reverse osmosis) και την υπερδιήθηση (ultrafiltration) [Φυσικές και χημικές διεργασίες εξυγίανσης και παραγωγής πόσιμου νερού - Τ. Αλμπάνης 2008]



## **Εφαρμογές της νανοδιήθησης**

### **1. Επεξεργασία αποβλήτων:**

#### Αποχρωματισμός εκροής από εγκατάσταση επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Οι περιβαλλοντικές απαιτήσεις έχουν επιβάλλει έμμεσα και άμεσα αυστηρότερα περιβαλλοντικά κριτήρια όσον αφορά την απολύμανση της εκροής εγκαταστάσεων βιολογικών καθαρισμών με χημικές ή άλλες μεθόδους. Η επεξεργασία με την τεχνολογία της νανοδιήθησης έχει ως αποτέλεσμα τον αποχρωματισμό, την ελάττωση TOC, BOD και του οργανικού φορτίου από τα απόβλητα.

#### Ανακύκλωση του ύδατος στους κύκλους πλυσίματος

Το χρησιμοποιούμενο σε εμπορικά πλυντήρια νερό περιέχει υψηλά επίπεδα BOD, COD, απορρυπαντικών και απολυμαντικών. Προκειμένου να ανακυκλωθεί το νερό στους κύκλους του πλυσίματος, τα μολύνοντα υλικά πρέπει να απομακρυνθούν. Αυτό επιτυγχάνεται με συστήματα συνδυασμού νανοδιήθησης/μικροδιήθησης που εγκαθίστανται για να αφαιρεθεί το λάδι, το λίπος, τα Ολικά Διαλυμένα Στερεά (TDS), τα Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS), τα απορρυπαντικά και τα απολυμαντικά από το νερό της πλύσης, έτσι ώστε να παραχθεί υψηλής ποιότητας νερό για επαναχρησιμοποίηση στους κύκλους ύδατος των πλυντηρίων.

#### Επεξεργασία αποβλήτων βιομηχανικών διεργασιών – Όξινα απόβλητα

Σε πολλές βιομηχανικές διεργασίες δημιουργούνται ρεύματα όξινων αποβλήτων. Η διαβρωτική φύση αυτών των ρευμάτων αποβλήτων αποτελεί πρόκληση στα στοιχεία της μεμβράνης και στα συστατικά στοιχεία του συστήματος. Ειδικά δομικά στοιχεία DS-3 και DS-5 χρησιμοποιούνται για να συγκεντρωθούν και να καθαριστούν τα ρεύματα των όξινων αποβλήτων. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται το κόστος της διάθεσης των αποβλήτων στις βιομηχανικές διαδικασίες και ανακτούνται τα πολύτιμα υλικά.

#### Διαχωρισμός Λαδιού – Ύδατος

Το διαλυτό λάδι (soluble oil) που προκύπτει από βιομηχανικές διεργασίες, μπορεί να αφαιρεθεί από το νερό με νανοδιήθηση, χρησιμοποιώντας μεμβράνες νανοδιήθησης.

### Επεξεργασία Κατσίγαρου

Ο κατσίγαρος (απόνερα ελαιουργείων) αποτελεί ένα σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα, αφού όταν δεν επεξεργάζεται έχει ως αποτέλεσμα την αλόγιστη επιβάρυνση των χειμάρρων και των ποταμών από τα υψηλά οργανικά και τοξικά φορτία του. Ο κατσίγαρος περιέχει όμως και πολλές ωφέλιμες ουσίες που μπορούν να ανακτηθούν μέσα από την εφαρμογή της χρήσης μεμβρανών.

## 2. Ανάκτηση Υλικών:

### Βιομηχανία ζάχαρης

Οι μεμβράνες νανοδιήθησης χρησιμοποιούνται συνήθως για τη συγκέντρωση της ζάχαρης και τον καθαρισμό των ρευμάτων ζάχαρης στη βιομηχανία. Οι μεμβράνες διαχωρίζουν επιμελώς τα σάκχαρα συγκεκριμένου μοριακού βάρους και απομακρύνουν το 60% του ύδατος, συγκεντρώνοντας ακατέργαστο χυμό ζάχαρης από 12 έως 30 Brix, μια κλίμακα που μετράει το βάρος της ζάχαρης σε διάλυση. Οι βαθμοί συγκράτησης των μεμβρανών κυμαίνονται από 10% έως και 40%.

### Βιομηχανία γάλακτος – Επεξεργασία – Αφαλάτωση Ορού Γάλακτος

Στις σύγχρονες εγκαταστάσεις παραγωγής τυριού η νανοδιήθηση συνδυάζεται με την υπερδιήθηση και την αντίστροφη ώσμωση για τη λήψη πρωτεϊνικού συμπυκνώματος, συμπυκνωμένης λακτόζης και επαναχρησιμοποιήσιμου ύδατος.

### Υφαντουργική βιομηχανία

Η βιομηχανία υφαντουργίας χρησιμοποιεί πολύτιμες βαφές (χρώματα) που είναι ορατά εάν εκρεύσουν στις δημόσιες υδάτινες οδούς. Επιπλέον, αυτές οι βαφές έχουν αποδειχθεί ότι είναι προάγγελοι τριαλογονομεθάνιου (THM) και έχουν καρκινογόνες ιδιότητες. Η διάθεση τους λοιπόν δημιουργεί, τόσο αισθητικό πρόβλημα όσο και περιβαλλοντικό. Ταυτόχρονα, η βιομηχανία υφαντουργίας αναζητά συνεχώς τρόπους για την προστασία του ύδατος, ενώ προσβλέπει και στο οικονομικό κέρδος από την ανάκτηση της βαφής. Οι μεμβράνες νανοδιήθησης μπορούν να προσφέρουν λύση στο πρόβλημα. Καταρχήν, οι υφαντουργικές

βαφές απορρίπτονται, ανακτώνται και επαναχρησιμοποιούνται. Έπειτα, η μόλυνση των υδάτινων πόρων αποφεύγεται και τελικά παράγεται ύδωρ που μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί.

#### Αναμόρφωση – Καθαρισμός Αιθυλικής Γλυκόλης

Το χρησιμοποιημένο αντιψυκτικό αυτοκινήτων (αιθυλική γλυκόλη) θεωρείται επικίνδυνο απόβλητο (hazardous waste). Το υψηλό κόστος διάθεσης του έχει σαν αποτέλεσμα να είναι πιο οικονομική η αναμόρφωση του μολυσμένου αντιψυκτικού έτσι ώστε να μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί. Η αναμόρφωση της αιθυλικής γλυκόλης μπορεί να επιτευχθεί με την εγκατάσταση ενός συστήματος μεμβράνης νανοδιήθησης: η αιθυλική γλυκόλη διαπερνά τη μεμβράνη, ενώ πολυσθενή άλατα, λάδια, αιωρούμενα στερεά και χρώμα αφαιρούνται.

#### Ανάκτηση αλκοολών με νανοδιήθηση

Μικρού μοριακού βάρους (MB) αλκοόλες, κυρίως μεθανόλη και αιθανόλη χρησιμοποιούνται ευρέως ως διαλύτες και καθαριστικά σε πολλές βιομηχανίες. Κατά τη διάρκεια της χρήσης τους μολύνονται και ανάλογα με την πραγματική τους χρήση, μπορεί να χρειάζονται περαιτέρω καθαρισμό. Αυτό το στάδιο συχνά εμπεριέχει δαπανηρή διύλιση ή καθαρισμό σε μια κεντρική βιομηχανική εγκατάσταση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, μικρού μοριακού βάρους αλκοόλες μπορούν να ανακυκλωθούν οικονομικά και πιο δραστικά με συστήματα νανοδιήθησης μεμβρανών από ότι με διαδικασία απόσταξης.

#### Απόβλητα επιμετάλλωσης

Συστήματα νανοδιήθησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάκτηση χαλκού που ξεπλύθηκε σε ρεύματα (rinse stream) με pH που κυμαίνεται από 1.5 έως 3.5. Αυτό το σύστημα συγκεντρώνει το άλας του χαλκού με έναν παράγοντα ανάκτησης από 10% έως 90%. Έπειτα το υπόλειμμα εισέρχεται σε μια μονάδα ανταλλαγής ένυδρου ιόντος, οπότε και παράγεται καθαρό άλας του χαλκού για επαναχρησιμοποίηση. Το διήθημα που είναι καθαρισμένο νερό μπορεί και αυτό να επαναχρησιμοποιηθεί.

### Βιομηχανία φαρμάκων

Η ιδιότητα των μεμβρανών νανοδιήθησης αλλά και όλων των μεμβρανών γενικότερα να συγκρατούν συστατικά και ενώσεις που δεν δύναται να διέλθουν από τους πόρους τους, τις καθιστά χρήσιμο εργαλείο και οικονομική μέθοδο στην συγκράτηση και συγκέντρωση πολύτιμων για την βιομηχανία φαρμακευτικών ουσιών.

### Βιομηχανία αναψυκτικών: νανοδιήθηση στην παραγωγή ποτών

#### 3. Αποσκλήρυνση νερού (ή αφαλάτωση νερού)

Οι μεμβράνες νανοδιήθησης προσφέρουν μια εναλλακτική αποτελεσματική λύση στη συμβατική διαδικασία αποσκλήρυνσης για την απομάκρυνση της σκληρότητας, της οσμής και άλλων συστατικών που συχνά βρίσκονται στα φυσικά αποθέματα ύδατος και στις εκροές διαδικασιών. *Η αποσκλήρυνση με την μέθοδο της νανοδιήθησης γίνεται σε χαμηλές σχετικά τιμές πίεσης, με αποτέλεσμα να είναι μια μέθοδος πιο οικονομική ενεργειακά από ότι άλλες (π.χ. αντίστροφη όσμωση).*

#### 4. Χρήση της νανοδιήθησης για επαγγελματική κινηματογράφηση

Η διαδικασία της νανοδιήθησης σε αυτήν την περίπτωση σχετίζεται με την αποκατάσταση χημικών και την ανακύκλωση ύδατος που χρησιμοποιούνται στην διαδικασία φωτογράφισης.

#### 5. Αποχρωματισμός πόσιμου ύδατος

Σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται επεξεργασία των υδάτων προκειμένου να επιτευχθεί απομάκρυνση παραγόντων, κυρίως χουμικής προέλευσης, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τον χρωματισμό των υδάτων. Κύριος λόγος που υπαγορεύει την άμεση απομάκρυνση αυτών των παραγόντων είναι κυρίως τα προβλήματα που πολύ συχνά παρουσιάζονται λόγω της χλωρίωσης των υδάτων αυτών για λόγους απολύμανσης. Συγκεκριμένα, είναι δυνατόν με την χλωρίωση να ανέβουν πέραν των ορίων ασφαλείας τα επίπεδα των ενώσεων THM, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τον σχηματισμό καρκινογενών ουσιών. Με την χρήση της νανοδιήθησης επιτυγχάνεται απομάκρυνση των παραγόντων που ευνοούν τη δημιουργία

THM (trihalomethanes) Επίσης, η νανοδιήθηση έχει και αποτέλεσμα στην αισθητική εικόνα του ύδατος και στην απομάκρυνση σε ικανοποιητικό βαθμό του χρώματος και της θολερότητας. Το χρώμα είναι αποδοκιμαστέο στα αποθέματα πόσιμου ύδατος, όχι μόνο για λόγους αισθητικής, αλλά και επειδή έχει αποδειχθεί ότι είναι πρόδρομος των ενώσεων THM.

6. Αφαίρεση αφομοιώσιμου οργανικού άνθρακα (AOC) και βιοδιασπώμενου διαλυμένου οργανικού άνθρακα (BDOC) με μεμβράνες νανοδιήθησης και αντίστροφης όσμωσης.

7. Εκλεκτικότητα ανιονικών ειδών σε ηλεκτρολυτικά μεικτά δυαδικά συστήματα για μεμβράνες νανοδιήθησης

Οι μεμβράνες νανοδιήθησης χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των ιδιοτήτων εκλεκτικότητας τους όσον αφορά τις διαφορετικές, ως προς τη τροφοδοσία, διαλύσεις. Όπως υδατικές διαλύσεις HCl, NaCl,  $\text{ClCa}_2$  και  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  σε απλά και μεικτά δυαδικά συστήματα.

8. Διαχωρισμός μειγμάτων συγκεντρωμένων οργανικών/ανόργανων αλάτων με νανοδιήθηση

Πολλές χημικές βιομηχανίες χρησιμοποιούν μια διαδικασία παραγωγής, η οποία παράγει εκροές απόβλητων που περιέχουν μείγματα οργανικών/ανόργανων ουσιών. Συχνά μπορούν να παραχθούν από αντιδράσεις παραγωγής αλάτων ή οξέων ή αλκαλίων που ακολουθούνται από ουδετεροποίηση. Η λειτουργία για μέγιστη παραγωγή ανά μονάδα όγκου αντιδραστήρα αναπαράγει υψηλής συγκέντρωσης (πάνω από 20% (w/v) αλάτων) αναμειγμένες εκροές. Ακολουθώντας την ανάκτηση του προϊόντος, οι εναπομένουσες εκροές είναι πολύ δύσκολο να διαχειριστούν. Η επαναχρησιμοποίηση των συστατικών και των συμβατικών βιοαποσυνθέσεων συνήθως απαιτεί διαχωρισμό των οργανικών από τα άλατα, καθώς η μεγάλη πλειοψηφία των μικροοργανισμών που χρησιμοποιούνται στην βιοεπεξεργασία δεν μπορούν να αντέξουν την οσμωτική πίεση και τα υψηλά επίπεδα αλάτων. Από όλες τις διαδικασίες μεμβρανών με δρώσα δύναμη, η νανοδιήθηση είναι η πιο κατάλληλη να αντιμετωπίσει το παραπάνω πρόβλημα, καθώς είναι ικανή να διαχωρίσει κατά μεγάλο βαθμό τα άλατα από συγγενή μικρά οργανικά μόρια. [Νανοδιήθηση, Μ.Νικολοπούλου]



### 3.7 Πλεονεκτήματα από τη χρήση αποσκληρυμένου νερού

Κλείνοντας το κεφάλαιο αποσκλήρυνσης αναφέρουμε μερικά πλεονεκτήματα από τη χρησιμοποίηση αποσκληρυμένου νερού γενικά.

- Δεν σημειώνονται επικαθίσεις αλάτων «πουρί» στους αγωγούς μεταφοράς νερού.
- Δεν μειώνεται η διάμετρος των σωλήνων μεταφοράς νερού και κατά συνέπεια η παροχή και η πίεση μένει σταθερή.
- Δεν σχηματίζεται «πουρί» δυσδιάλυτων αλάτων σε ατμολέβητες, σε προθερμαντήρες, σε θερμοσίφωνες, σε θερμοανταλλάκτες ψύξης, σε πλυντήρια ρούχων, πιάτων, σε οικιακές συσκευές κ.λπ.
- Επιτυγχάνεται οικονομία απορρυπαντικών (σάπωνες κ.λπ.) που κυμαίνεται από 20% - 40% ανάλογα.
- Τα νήματα, τα πλενόμενα υφάσματα, ο οικιακός και μη ρουχισμός διατηρούνται απαλά, εύκαμπτα, με ευχάριστο οσμή και έχουν μεγαλύτερη συνοχή και διάρκεια ζωής.
- Οι βαφές νημάτων και υφασμάτων είναι ομοιόμορφες.
- Ο βρασμός των οσπρίων και των φαγητών γενικά είναι ταχύτερος και τα φαγητά περισσότερο νόστιμα.
- Ο καφές, το τσάι, τα ποτά είναι περισσότερο ευχάριστα.
- Σε λουτήρες και μπάνια επιτυγχάνεται τέλειο και ευχάριστο λούσιμο μαλλιών

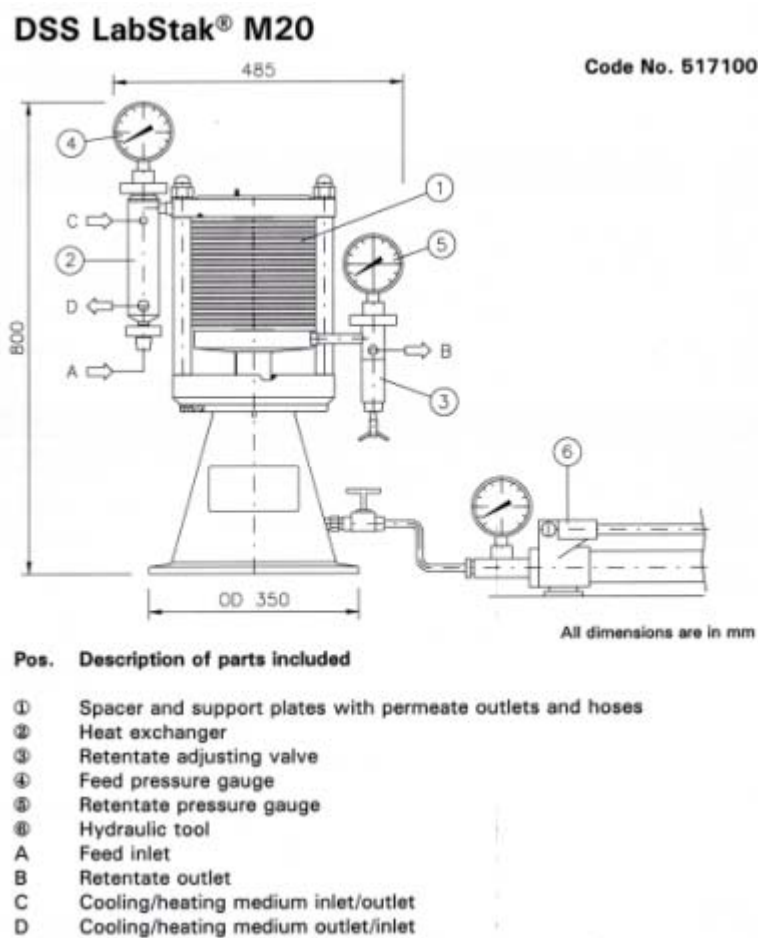
και σώματος.

Θα μπορούσαμε να αναφέρουμε ακόμα περισσότερες περιπτώσεις ως προς τα πλεονεκτήματα χρήσης αποσκληρυμένων και αφαλατωμένων νερών γενικά, όμως έχουμε επεκταθεί αρκετά στο κεφάλαιο αυτό. Σημειώνουμε μόνο ότι με τη χρησιμοποίηση αποσκληρυμένου νερού επιτυγχάνεται ποιότητα προϊόντων και οικονομία, που ανάλογα με την περίπτωση κυμαίνεται από 30% - 60%.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

#### 4.1 Περιγραφή της μονάδας



Εικ. 4.1 DSS LabStak M20 - 1. δίσκοι προστασίας της μεμβράνης και κατανομής της πίεσης και της ροής 2. εναλλάκτης θερμότητας 3. βαλβίδα ρύθμισης υπολείμματος 4-5 δείκτης πίεσης λειτουργίας τροφοδοσίας/υπολείμματος 6. υδραυλικό εξάρτημα Α. είσοδος τροφής Β. έξοδος υπολείμματος [Εγχειρίδιο DSS LabStak M20]

Το DSS LabStak M20 (Εικ.4.2) είναι μια μονάδα διήθησης εφαπτομενικής τροφοδοσίας (cross flow) στην οποία οι μεμβράνες τοποθετούνται στα spacer (δίσκοι προστασίας της μεμβράνης και κατανομής της πίεσης και της ροής) και αυτά με την σειρά τους τοποθετούνται και συμπιέζονται σε ένα κάθετο πλαίσιο. Το μεταλλικό πλαίσιο της μονάδας κρατάει και στηρίζει την συμπίεση του spacer στο οποίο βρίσκεται τοποθετημένη η μεμβράνη. Η βάση του πλαισίου είναι ένας μεταλλικός υδραυλικός κύλινδρος (hydraulic cylinder).



Εικ. 4.2 Η μονάδα DSS LabStak M20

Η μονάδα είναι εξοπλισμένη με δύο όργανα μέτρησης πίεσης (inlet, outlet), με μία βαλβίδα ρύθμισης της πίεσης και με υποδοχές εισόδου και εξόδου (της τροφής και του διηθήματος αντίστοιχα).

Για την χρήση του μηχανήματος είναι απαραίτητη μια υδραυλική αντλία (Εικ. 4.3) για να συμπιέζει το spacer με την μεμβράνη. Αυτή η χειροκίνητη αντλία είναι εξοπλισμένη με ενσωματωμένο ρεζερβουάρ λαδιού, χειροκίνητη βαλβίδα ρύθμισης πίεσης και ειδικό υδραυλικό σωλήνα υψηλής πίεσης. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε η υδραυλική αντλία της ENERPAC, μοντέλο P392. [Εγχειρίδιο DssLabStak M20]

Επίσης, είναι απαραίτητο, μία αντλία με μοτέρ και σύστημα σωληνώσεων, για την δημιουργία της ροής (flux) διαμέσου του υδραυλικού κυλίνδρου και του spacer. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε η αντλία του εργαστηρίου, WANNER ENGINEERING INC Hydra-Cell Industrial Pump model G13XDSGHHMEMA και τύπος του μοτέρ, VARMECA-10- Leroy Somer (κωδικός 013XDSGHHMEMA). [Εγχειρίδιο DssLabStak M20]



Εικ.4.3 Υδραυλική Αντλία

Τέλος, χρειάζεται ένα δοχείο, χωρητικότητας 4L, όπου τοποθετείται το διάλυμα τροφοδοσίας (feed liquid).

## 4.2 Μεμβράνες

Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενο Κεφάλαιο, υπάρχει μεγάλο εύρος διαφορετικών τύπων μεμβρανών, παρόλα αυτά η βασική δομή τους παραμένει ίδια. Το σχήμα της μεμβράνης είναι κυκλικό και η επιφάνεια είναι διαφορετική από κάθε πλευρά της μεμβράνης. Η μία πλευρά (skin) είναι το ενεργό τμήμα της. Η άλλη έχει σπογγώδης και πορώδης δομή και λειτουργεί ως βάση του skin ενώ ταυτόχρονα δίνει σταθερότητα στην δομή της μεμβράνης.

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι μεμβρανών. Η NFT-50, κωδικός και η NF-99. Χαρακτηριστικό των δύο παραπάνω μεμβρανών είναι το πολύ μικρό πάχος (thinfilm) σύνθεσης πολυεστέρα (PE). Το εμβαδόν της κάθε τέτοιας μεμβράνης είναι  $0.018 \text{ m}^2$  ενεργής επιφάνειας. Η αρχή λειτουργίας των μεμβρανών αυτών βασίζεται στην Νανοδιήθηση. [Εγχειρίδιο DssLabStak M20]

Πίνακας 4.1

| Χαρακτηριστικά Μεμβράνης NFT – 50 και NF- 99 |          |
|----------------------------------------------|----------|
| Εύρος pH                                     | 2-10     |
| Εύρος Πίεσης (bar)                           | 1-55 bar |
| Θερμοκρασία Λειτουργίας (C°)                 | 0-50 C°  |

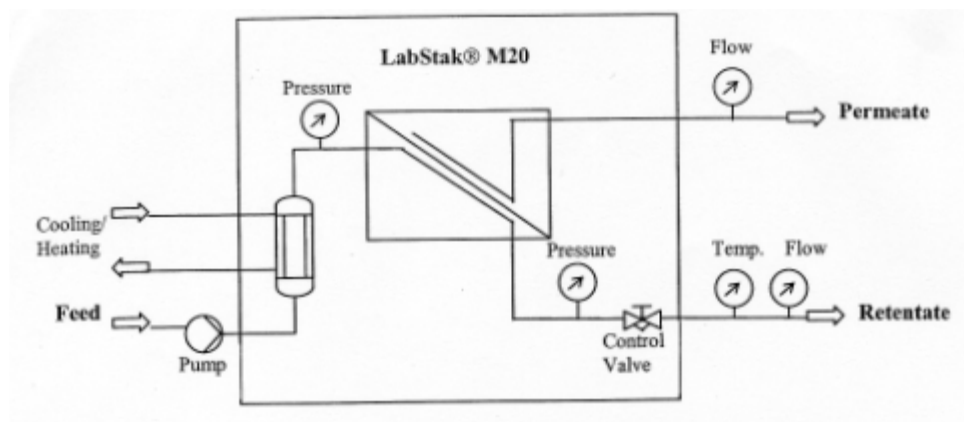
### 4.3 Τρόπος Λειτουργίας του DSS LabStak M20

Το DSS LabStak M20 χρησιμοποιείται για διαχωρισμό διαλυμάτων με την χρήση ημιπερατών μεμβρανών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αντίστροφη ώσμωση, νανοδιήθηση, υπερδιήθηση ή μικροδιήθηση, ανάλογα κάθε φορά με τον τύπο μεμβράνης.

Η λειτουργία του DSS LabStak M20 βασίζεται στην εφαπτομενική ροή. Η αντλία μεταφέρει το διάλυμα (feed) διαμέσου σωλήνων, στο συμπιεσμένο spacer, όπου έχει τοποθετηθεί η μεμβράνη. Η πίεση της τροφοδοσίας ρυθμίζεται στο επιθυμητό επίπεδο μέσω μιας βαλβίδας.

Η τροφοδοσία μεταφέρεται, με την βοήθεια της αντλίας, από το τανκ στην συμπιεσμένη μεμβράνη. Το μέρος της τροφοδοσίας το οποίο περνάει μέσα από την μεμβράνη ονομάζεται διήθημα (permeate). Το διήθημα μεταφέρεται μέσω του στομίου που υπάρχει στο spacer και από εκεί σε δοχείο συλλογής του επεξεργασμένου διαλύματος.

Το υπόλειμμα είναι η φάση που δεν περνάει δια μέσου της μεμβράνης και επιστρέφει πίσω στο αρχικό τανκ. Συνεχόμενη λειτουργία του DSS LabStak M20 είναι δυνατή. Σε αυτήν την περίπτωση η παροχή της τροφοδοσίας παρέχεται συνεχόμενα, αλλά κανονικά δεν είναι επαρκή για να ολοκληρώσει τον διαχωρισμό του διαλύματος. Για αυτό το λόγο, στις περισσότερες περιπτώσεις προτιμάται το πείραμα να γίνεται με επανακυκλοφορία του υπολείμματος. [Εγχειρίδιο DssLabStak M20]



Εικ. 4.4 Διάγραμμα ροής μιας πειραματικής διάταξης

Πίνακας 4.2

| <b>Τεχνικά Χαρακτηριστικά DSS LabStak M20</b> |                                                  |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Εμβαδόν Μembrάνης                             | 0.036 – 0.72 m <sup>2</sup>                      |
| Μέγιστη Πίεση                                 | 64 bar                                           |
| Μέγιστη Θερμοκρασία                           | 90 C°                                            |
| Εύρος pH                                      | 1- 14                                            |
| Βάρος DSS LabStak M20                         | 71 kg                                            |
| Cross flow                                    | 3.5 – 15 L/min                                   |
| Χωρητικότητα Διαλύματος                       | 2.75 L + 2.14 L/m <sup>2</sup> εμβαδόν μεμβράνης |

#### 4.4 Συναρμολόγηση της μεμβράνης και του spacer (plate stack)

Το DSS LabStak M20 μπορεί να λειτουργήσει ακόμα και με ένα ‘sandwich’ (η δομή δύο δίσκων προστασίας της μεμβράνης και έναν δίσκο στήριξης της μεμβράνης) εγκατεστημένο. Σε αυτό το είδος της εγκατάστασης το συνολικό εμβαδόν των μεμβρανών είναι 0.036m<sup>2</sup> (δύο μεμβράνες, 0.018 m<sup>2</sup> η κάθε μία). Επίσης, μπορεί να γίνει επιλογή του επιθυμητού εμβαδόν μεμβρανών, ανάμεσα στο ελάχιστο και το μέγιστο αριθμό ‘sandwich’ (η δομή δύο spacer και ενός support plate) . Ο μέγιστος αριθμός είναι 20, δηλαδή 40 μεμβράνες, με συνολικό εμβαδόν 0.72 m<sup>2</sup>.

Αν κριθεί απαραίτητο, υπάρχει δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί διηθητικό χαρτί για την καλύτερη λειτουργία των μεμβρανών. [Εγχειρίδιο DssLabStak M20]

##### 4.4.1 Βήματα Συναρμολόγησης

1. Τοποθετούμε μία πετσέτα ή ένα καθαρό κομμάτι ύφασμα στον πάγκο εργασίας. Βρέχουμε την πετσέτα με απιονισμένο νερό. Επίσης, καθαρίζουμε με απιονισμένο νερό τον δίσκο στήριξης της μεμβράνης (support plate ,εικ. 4.5) και το τοποθετούμε πάνω στην πετσέτα.



Εικ.4.5 Support plate

2. Στην συνέχεια, αν σκοπεύουμε να χρησιμοποιήσουμε διηθητικό χαρτί (filter paper), υγραίνουμε το φίλτρο με απιονισμένο νερό και το τοποθετούμε πάνω στον δίσκο (plate).
3. Τοποθετούμε στην σωστή θέση την μεμβράνη (π.χ. NF 99) και βάζουμε ένα δαχτυλίδι ασφαλείας (lock ring, εικ.4.6) στην κεντρική οπή.



Εικ.4.6 Δαχτυλίδι ασφαλείας (lock ring)

4. Αναποδογυρίζουμε τον δίσκο προστασίας (support plate – εικ.4.7), έτσι ώστε η μεμβράνη/ δαχτυλίδι ασφαλείας, να ακουμπάνε στην πετσέτα.





Εικ.4.7 Δίσκος προστασίας της μεμβράνης (spacer plate)

5. Τοποθετούμε, πάλι το διηθητικό χαρτί και την δεύτερη μεμβράνη. Μετά, εφαρμόζουμε το δεύτερο δαχτυλίδι ασφαλείας (lock ring) ώστε να μην είναι δυνατό να μετακινηθεί η μεμβράνη.
6. Τοποθετούμε έναν δίσκο προστασίας της μεμβράνης (spacer-plate) πάνω στην μεμβράνη, έτσι ώστε η κυρτή επιφάνεια που υπάρχει στο κέντρο του spacer να βρίσκεται προς τα κάτω.
7. Αναποδογυρίζουμε το 'sandwich' ξανά και τοποθετούμε τον δεύτερο δίσκος προστασίας της μεμβράνης (spacer plate), πάνω στην άλλη μεμβράνη. Και εδώ, η κυρτή επιφάνεια στο κέντρο του spacer πρέπει να βρίσκεται προς τα κάτω.
8. Τοποθετούμε την μεμβράνη προσεκτικά στο **DSS LabStak M20** κόντρα στις τρεις κάθετους ράβδους έτσι ώστε να μην μπορεί να μετακινηθεί.
9. Ξεκινάμε την διαδικασία της συμπίεσης.

**ΠΡΟΣΟΧΗ:** Οι μεμβράνες πρέπει να διατηρούνται σε υγρό περιβάλλον, μετά από την πρώτη τους χρήση

#### 4.4.2 Συμπίεση και Αποσυμπίεση της Μembrάνης

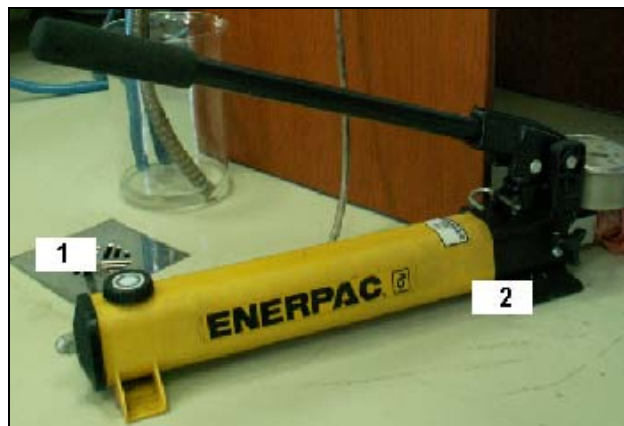
Η λειτουργία του **DSS LabStak M20** απαιτεί, πρώτα από όλα, την συμπίεση και την αποσυμπίεση του ‘sandwich’.

Αυτές οι δύο λειτουργίες (συμπίεση και αποσυμπίεση) απαιτούν έναν υδραυλικό, ελαστικό σωλήνα και μια αντλία, τοποθετημένη στην βάση της μονάδας. Πριν την λειτουργία της αντλίας, πρέπει να ελεγχθούν τα παρακάτω:

1. Η λειτουργία της μονάδας πρέπει να έχει σταματήσει. Επίσης το εσωτερικό υγρό πρέπει να βρίσκεται σε κατάσταση ατμοσφαιρικής πίεσης.
2. Αν το υδατόλουτρο έχει χρησιμοποιηθεί, αποσυνδέουμε τους σωλήνες από αυτό.

##### Συμπίεση

1. Ρυθμίζουμε τον διακόπτη που βρίσκεται πάνω στην υδραυλική αντλία, στην επιλογή ‘VENT’(εικ. 4.8.1).
2. Κλείνουμε την βαλβίδα (load release valve), η οποία είναι τοποθετημένη στα δεξιά της αντλίας. (με φορά ρολογιού – εικ.4.8.2).



Εικ.4.8 Υδραυλική αντλία (1. Διακόπτης ρύθμισης vent/fill cap 2. βαλβίδα ρύθμισης –load release valve)

3. Ανοίγουμε σιγά, την υδραυλική βαλβίδα (εικ. 4.9), η οποία βρίσκεται στην βάση του **DSS LabStak M20** (αντίθετα στην φορά ρολογιού).



Εικ.4.9 Υδραυλική βαλβίδα

4. Χρησιμοποιώντας την χειρολαβή της αντλίας, συμπιέζουμε την μεμβράνη/plate stack μέχρι ο μετρητής πίεσης, να δείξει 320 bar.
5. Κλείνουμε την βαλβίδα η οποία βρίσκεται στην βάση του **DSS LabStak M20**.
6. Ανοίγουμε την βαλβίδα (load release valve), η οποία είναι τοποθετημένη στα δεξιά της αντλίας. Η αντλία και ο ελαστικός σωλήνας μπορούν να παραμείνουν συνδεδεμένοι ή να αποσυνδεθούν.
7. Ρυθμίζουμε τον διακόπτη που βρίσκεται πάνω στην υδραυλική αντλία, στην επιλογή 'CLOSE', ειδάλλως θα υπάρχει διαρροή του λαδιού.

### **Αποσυμπίεση**

1. Ρυθμίζουμε τον διακόπτη που βρίσκεται πάνω στην υδραυλική αντλία, στην επιλογή 'CLOSE'.
2. Ανοίγουμε την βαλβίδα (load release valve), η οποία είναι τοποθετημένη στα δεξιά της

αντλίας.

3. Ανοίγουμε προσεκτικά, την υδραυλική βαλβίδα, η οποία βρίσκεται στην βάση του **DSS LabStak M20** (αντίθετα στην φορά ρολογιού).
4. Το sandwich θα αρχίσει να αποσυμπιέζεται, καθώς η κινούμενη φλάτσα κινείται προς τα κάτω και το έμβολο μπαίνει πάλι στην κυλινδρική βάση.
5. Κλείνουμε την βαλβίδα που βρίσκεται στην βάση του **DSS LabStak M20**. Η αντλία και ο ελαστικός σωλήνας μπορούν να παραμείνουν συνδεδεμένοι ή να αποσυνδεθούν.
6. Ρυθμίζουμε τον διακόπτη που βρίσκεται πάνω στην υδραυλική αντλία, στην επιλογή 'CLOSE', ειδάλλως θα υπάρχει διαρροή του λαδιού.

#### 4.4.3 Έναρξη Λειτουργίας

1. Συνδέουμε τον σωλήνα του διηθήματος (permeate hose) με την έξοδο του διηθήματος (permeate outlet) που βρίσκεται στο support plate και τοποθετούμε την άλλη άκρη του σε ένα δοχείο συγκέντρωσης (permeate vessel).
2. Γεμίζουμε ένα δοχείο με το διάλυμα που θα διαχωριστεί (feed). Ο σωλήνας της αντλίας πρέπει να βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του διαλύματος.
3. Ελέγχουμε αν η βαλβίδα ρύθμισης της πίεσης (εικ.4.10) του **DSS LabStak M20** είναι εντελώς ανοιχτή και μετά την περιστρέφουμε 4 φορές.



Εικ.4.10 Βαλβίδα ρύθμισης της πίεσης

4. Ενεργοποιούμε την αντλία, πατώντας τον διακόπτη.
5. Αν η διαδικασία ξεκινήσει κανονικά, χωρίς διαρροή ή άλλα προβλήματα, τότε ρυθμίζουμε από την βαλβίδα πίεσης, την επιθυμητή πίεση.

#### **4.4.4 Έλεγχοι κατά την διάρκεια του πειράματος**

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων πρέπει να ελέγχουμε τακτικά τα παρακάτω:

1. Η πίεση και στους δύο μετρητές πίεσης.
2. Η θερμοκρασία του διαλύματος (feed)
3. Ο ρυθμός ροής του υπολείμματος και η συνολική ποσότητα του.

Ο χρόνος μεταξύ των ελέγχων εξαρτάται από το διάλυμα που διαχωρίζεται. Κατά την διάρκεια του πειράματος, η ενέργεια της αντλίας μπορεί να μετατραπεί σε θερμότητα, η οποία θα αυξήσει την θερμοκρασία του διαλύματος. Σε αυτήν την περίπτωση, η χρήση ενός ψύκτη ενδείκνυται. [Εγχειρίδιο DssLabStak M20]

#### 4.4.5 Λήξη λειτουργίας της μονάδας

Πριν τεθεί η μονάδα εκτός λειτουργίας, συνιστάται ο καθαρισμός της μεμβράνης, διηθώντας από το **DSS LabStak M20** απιονισμένο νερό.

1. Μειώνουμε την πίεση κατά 1bar/2min.
2. Κλείνουμε τον διακόπτη της αντλίας.

**ΠΡΟΣΟΧΗ:** Οι μεμβράνες μετά την πρώτη χρήση τους, σε καμία περίπτωση πρέπει να διατηρηθούν σε κάποιο διάλυμα ειδικά για την απόδοσή τους και οι ιδιότητές τους εξασθενούν.

#### 4.5 Συντήρηση/Αποθήκευση Μεμβρανών

Εάν πρόκειται να σταματήσει η λειτουργία του **DSS LabStak M20** για περισσότερο από 24 ώρες, τότε μετά τον καθαρισμό του μηχανήματος, οι μεμβράνες πρέπει να φυλαχτούν σε ένα συντηρητικό διάλυμα.

Για χρονική περίοδο, διατήρησης των μεμβρανών, μιας εβδομάδας, χρησιμοποιείται ογκομετρικός σωλήνας των 500 ml με 0.25% όξινο θειικό νάτριο (sodium hydrogen sulphite) και 99.75% νερό. Δηλαδή,  $C_1V_1 = C_2V_2 \Leftrightarrow 0.25 \cdot 500 = V_1 \cdot 0.39 \Leftrightarrow V_1 = 3.2 \text{ ml}$

Το παραπάνω διάλυμα είναι κατάλληλο για να ελαχιστοποιήσει την ανάπτυξη μικροβίων στην επιφάνεια της μεμβράνης.

Για μεγαλύτερη χρονική περίοδο, πρέπει να κατασκευαστεί διάλυμα με 0.25% όξινο θειικό νάτριο και 18% προπυλέν γλυκόλη (1.2 προπανογλυκόλη). Αυτό το διάλυμα εκτός από την ελαχιστοποίηση ανάπτυξης μικροβίων παρέχει επίσης προστασία από θερμοκρασιακές μεταβολές, η οποίες μπορούν να καταστρέψουν την μεμβράνη.

Η ποιότητα του νερού που χρησιμοποιείται είναι πολύ σημαντική, έτσι ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητες επικαθήσεις στην μεμβράνη, προερχόμενες από το νερό. Ιδιαίτερα σημαντικό, είναι η περιεκτικότητα του νερού σε σίδηρο, μαγγάνιο και πυριτικό

άλας. [Εγχειρίδιο DssLabStak M20]

Παρακάτω δίδεται ένας Πίνακας με την ποιότητα του νερού που πρέπει να έχει το διάλυμα Συντήρησης/Αποθήκευσης.

Πίνακας 4.3 Ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού που χρησιμοποιείται για την διατήρηση της μεμβράνης  
[Εγχειρίδιο DssLabStak M20]

| <b>CIP (cleaning in place) water quality table</b> |               |
|----------------------------------------------------|---------------|
| Σίδηρο (Fe)                                        | 0.05 ppm      |
| Μαγγάνιο                                           | 0.02 ppm      |
| Silicate (SiO <sub>2</sub> )                       | 5 ppm         |
| Ολική Σκληρότητα                                   | 20 d°         |
| Μέγεθος Σωματιδίων (Particles Size)                | 25 micron     |
| Total plate count                                  | 1,000 per ml  |
| Coli count (μικροοργανισμοί)                       | 10 per 100 ml |
| Θολερότητα (Turbidity)                             | 1 NTU         |
| Αγωγιμότητα (Conductivity)                         | >5μS/cm       |

Το CIP νερό δεν πρέπει να υπερβαίνει τα όρια χλωρίου, θερμοκρασίας και pH τα οποία δίνονται από τον κατασκευαστή. Η ποιότητα του νερού πρέπει να ελέγχεται τακτικά. Είναι απαραίτητο να γίνεται μια ολοκληρωμένη χημική ανάλυση του νερού ανά 3-6 μήνες.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ V

### ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΝΕΡΟΥ

#### 5.1 Σκοπός πειράματος

Ο σκοπός των πειραμάτων ήταν να μελετηθεί αν οι μεμβράνες νανοδιήθησης είναι κατάλληλες για την αποσκλήρυνση υφάλμυρου νερού. Οι παράμετροι που μετρήθηκαν σε κάθε πείραμα ήταν, η ροή (flux), η σκληρότητα του κάθε δείγματος πριν και μετά και η ηλεκτρική αγωγιμότητα των δειγμάτων πριν και μετά τον διαχωρισμό.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η προέλευση των τριών δειγμάτων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα:

Πίνακας 5.1

| Προέλευση Δειγμάτων |                              |
|---------------------|------------------------------|
| Δείγμα 1 (A2)       | Νερό Βρύσης Χανίων           |
| Δείγμα 2 (B1)       | Ν.Λασιθίου – Περιοχή Μιλάτου |
| Δείγμα 3 (B2)       | Ν.Λασιθίου – Περιοχή Μιλάτου |

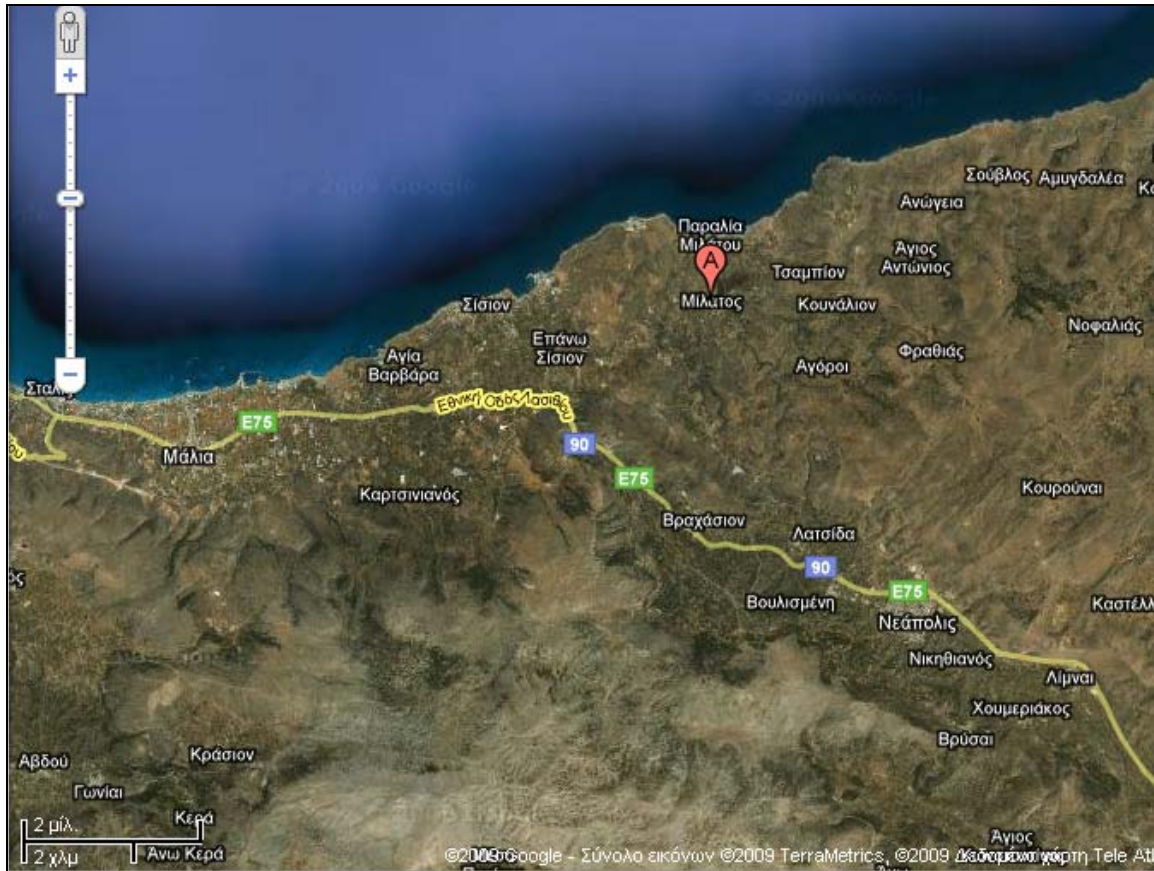
#### Δείγματα

Το Δείγμα1 πρόκειται για νερό βρύσης από την πόλη των Χανίων. Το Δείγμα2 και το Δείγμα3 προέρχονται από διαφορετικές πηγές, της περιοχής Μιλάτου, στον Ν.Λασιθίου στην Κρήτη. Πιο συγκεκριμένα, οι πηγές βρίσκονται κοντά στο ξενοδοχειακό συγκρότημα King Minos Palace περίπου ένα χιλιόμετρο μακριά από το χωριό της Μιλάτου..

Η σκληρότητα εκφράζει το σύνολο των διαλυμένων αλάτων του ασβεστίου και του μαγνησίου και εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τα πετρώματα που έχει περάσει το νερό. Για παράδειγμα, άλατα ασβεστίου υπάρχουν σε όλα τα φυσικά νερά και προέρχονται από πετρώματα όπως ο ασβεστόλιθος, ο δολομίτης ή ο γύψος. Η αυξημένη ολική σκληρότητα που μετρήθηκε στο Δείγμα2 και Δείγμα3 οφείλεται στο γεγονός ότι στην ευρύτερη περιοχή της Μιλάτου υπάρχουν και ανθρακικά πετρώματα.



Στην περιοχή της Μίλατου από όπου προέρχονται το Δείγμα2 και Δείγμα3 εμφανίζονται οι παρακάτω σχηματισμοί πετρωμάτων:



Εικ.5.1 Η ευρύτερη περιοχή της Μίλατου [googlemaps, 2009]

- Σχιστόλιθοι Φυλλιτικής – Χαλαζιακής σειράς και Νεογενείς σειράς: βρίσκεται επωθημένη πάνω στην Ομάδα των Πλακώδων Ασβεστολίθων και αποτελείται από φυλλίτες, χαλαζίτες, μετά – κροκαλοπαγή, μετά – ψαμμίτες, μάρμαρα, μεταβασίτες (μεταμορφωμένα ηφαιστειακά βασικά πετρώματα) και μετά – ανδεσίτες. Η ηλικία τους είναι Πέρμιο - Τριαδικό. [Εισαγωγή στην Γεωλογία Ελλάδος, Ε. Μανούτσογλου, 2009]
- Ασβεστόλιθοι Τρίπολης ηλικίας Άνω Κρητιδικού.

## 5.2 Παράμετροι χαρακτηρισμού νερού

### 5.2.1 Αγωγιμότητα

Η αγωγιμότητα ορίζεται συνήθως και ως ηλεκτρική αγωγιμότητα (E.C), ειδική αγωγιμότητα, ή conductance. Η αγωγιμότητα είναι η συνισταμένη της αντίστασης σε Ohms ανάμεσα στις απέναντι επιφάνειες ενός κύβου πλευράς 1cm που περιέχει υγρό διάλυμα σε συγκεκριμένη θερμοκρασία (συνήθως 25 °C). Είναι άμεσα εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία και οι μονάδες της είναι τα mhos. Εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους των μονάδων αυτών συνήθως χρησιμοποιούμε υποπολλαπλάσια π.χ. micromhos. Η διεθνής μονάδα αγωγιμότητας είναι το siemens το οποίο είναι ισοδύναμο του mhos. Η αγωγιμότητα είναι ένας καλός εκτιμητής του TDS διότι το TDS σε mg/l είναι ανάλογο της αγωγιμότητας σε micromhos:

$$\text{TDS (mg/l)} = A \cdot \text{αγωγιμότητα (}\mu\text{mhos)}$$

Όπου  $A = 0.54 - 0.96$  ( συνήθως  $0.55 - 0.76$  )

Η αγωγιμότητα μπορεί επίσης να εκτιμηθεί και από το άθροισμα των κατιόντων εκφρασμένο σε meq/l.

$$\text{Αγωγιμότητα (}\mu\text{mhos)} = \text{σύνολο κατιόντων ( meq/l )} \cdot 100$$

#### Τρόπος προσδιορισμού της αγωγιμότητας

Για τη μέτρηση της αγωγιμότητας χρησιμοποιήθηκε το Conductivity Meter 524 από την CRISON COMPANY, του οποίου τα χαρακτηριστικά είναι:

1. Ψηφιακή ανάγνωση της ένδειξης του οργάνου σε LCD 12 mm
2. Τέσσερις περιοχές μετρήσεων μέχρι 199.9 mS
3. Θερμοκρασία Λειτουργίας : -50 – 100 °C

4. Ελάχιστη υποδιαίρεση 0.1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .
5. Σχετική ακρίβεια μετρήσεων  $\pm 0.5\%$ .
6. Τροφοδοσία με μπαταρία 9V. Διάρκεια λειτουργίας 100 ώρες περίπου
7. Ανθεκτικό σε θερμοκρασίες από 0 – 50 °C και στεγανό για συνθήκες υψηλής υγρασίας, μέχρι 95%.
8. Έχει επίσης τη δυνατότητα για μέτρηση σε χαμηλή περιοχή αγωγιμότητας από 0 έως 200  $\mu\text{S}$  με ακρίβεια  $\pm 0.5\%$  (1  $\mu\text{S}$ )
9. Οι μετρήσεις γίνονται μέσω κατάλληλου ηλεκτροδίου, το οποίο προστατεύεται με λαστιχένιο κάλυμμα και για τη μέτρηση βυθίζεται σε ποτήρι ζέσεως που περιέχει το δείγμα.

### 5.2.2 Μέθοδος Μέτρησης ιόντων $\text{Ca}^{+2}$ , $\text{Mg}^{+2}$ (ολική σκληρότητα)

Για τη μέτρηση της ολικής σκληρότητας χρησιμοποιήθηκε το Total Hardness Test της Aquamerck.

#### Διαδικασία Μέτρησης:

1. Γεμίζω ένα ποτήρι ζέσεως των 5 ml με το δείγμα  νερού.
2. Προσθέτω το αντιδραστήριο H-1 (barbital sodium-5.5 diethylbarbituric acid, sodium salt, methanamine). Δείκτης σε μορφή δισκίου ή σκόνης.
3. Αναδεύω μέχρι το αντιδραστήριο H-1 να διαλυθεί εντελώς. Το χρώμα του διαλύματος τώρα είναι κόκκινο.
4. Κατόπιν, αρχίζω να ρίχνω σταγόνες H-2 (τιτλοδότης, διάλυμα ethylenedinitriloetracetic) Μετά από κάθε σταγόνα, αναδεύω και περιμένω λίγο αν αλλάξει το διάλυμα χρώμα. 

5. Συνεχίζω να ρίχνω σταγόνες σταθερά, μέχρι να αλλάξει το χρώμα του διαλύματος σε ανοικτό πράσινο. Ο αριθμός των σταγόνων αντιστοιχεί στην σκληρότητα του νερού σε γερμανικούς βαθμούς.

Σε πολύ 'σκληρά' νερά, συνιστάται να γίνεται αραιώση του διαλύματος. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής, λόγω της μεγάλης σκληρότητας κάποιων από τα δείγματα, έγιναν αραιώσεις της τάξης 1/10, 1/2 και 1/5.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ VI

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

#### 6.1 Διαδικασία πειραμάτων

Σε κάθε πείραμα χρησιμοποιήθηκε η ίδια ποσότητα διαλύματος (feed), 2L. Η μεμβράνη/sandwich ήταν συμπιεσμένη σε 320 bar.

Σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ο ελάχιστος αριθμός μεμβρανών και sandwich με ελάχιστο εμβαδόν μεμβρανών  $0.036 \text{ m}^2$  (2 μεμβράνες,  $0.018 \text{ m}^2$  κάθε μία).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των τύπων μεμβρανών που χρησιμοποιήθηκαν:

Πίνακας 6.1 [Εγχειρίδιο DssLabStak M20]

| Τεχνικά Χαρακτηριστικά Μεμβρανών Nft-50 |                                |
|-----------------------------------------|--------------------------------|
| Τύπος                                   | Nft 50                         |
| Code no                                 | 517820                         |
| Batch no                                | 56941-02                       |
| Size                                    | M20                            |
| Material of Membrane                    | Thinfil composite on polyester |
| Τεχνικά Χαρακτηριστικά Μεμβρανών NF99   |                                |
| Τύπος                                   | NF99                           |
| Code no                                 | 517820                         |
| Batch no                                | 200075-02                      |
| Size                                    | M20                            |
| Material of Membrane                    | Thinfil composite on polyester |

Για την μέτρηση της ροής (flux) χρησιμοποιήθηκε μία ογκομετρική φιάλη των 10ml και ένα χρονόμετρο ακρίβειας κλάσματος δευτερολέπτου. Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας του διαλύματος έγιναν με την χρήση ψηφιακού θερμόμετρου.

Κάθε φορά πριν την έναρξη του πειράματος, η αντλία λειτουργούσε για 20 λεπτά, για να

σταθεροποιηθεί το σύστημα. Για τον ίδιο λόγο, σε κάθε αλλαγή πίεσης υπήρχε αναμονή 5 λεπτών. Ανάμεσα σε διαφορετικά σερ πειραμάτων, με διαφορετικά δείγματα, γινόταν καθαρισμός της μηχανής, με μεγάλες ποσότητες απιονισμένου νερού.

Σε περίπτωση που το **DSS LabStak M20** δεν επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί για μεγαλύτερη χρονική περίοδο του ενός 24ώρου, γινόταν αποσυμπίεση και οι μεμβράνες αποθηκεύονταν σε διάλυμα διατήρησης. Τα συστατικά και οι δοσολογίες για την παρασκευή του διαλύματος διατήρησης των μεμβρανών περιγράφονται αναλυτικά στην παράγραφο **4.5**.

Σε κάθε πείραμα, ακολουθείται η παρακάτω σειρά: Αρχικά χρησιμοποιείται για τροφοδοσία απιονισμένο νερό, στην συνέχεια το Δείγμα και στο τέλος του πειράματος, περνάει από την μηχανή πάλι απιονισμένο νερό.

Διηθώντας απιονισμένο νερό πριν τον διαχωρισμό του διαλύματος και μετά, δείχνει ουσιαστικά ποια είναι η κατάσταση της μεμβράνης μετά τον διαχωρισμό. Δηλαδή αν έχει εμφανιστεί κάποιο από τα φαινόμενα της Πόλωσης Συγκέτρνωσης ή Fouling. Αυτό φαίνεται από την απόκλιση που θα έχουν οι δύο καμπύλες του απιονισμένου νερού μεταξύ τους, δείχνοντας πως έχουν υπάρξει επικαθίσεις στην επιφάνεια ή και στους πόρους της μεμβράνης, εμποδίζοντας την μελλοντική λειτουργία της.

## **6.2 Αποτελέσματα Πειραμάτων**

### **ΠΕΙΡΑΜΑ 1<sup>ο</sup>**

Το πρώτο σερ πειραμάτων πραγματοποιήθηκε με την μεμβράνη Nft-50 και το Δείγμα1 (νερό βρύσης). Μετρήθηκε η ροή (flux) του διηθήματος, με σκοπό να μελετηθεί η σχέση ροής και πίεσης λειτουργίας. Σε κάθε τιμή πίεσης γινόντουσαν 4 μετρήσεις της ροής σε ογκομετρική φιάλη των 10ml.

Μετά από το πείραμα, υπολογίστηκε η μέση ροή ανά πίεση. Τα τελικά αποτελέσματα έχουν μονάδες ροής  $L/(m^2/24h)$  και πίεσης *bar*.

Τροφοδοσία : Απιονισμένο – Νερό Βρύσης – Απιονισμένο

### Απιονισμένο νερό (A1)

Table 6.2

|                   |   |        |        |        |        |        |        |
|-------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| P(bar)            | 0 | 9      | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     |
| t(sec)            |   | 138    | 112    | 101    | 90     | 82     | 72     |
|                   |   | 136    | 109    | 99     | 91     | 80     | 75     |
|                   |   | 136    | 111    | 100    | 93     | 83     | 74     |
|                   |   | 135    | 116    | 102    | 92     | 81     | 73     |
| M.O.              |   | 136,25 | 112    | 100,5  | 91,5   | 81,5   | 73,5   |
|                   |   |        |        |        |        |        |        |
| Flux              | 0 | 176,15 | 214,29 | 238,81 | 262,30 | 294,48 | 326,53 |
| M.O. Θερμοκρασίας |   | 25     | 25,2   | 25,2   | 25,8   | 26     | 26     |

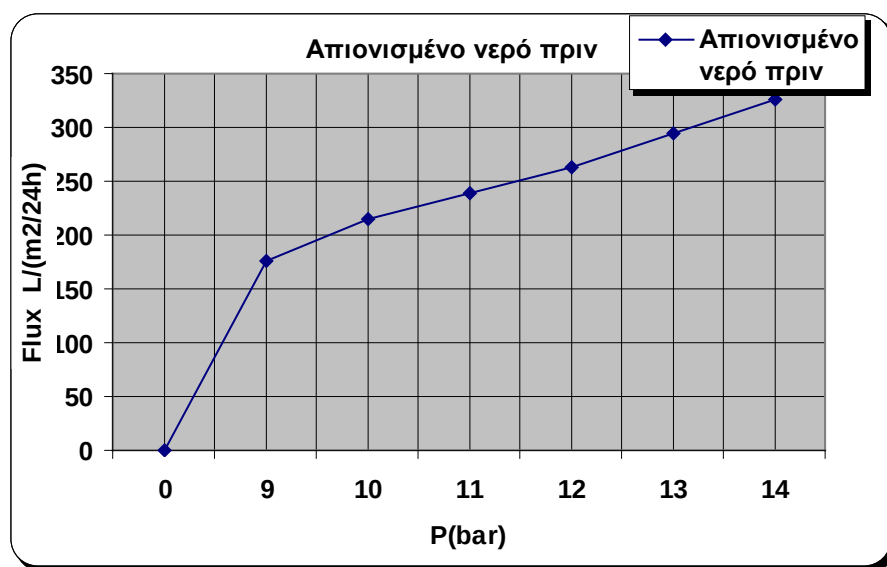


Figure 6.1

### Νερό Βρύσης (A2)

Table 6.3

|                   |   |        |        |        |        |        |        |
|-------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| P(bar)            | 0 | 9      | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     |
| t(sec)            |   | 150    | 125    | 115    | 103    | 94     | 84     |
|                   |   | 148    | 123    | 115    | 104    | 89     | 83     |
|                   |   | 147    | 131    | 113    | 102    | 89     | 83     |
|                   |   | 147    | 129    | 113    | 102    | 90     | 83     |
| M.O.              |   | 148    | 127    | 114    | 102,8  | 90,5   | 83,25  |
|                   |   |        |        |        |        |        |        |
| Flux              | 0 | 162,16 | 188,98 | 210,53 | 233,58 | 265,19 | 288,29 |
| M.O. Θερμοκρασίας |   | 26     | 27     | 27     | 28     | 28,12  | 29     |



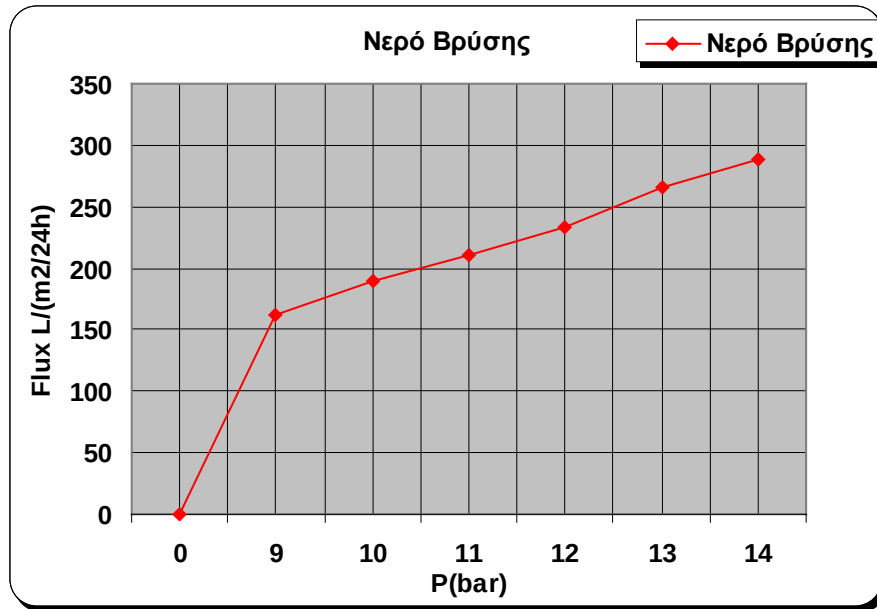


Figure 6.2

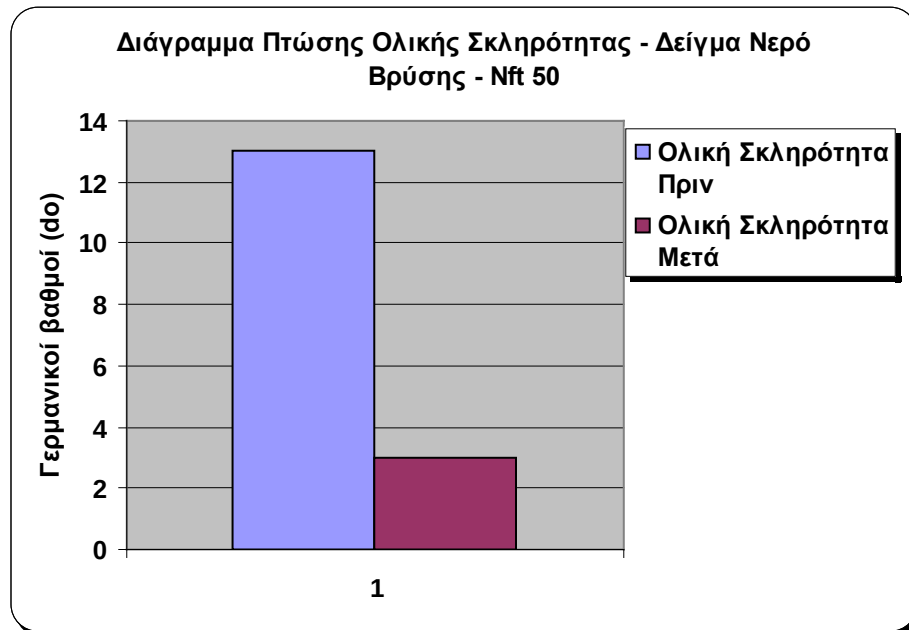


Figure 6.3



Figure 6.4

### Απιονισμένο (A3)

Table 6.4

|                   |   |        |        |        |        |        |
|-------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| P(bar)            | 0 | 8      | 9      | 10     | 12     | 14     |
| t(sec)            |   | 150    | 128    | 115    | 92     | 77     |
|                   |   | 151    | 127    | 112    | 93     | 74     |
|                   |   | 149    | 129    | 109    | 90     | 75     |
|                   |   | 148    | 128    | 110    | 92     | 75     |
| M.O.              |   | 149,5  | 128    | 111,5  | 91,8   | 75,3   |
|                   |   |        |        |        |        |        |
| Flux              | 0 | 160,54 | 187,50 | 215,25 | 261,58 | 318,94 |
| M.O. Θερμοκρασίας |   | 29,25  | 29,5   | 30     | 30     | 30,5   |

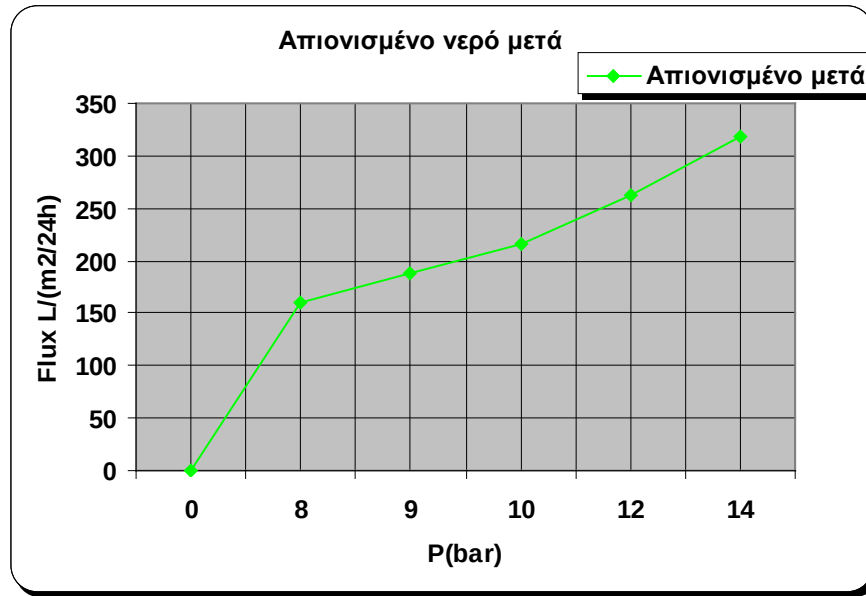


Figure 6.5

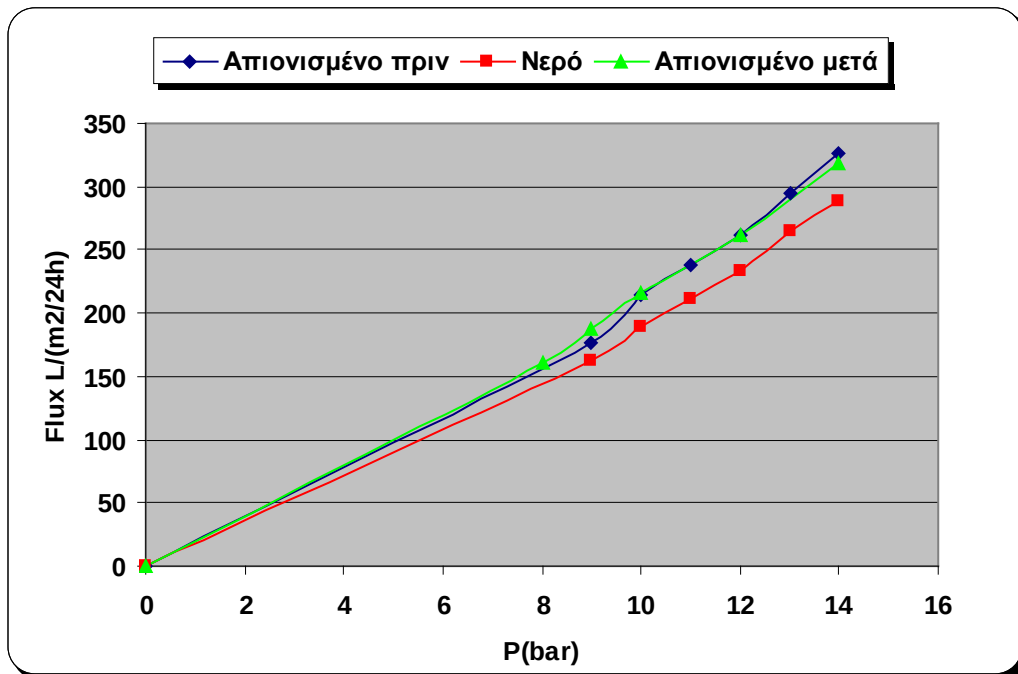


Figure 6.6

### Συμπεράσματα:

Στο πρώτο σετ πειραμάτων, το δείγμα ήταν νερό και η μεμβράνη που χρησιμοποιήθηκε

ήταν η Nft-50.

#### Παράμετροι χαρακτηρισμού νερού:

Η σκληρότητα του νερού, όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα (figure6.3) ελαττώθηκε από 13 γερμανικούς βαθμούς σε 3d°. Αντίστοιχα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα μειώθηκε σε 74.8μS από 285μS που είχε μετρηθεί πριν τον διαχωρισμό (figure6.4). Με βάση τα παραπάνω, συμπεραίνουμε πως η μεμβράνη Nft-50 έχει την δυνατότητα να κατακρατάει έναν σημαντικό αριθμό δισθενών ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ).

#### **ΠΕΙΡΑΜΑ 2<sup>ο</sup>**

Το δεύτερο σετ πειραμάτων πραγματοποιήθηκε με την μεμβράνη Nft-50 και το Δείγμα2 (B1). Μετρήθηκε η ροή (flux) του διηθήματος, με σκοπό να μελετηθεί η σχέση ροής και πίεσης λειτουργίας. Σε κάθε τιμή πίεσης γινόντουσαν 4 μετρήσεις της ροής σε ογκομετρική φιάλη των 10ml.

Μετά από το πείραμα, υπολογίστηκε η μέση ροή ανά πίεση. Τα τελικά αποτελέσματα έχουν μονάδες ροής  $L/(m^2/24h)$  και πίεσης *bar*.

Τροφοδοσία : Απιονισμένο – Δείγμα 2 (B1) – Απιονισμένο

#### **Απιονισμένο νερό (B1)**

Table 6.5

| P(bar) | 0 | 9   | 10  | 11  | 12 | 13 | 14 |
|--------|---|-----|-----|-----|----|----|----|
| t(sec) |   | 137 | 111 | 102 | 93 | 83 | 75 |
|        |   | 135 | 116 | 101 | 92 | 82 | 74 |
|        |   | 136 | 112 | 100 | 90 | 81 | 72 |

|                   |   |        |        |        |        |        |        |
|-------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                   |   | 134    | 109    | 99     | 91     | 80     | 73     |
| M.O.              |   | 135,5  | 112    | 100,5  | 91,5   | 81,5   | 73,5   |
|                   |   |        |        |        |        |        |        |
| Flux              | 0 | 177,12 | 214,29 | 238,81 | 262,30 | 294,48 | 326,53 |
| M.O. Θερμοκρασίας |   | 24,12  | 25,12  | 26     | 26,5   | 27     | 27,75  |

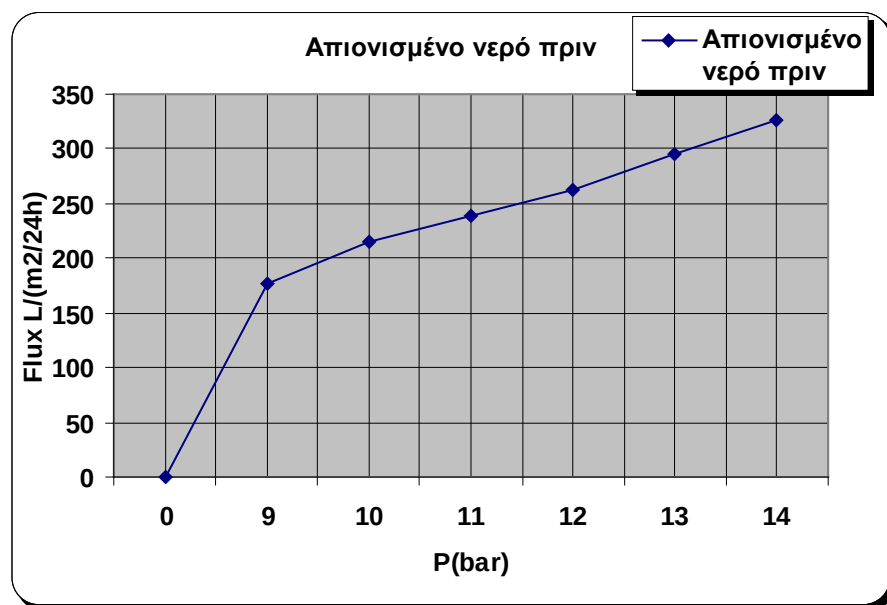


Figure 6.7

## B1 Δείγμα

Table 6.6

|                   |   |        |        |        |        |
|-------------------|---|--------|--------|--------|--------|
| P(bar)            | 0 | 8      | 9      | 10     | 11     |
| t(sec)            |   | 151    | 130    | 102    | 88     |
|                   |   | 145    | 128    | 101    | 87     |
|                   |   | 143    | 128    | 101    | 86     |
|                   |   | 142    | 128    | 100    | 86     |
| M.O.              |   | 145,3  | 128,5  | 101    | 86,8   |
|                   |   |        |        |        |        |
| Flux              | 0 | 165,23 | 186,77 | 237,62 | 276,66 |
| M.O. Θερμοκρασίας |   | 27,75  | 28,25  | 29,25  | 30     |

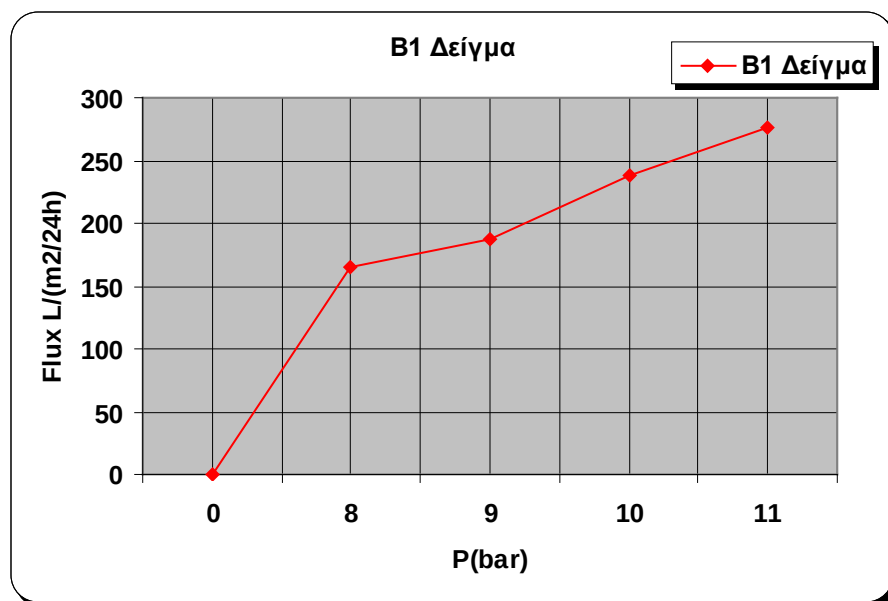


Figure 6.8

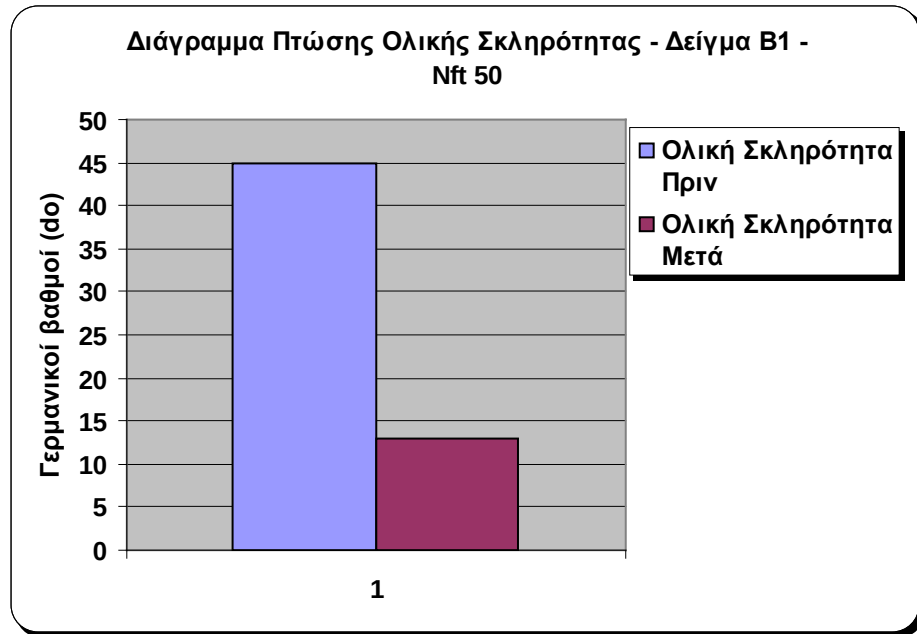


Figure 6.9



Figure 6.10

### Απιονισμένο νερό (B1)

Table 6.7

| P(bar)            | 0 | 8      | 9      | 10     | 11     |
|-------------------|---|--------|--------|--------|--------|
| t(sec)            |   | 164    | 142    | 115    | 105    |
|                   |   | 156    | 138    | 114    | 109    |
|                   |   | 155    | 138    | 113    | 105    |
|                   |   | 153    | 138    | 113    | 105    |
| M.O.              |   | 154,7  | 139    | 113,75 | 106,0  |
|                   |   |        |        |        |        |
| Flux              | 0 | 155,17 | 172,66 | 210,99 | 226,42 |
| M.O. Θερμοκρασίας |   | 23,62  | 24,5   | 25,5   | 26,12  |

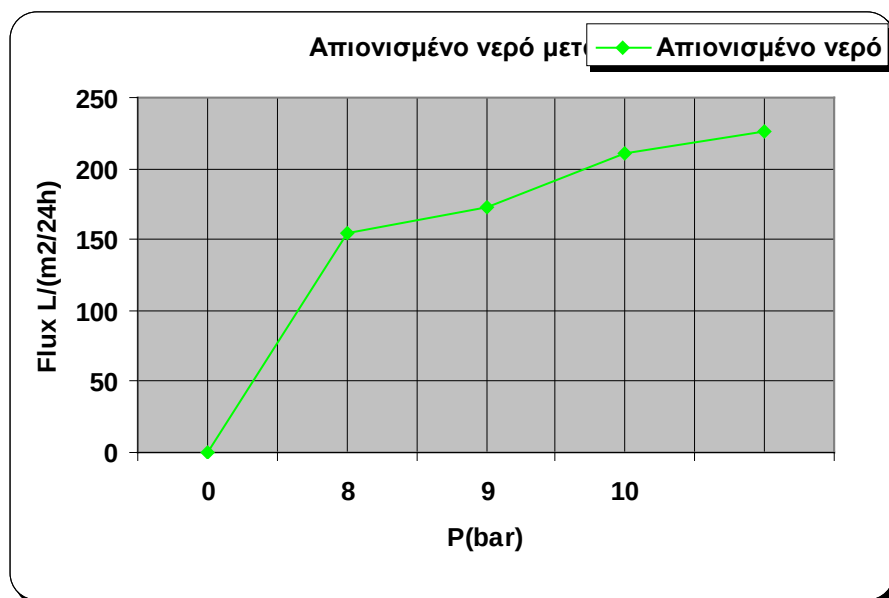


Figure 6.11



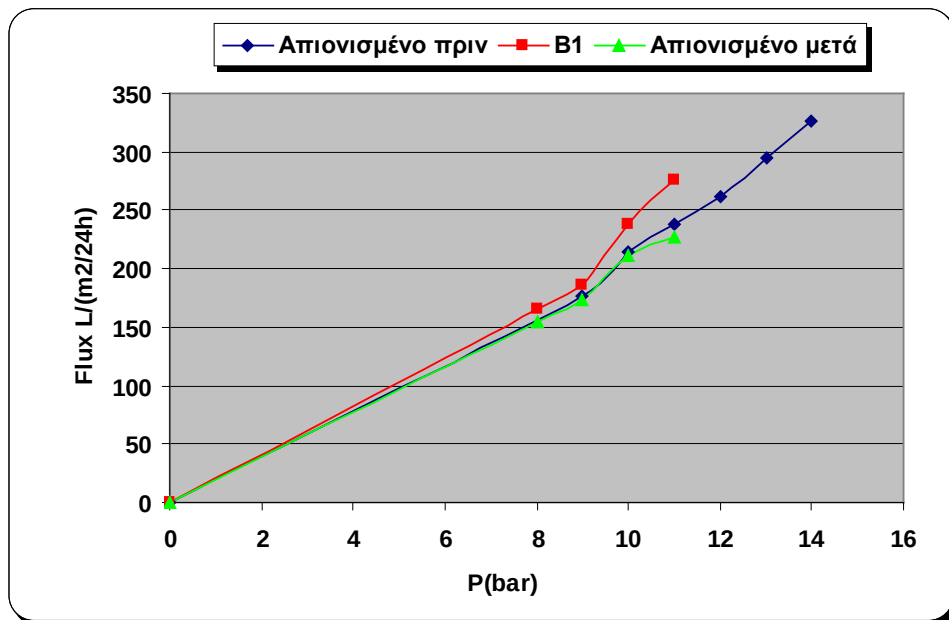


Figure 6.12

### Συμπεράσματα:

Στο δεύτερο σετ πειραμάτων, το δείγμα ήταν μεγαλύτερης σκληρότητας και η μεμβράνη που χρησιμοποιήθηκε ήταν πάλι η Nft-50. Σε αυτή την περίπτωση θέλαμε να μελετήσουμε, αν η μεμβράνη μπορεί να διαχωρίσει επαρκώς ‘σκληρά’ νερά τα οποία προέρχονται από υφάλμυρες πηγές.

Λόγω της μεγάλης σκληρότητας του δείγματος, κατά την διάρκεια μέτρησης της ολικής σκληρότητας χρειάστηκε να γίνει αραιώση 1/10 και 1/2 του διαλύματος πριν και μετά τον διαχωρισμό του διαλύματος αντίστοιχα.

### Παράμετροι χαρακτηρισμού νερού:

Η σκληρότητα του νερού, μετρήθηκε αυτήν τη φορά 45d° όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα (figure6.9) και μετά τον διαχωρισμό μειώθηκε στους 13 γερμανικούς

βαθμούς. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα από 1215 $\mu$ S ελαττώθηκε στα 515 $\mu$ S (figure6.10). Τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να χαρακτηριστούν πολύ ικανοποιητικά και ενθαρρυντικά για την μελλοντική χρήση των μεμβρανών νανοδιήθησης σε μεγάλες βιομηχανίες αποσκλήρυνσης ή αφαλάτωσης νερού.

### ΠΕΙΡΑΜΑ 3<sup>ο</sup>

Το τρίτο σετ πειραμάτων πραγματοποιήθηκε με την μεμβράνη Nft-50 και το Δείγμα3 (B2). Μετρήθηκε η ροή (flux) του διηθήματος, με σκοπό να μελετηθεί η σχέση ροής και πίεσης λειτουργίας. Σε κάθε τιμή πίεσης γινόντουσαν 4 μετρήσεις της ροής σε ογκομετρική φιάλη των 10ml.

Μετά από το πείραμα, υπολογίστηκε η μέση ροή ανά πίεση. Τα τελικά αποτελέσματα έχουν μονάδες ροής  $L/(m^2/24h)$  και πίεσης *bar*.

Τροφοδοσία : Απιονισμένο – Δείγμα 3 (B2) – Απιονισμένο

#### Απιονισμένο νερό (B2)

Table 6.8

|                   |   |        |        |        |        |        |
|-------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| P(bar)            | 0 | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     |
| t(sec)            |   | 156    | 131    | 108    | 94     | 88     |
|                   |   | 152    | 126    | 108    | 92     | 89     |
|                   |   | 150    | 124    | 109    | 92     | 87     |
|                   |   | 149    | 128    | 108    | 93     | 89     |
| M.O.              |   | 151,75 | 127,25 | 108,25 | 92,75  | 88,25  |
|                   |   |        |        |        |        |        |
| Flux              | 0 | 158,15 | 188,61 | 221,71 | 258,76 | 271,95 |
| M.O. Θερμοκρασίας |   | 25,62  | 26,25  | 27,25  | 28     | 28     |

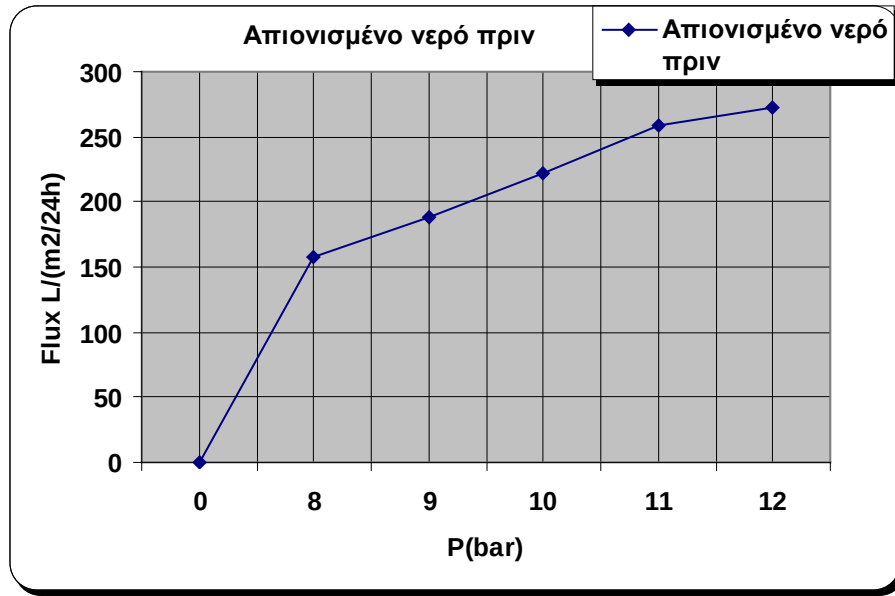


Figure 6.13

## B2 Δείγμα

Table 6.9

|                   |   |        |        |        |        |        |
|-------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| P(bar)            | 0 | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     |
| t(sec)            |   | 156    | 148    | 118    | 106    | 98     |
|                   |   | 160    | 146    | 118    | 105    | 95     |
|                   |   | 159    | 145    | 118    | 105    | 95     |
|                   |   | 159    | 143    | 117    | 105    | 96     |
| M.O.              |   | 158,5  | 145,5  | 117,75 | 105,25 | 96     |
|                   |   |        |        |        |        |        |
| Flux              | 0 | 151,42 | 164,95 | 203,82 | 228,03 | 250,00 |
| M.O. Θερμοκρασίας |   | 27     | 27,5   | 28     | 28,5   | 28,75  |

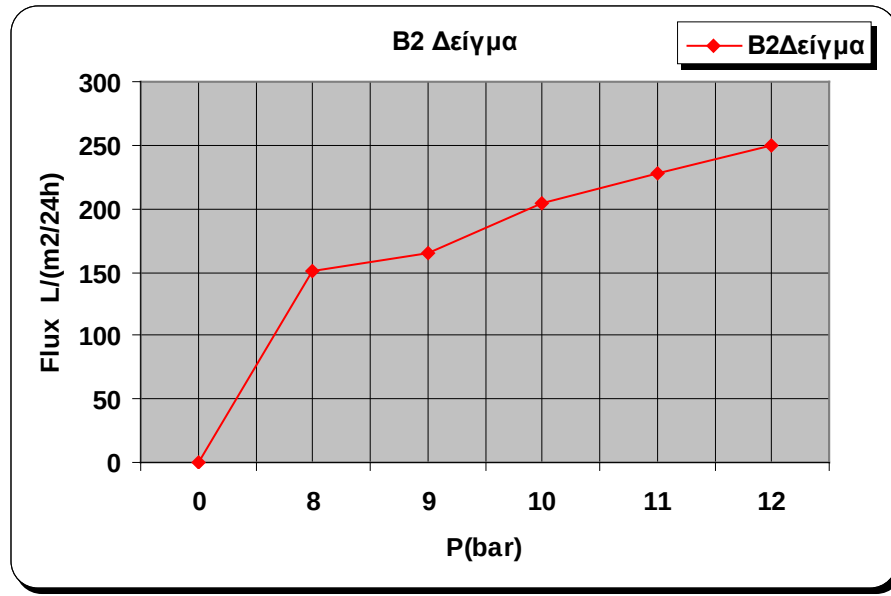


Figure 6.14

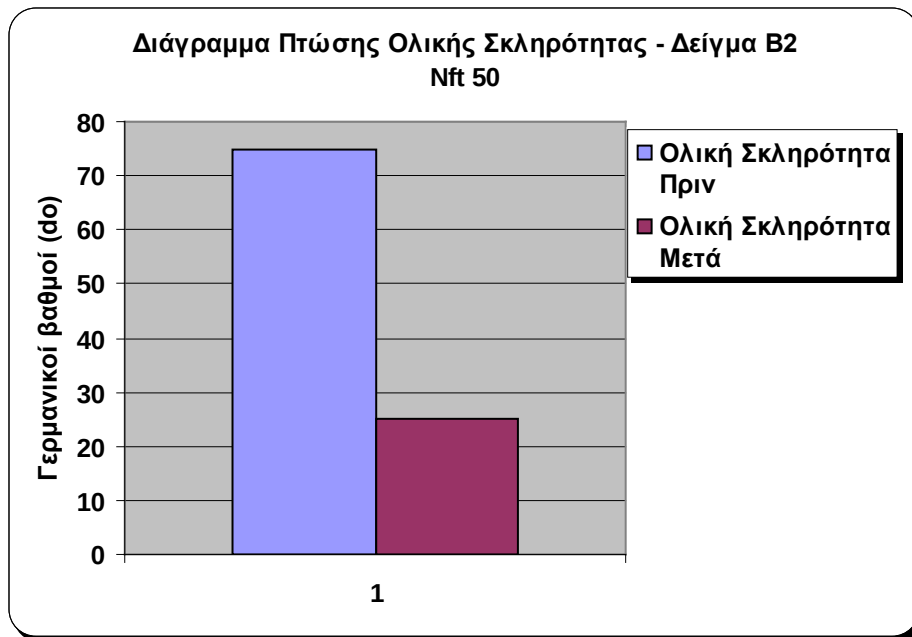


Figure 6.15



Figure 6.16

### Απιονισμένο νερό (B2)

Table 6.10

|                   |   |        |        |        |        |        |
|-------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| P(bar)            | 0 | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     |
| t(sec)            |   | 151    | 134    | 123    | 102    | 90     |
|                   |   | 150    | 132    | 120    | 101    | 90     |
|                   |   | 148    | 132    | 119    | 100    | 91     |
|                   |   | 147    | 130    | 118    | 100    | 90     |
| M.O.              |   | 149    | 132    | 120    | 100,75 | 90,25  |
|                   |   |        |        |        |        |        |
| Flux              | 0 | 161,07 | 181,82 | 200,00 | 238,21 | 265,93 |
| M.O. Θερμοκρασίας |   | 26     | 26,87  | 27,12  | 27,75  | 28     |

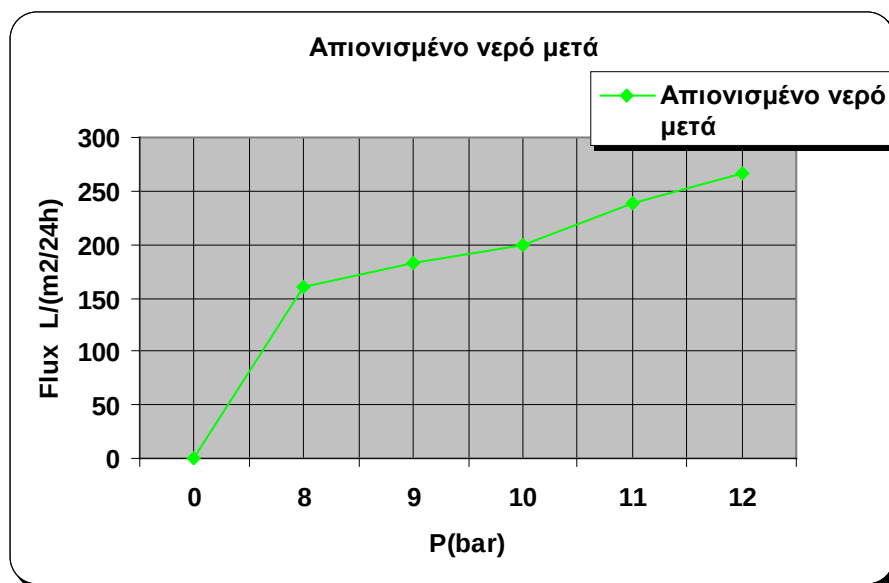


Figure 6.17

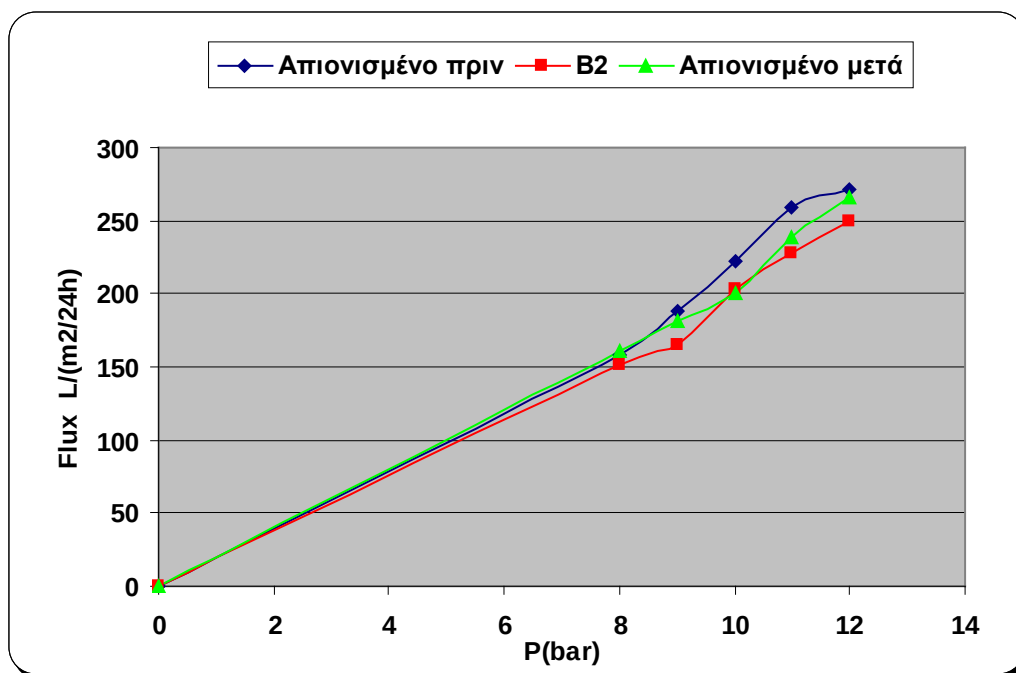


Figure 6.18

### Συμπεράσματα:

Στο τρίτο σετ πειραμάτων, το δείγμα ήταν ακόμα μεγαλύτερης σκληρότητας και η μεμβράνη που χρησιμοποιήθηκε ήταν πάλι η Nft-50.

Και σε αυτήν την περίπτωση, για τον υπολογισμό της ολικής σκληρότητας πριν και μετά τον διαχωρισμό, έγινε αραίωση 1/10 και 1/5 αντίστοιχα.

### Παράμετροι χαρακτηρισμού νερού:

Η μείωση της σκληρότητας αυτή την φορά ήταν από 75d° σε 25d° (figure6.15) και η ηλεκτρική αγωγιμότητα από 6008μS σε 3017μS (figure6.16). Παρόλα που τα παραπάνω αποτελέσματα είναι πολύ καλά, για να είναι η δυνατή η χρήση του νερού αυτού, θα πρέπει να γίνει καλύτερος διαχωρισμός, με χρήση περισσότερων μεμβρανών.

### **ΠΕΙΡΑΜΑ 4<sup>ο</sup>**

Το τέταρτο σετ πειραμάτων πραγματοποιήθηκε με την μεμβράνη NF99 και το Δείγμα1 (νερό βρύσης). Μετρήθηκε η ροή (flux) του διηθήματος, με σκοπό να μελετηθεί η σχέση ροής και πίεσης λειτουργίας. Σε κάθε τιμή πίεσης γινόντουσαν 4 μετρήσεις της ροής σε ογκομετρική φιάλη των 10ml.

Μετά από το πείραμα, υπολογίστηκε η μέση ροή ανά πίεση. Τα τελικά αποτελέσματα έχουν μονάδες ροής  $L/(m^2/24h)$  και πίεσης *bar*.

Τροφοδοσία : Απιονισμένο – Δείγμα 1 (νερό βρύσης) – Απιονισμένο

### Απιονισμένο νερό

Table 6.11

| P(bar) | 0 | 6   | 7   | 8  | 9  |
|--------|---|-----|-----|----|----|
| t(sec) |   | 213 | 105 | 42 | 38 |

|                   |   |        |        |        |        |
|-------------------|---|--------|--------|--------|--------|
|                   |   | 201    | 97     | 40     | 39     |
|                   |   | 188    | 86     | 39     | 38     |
|                   |   | 173    | 80     | 41     | 38     |
| M.O.              |   | 193,75 | 87,67  | 40,5   | 38,3   |
|                   |   |        |        |        |        |
| Flux              | 0 | 123,87 | 273,76 | 592,59 | 627,45 |
| M.O. Θερμοκρασίας |   | 21,75  | 22,75  | 24     | 24     |

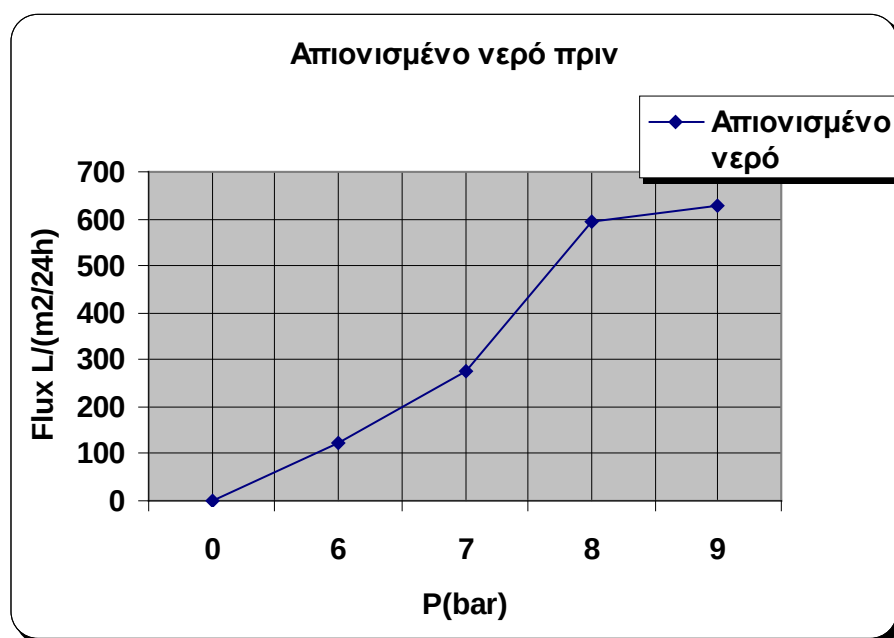


Figure 6.19



## Νερό Βρύσης

Table 6.12

|                   |   |        |        |        |        |        |        |
|-------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| P(bar)            | 0 | 3      | 5      | 6      | 7      | 9      | 10     |
| t(sec)            |   | 150    | 78     | 60     | 49     | 39     | 27     |
|                   |   | 141    | 78     | 61     | 49     | 39     | 27     |
|                   |   | 140    | 77     | 61     | 48     | 39     | 27     |
|                   |   |        | 77     | 61     | 48     | 38     | 26     |
| M.O.              |   | 140,5  | 77,5   | 60,75  | 48,5   | 38,75  | 26,75  |
|                   |   |        |        |        |        |        |        |
| Flux              | 0 | 170,82 | 309,68 | 395,06 | 494,85 | 619,35 | 897,20 |
| M.O. Θερμοκρασίας |   | 22,83  | 25     | 25,5   | 26     | 26,37  | 27     |

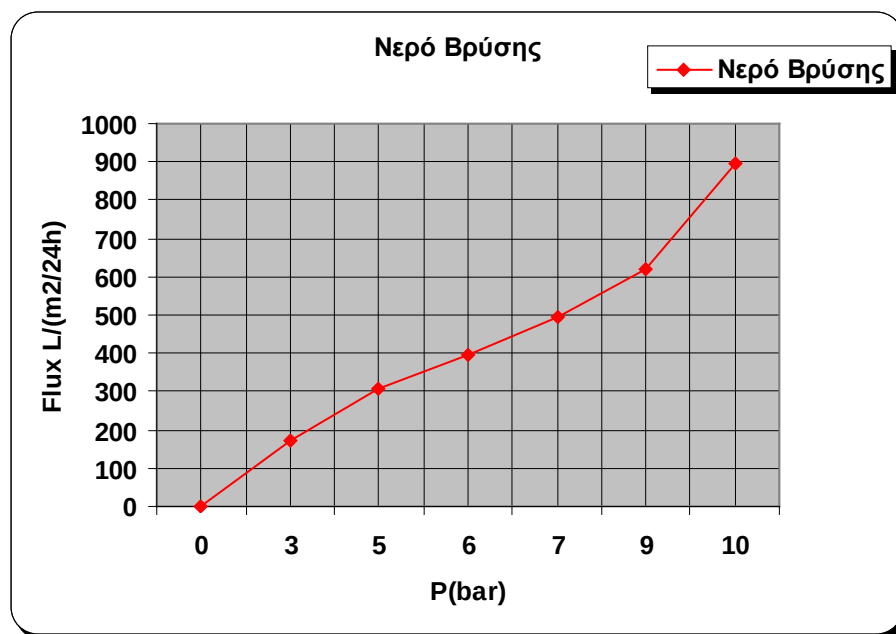


Figure 6. 20

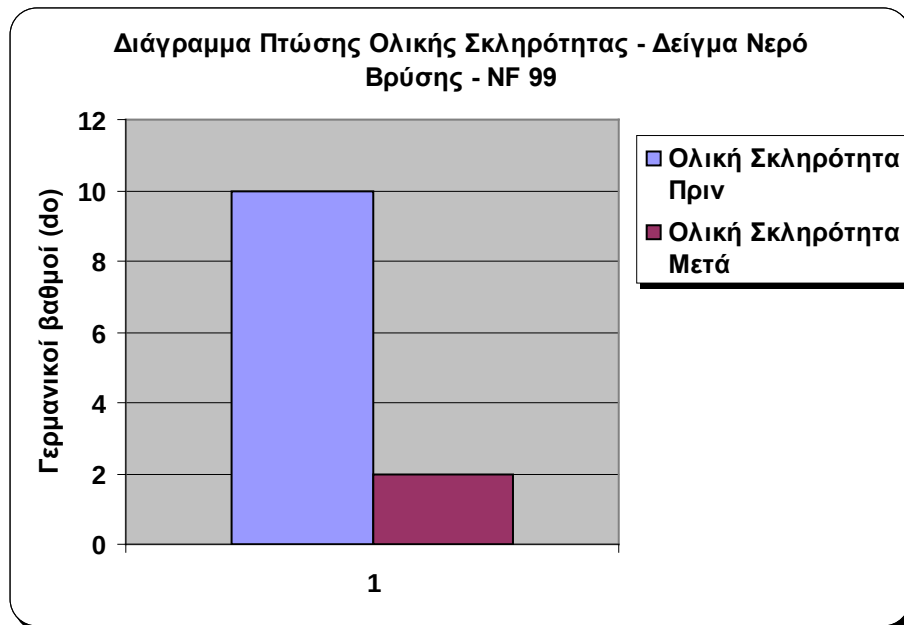


Figure 6.21



Figure 6.22

## Απιονισμένο

Table 6.13

|                   |   |        |        |        |         |
|-------------------|---|--------|--------|--------|---------|
| P(bar)            | 0 | 6      | 7      | 8      | 9       |
| t(sec)            |   | 50     | 43     | 36     | 30      |
|                   |   | 50     | 43     | 36     | 30      |
|                   |   | 50     | 41     | 35     | 2       |
|                   |   | 50     | 41     | 35     | 29      |
| M.O.              |   | 50     | 42     | 35,5   | 22,8    |
|                   |   |        |        |        |         |
| Flux              | 0 | 480,00 | 571,43 | 676,06 | 1054,95 |
| M.O. Θερμοκρασίας |   | 26,5   | 27     | 27,25  | 27,87   |

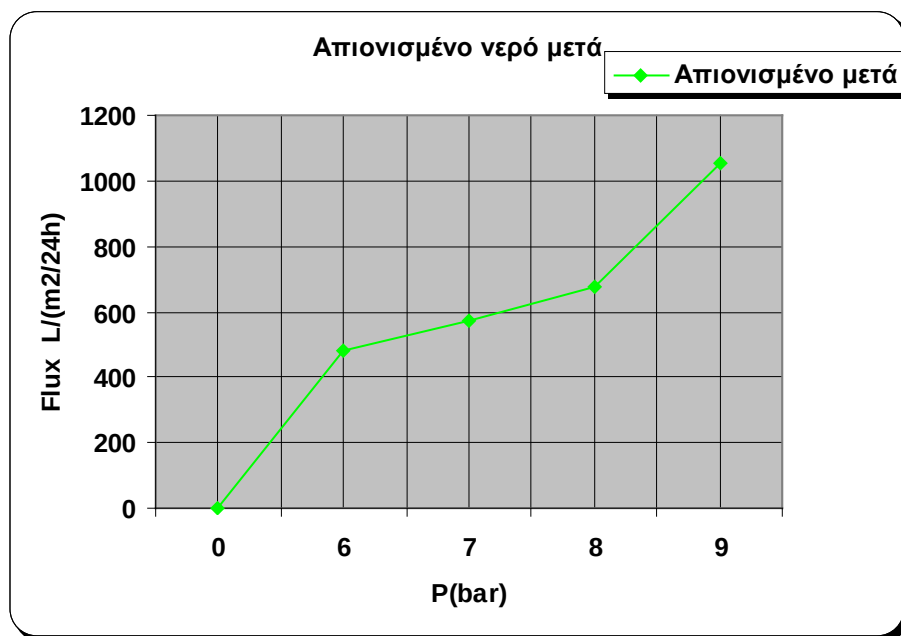


Figure 6.23

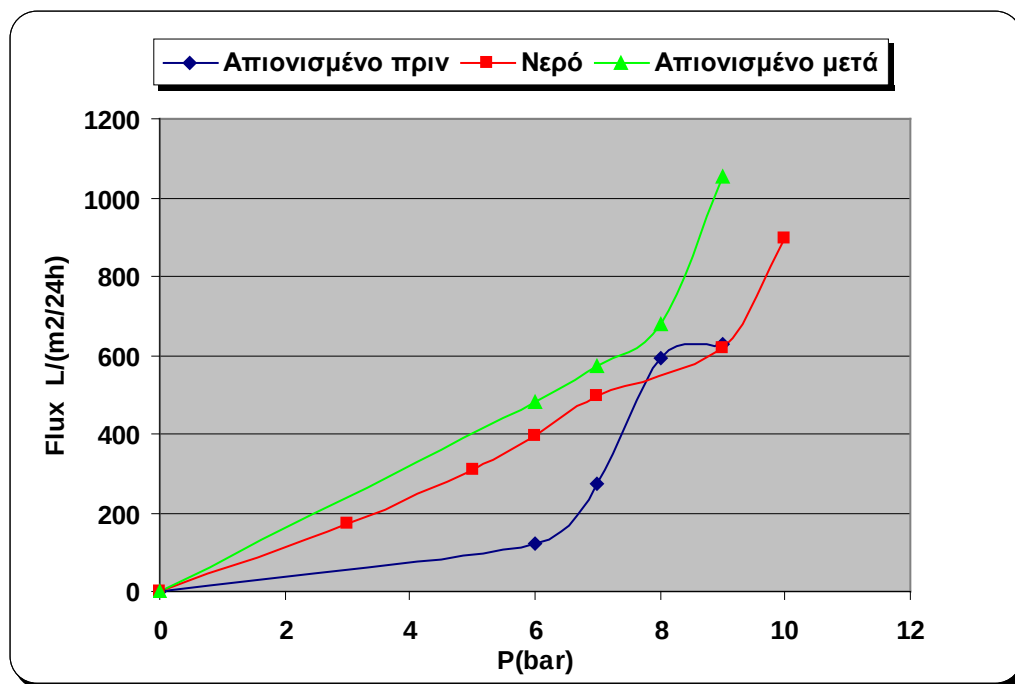


Figure 6.24

### Συμπεράσματα:

Στο τέταρτο σειτ πειραμάτων, το δείγμα ήταν ξανά νερό αλλά η μεμβράνη που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτήν τη φορά τύπου Nf-99.

### Παράμετροι χαρακτηρισμού νερού:

Το δείγμα δεν είχε υψηλή αρχική σκληρότητα 10d<sup>o</sup> και μετά τον διαχωρισμό η σκληρότητα μετρήθηκε μόλις σε 2d<sup>o</sup> (figure6.21). Αντίστοιχα η ηλεκτρική αγωγιμότητα μειώθηκε από 239μS σε 60.4 μS (figure6.22) .

### **ΠΕΙΡΑΜΑ 5<sup>ο</sup>**

Το πέμπτο σειτ πειραμάτων πραγματοποιήθηκε με την μεμβράνη NF99 και το Δείγμα2 (B1). Μετρήθηκε η ροή (flux) του διηθήματος, με σκοπό να μελετηθεί η σχέση ροής και πίεσης λειτουργίας. Σε κάθε τιμή πίεσης γινόντουσαν 4 μετρήσεις της ροής σε ογκομετρική

φιάλη των 10ml.

Μετά από το πείραμα, υπολογίστηκε η μέση ροή ανά πίεση. Τα τελικά αποτελέσματα έχουν μονάδες ροής  $L/(m^2/24h)$  και πίεσης  $bar$ .

Τροφοδοσία : Απιονισμένο – Δείγμα 2 (B1) – Απιονισμένο

### Απιονισμένο

Table 6.14

|                   |   |        |        |        |        |
|-------------------|---|--------|--------|--------|--------|
| P(bar)            | 0 | 6      | 7      | 8      | 9      |
| t(sec)            |   | 50     | 43     | 35     | 30     |
|                   |   | 50     | 43     | 35     | 31     |
|                   |   | 51     | 43     | 34     | 30     |
|                   |   | 49     | 43     | 34     | 31     |
| M.O.              |   | 50     | 43     | 34,5   | 30,5   |
|                   |   |        |        |        |        |
| Flux              | 0 | 480,00 | 558,14 | 695,65 | 786,89 |
| M.O. Θερμοκρασίας |   | 26     | 26     | 26     | 26     |

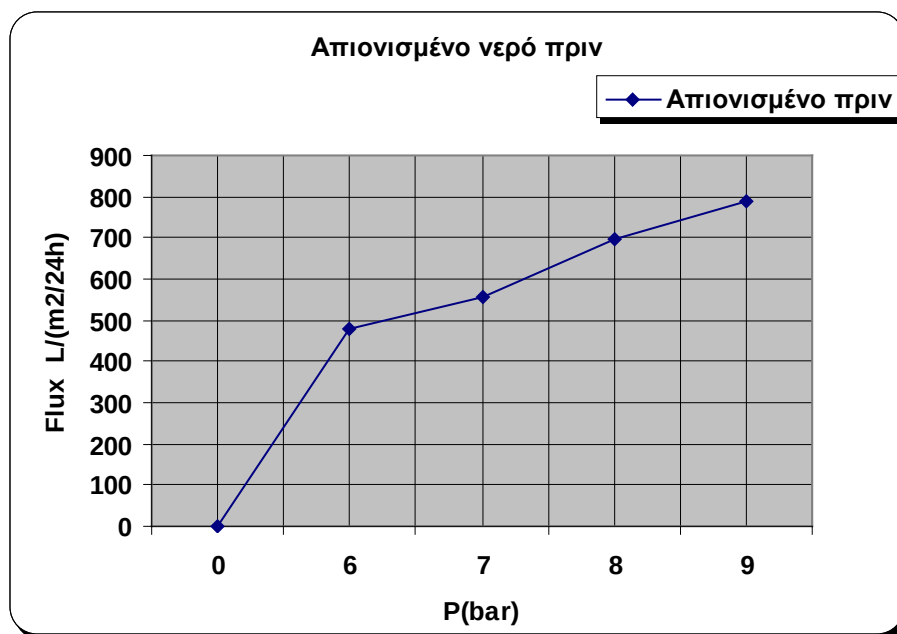


Figure 6.25

### **B1 Δείγμα**

Table 6.15

|                   |   |        |        |        |        |        |        |
|-------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| P(bar)            | 0 | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
| t(sec)            |   | 73     | 68     | 53     | 45     | 38     | 34     |
|                   |   | 74     | 68     | 53     | 45     | 38     | 34     |
|                   |   | 74     | 68     | 53     | 45     | 38     | 33     |
|                   |   | 75     | 68     | 53     | 45     | 38     | 33     |
| M.O.              |   | 74     | 68     | 53     | 45,0   | 38     | 33,5   |
|                   |   |        |        |        |        |        |        |
| Flux              | 0 | 324,32 | 352,94 | 452,83 | 533,33 | 631,58 | 716,42 |
| M.O. Θερμοκρασίας |   | 26     | 26     | 25,5   | 26     | 26     | 26     |

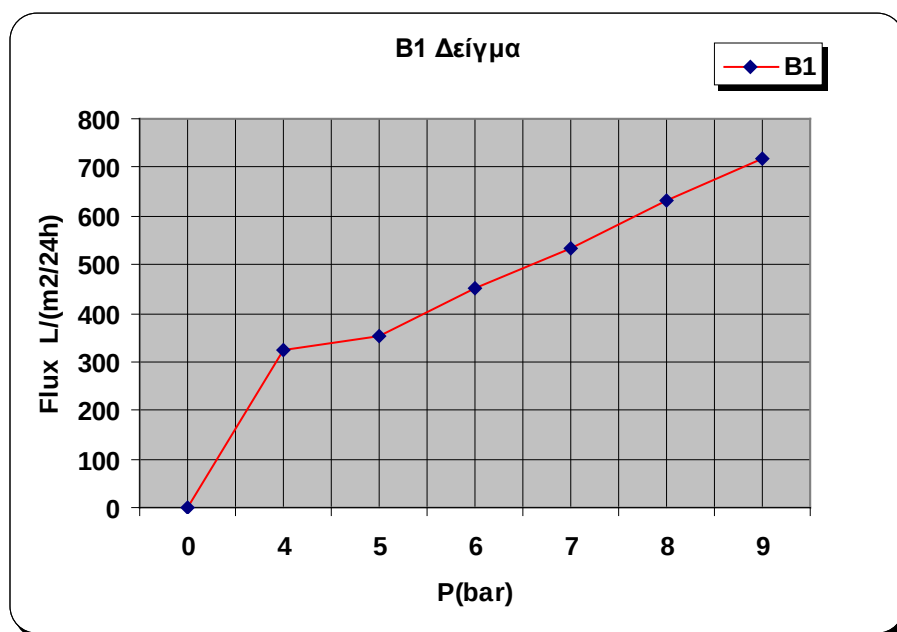


Figure 6.26

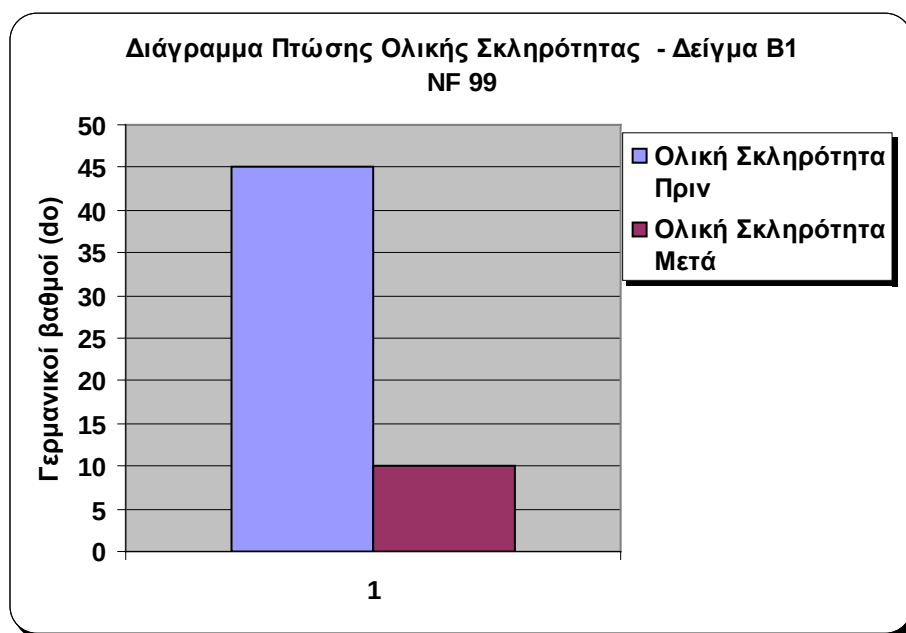


Figure 6.27

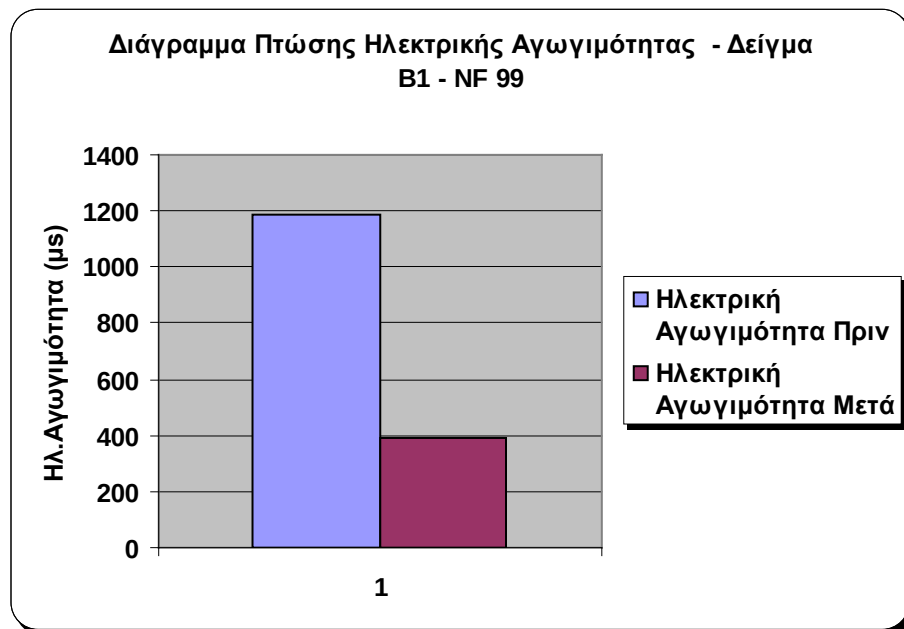


Figure 6.28

### Απιονισμένο

Table 6.16

|                   |   |        |        |        |        |
|-------------------|---|--------|--------|--------|--------|
| P(bar)            | 0 | 6      | 7      | 8      | 9      |
| t(sec)            |   | 54     | 44     | 38     | 33     |
|                   |   | 54     | 43     | 37     | 33     |
|                   |   | 53     | 44     | 38     | 32     |
|                   |   | 53     | 44     | 37     | 33     |
| M.O.              |   | 53,5   | 43,75  | 37,5   | 32,8   |
|                   |   |        |        |        |        |
| Flux              | 0 | 448,60 | 548,57 | 640,00 | 732,82 |
| M.O. Θερμοκρασίας |   | 25,75  | 26     | 26     | 26     |



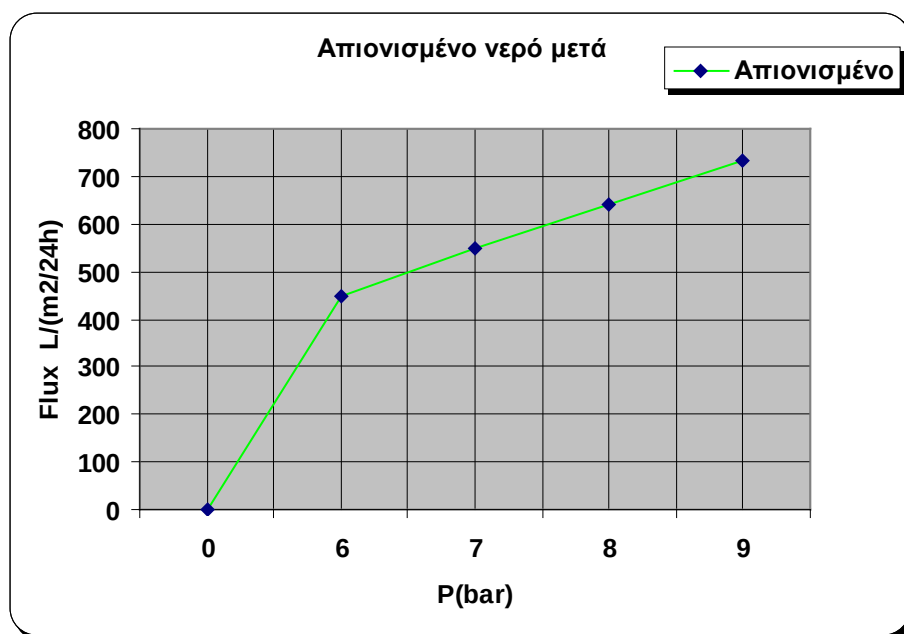


Figure 6.29

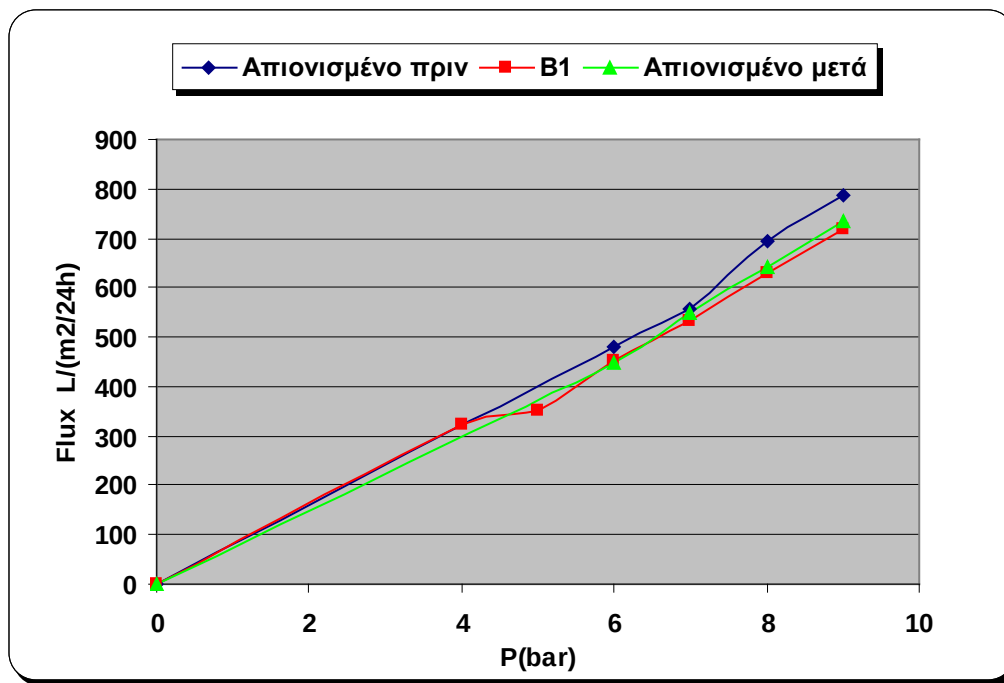


Figure 6.30

### Συμπεράσματα:

Στο πέμπτο σετ πειραμάτων, το δείγμα ήταν το ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στο δεύτερο σετ πειραμάτων αλλά αυτή την φορά η μεμβράνη που χρησιμοποιήθηκε ήταν η NF99. Σκοπός ήταν να μελετηθεί ποια μεμβράνη έχει καλύτερα αποτελέσματα.

Η αραίωση που έγινε εδώ πριν και μετά το διαχωρισμό του διαλύματος ήταν της τάξης 1/10 και 1/2 αντίστοιχα.

### Παράμετροι χαρακτηρισμού νερού:

Η μείωση της σκληρότητας αυτή την φορά ήταν από 45d° σε 10d° (figure6.27) και η ηλεκτρική αγωγιμότητα από 1184μS σε 390μS (figure6.28).

## **ΠΕΙΡΑΜΑ 6°**

Το έκτο και τελευταίο σετ πειραμάτων πραγματοποιήθηκε με την μεμβράνη NF99 και το Δείγμα3 (B2). Μετρήθηκε η ροή (flux) του διηθήματος, με σκοπό να μελετηθεί η σχέση ροής και πίεσης λειτουργίας. Σε κάθε τιμή πίεσης γινόντουσαν 4 μετρήσεις της ροής σε ογκομετρική φιάλη των 10ml.

Μετά από το πείραμα, υπολογίστηκε η μέση ροή ανά πίεση. Τα τελικά αποτελέσματα έχουν μονάδες ροής  $L/(m^2/24h)$  και πίεσης *bar*.

Τροφοδοσία : Απιονισμένο – Δείγμα 3 (B2) – Απιονισμένο

### Απιονισμένο

Table 6.17

| P(bar) | 0 | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  |
|--------|---|----|----|----|----|----|----|
| t(sec) |   | 77 | 63 | 50 | 41 | 35 | 31 |

|                   |   |        |        |        |        |        |        |
|-------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                   |   | 76     | 63     | 50     | 41     | 35     | 31     |
|                   |   | 76     | 62     | 49     | 41     | 35     | 31     |
|                   |   | 74     | 63     | 49     | 42     | 35     | 31     |
| M.O.              |   | 75,75  | 62,75  | 49,5   | 41,3   | 35     | 31     |
|                   |   |        |        |        |        |        |        |
| Flux              | 0 | 316,83 | 382,47 | 484,85 | 581,82 | 685,71 | 774,19 |
| M.O. Θερμοκρασίας |   | 25,5   | 26     | 26     | 26     | 26     | 26     |

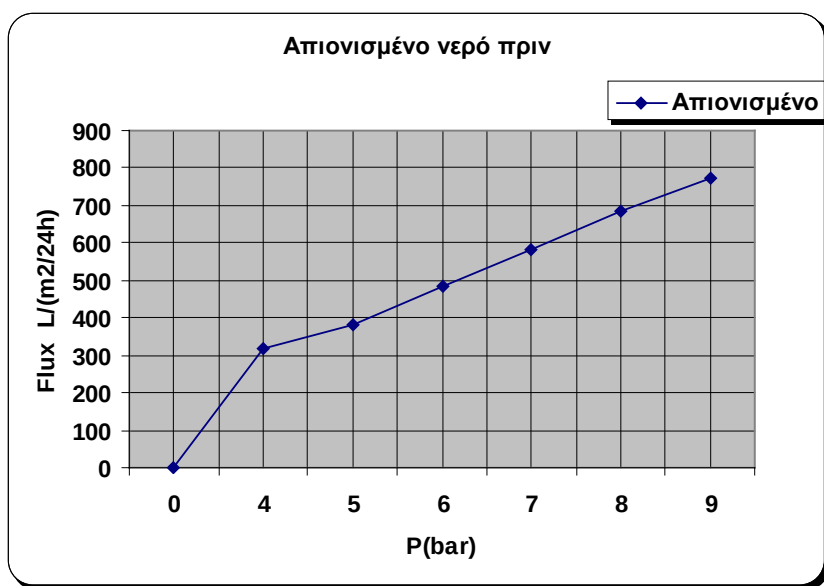


Figure 6.31

## **B2 Δείγμα**

Table 6.18

|        |   |    |    |    |    |    |    |
|--------|---|----|----|----|----|----|----|
| P(bar) | 0 | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  |
| t(sec) |   | 92 | 77 | 62 | 48 | 42 | 37 |
|        |   | 90 | 75 | 62 | 49 | 42 | 37 |
|        |   | 88 | 76 | 62 | 49 | 42 | 37 |
|        |   | 88 | 75 | 62 | 49 | 42 | 37 |

|                   |   |        |        |        |        |        |        |
|-------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| M.O.              |   | 89,5   | 75,75  | 62     | 48,8   | 42     | 37     |
|                   |   |        |        |        |        |        |        |
| Flux              | 0 | 268,16 | 316,83 | 387,10 | 492,31 | 571,43 | 648,65 |
| M.O. Θερμοκρασίας |   | 26     | 26,5   | 26,12  | 26,5   | 26,5   | 27     |

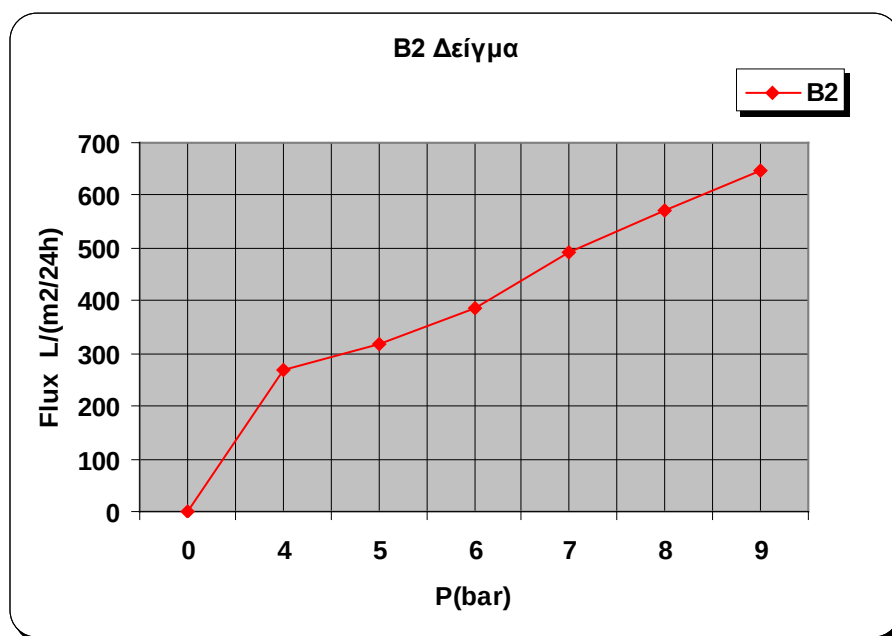


Figure 6.32



Figure 6.33

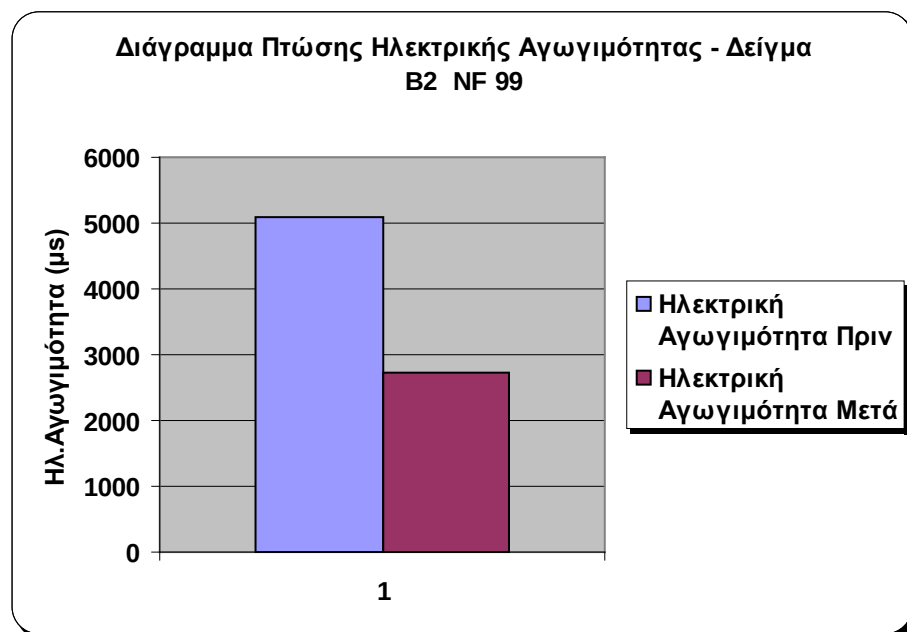


Figure 6.34

## Απιονισμένο νερό

Table 6.19

|                   |   |        |        |        |        |        |
|-------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| P(bar)            | 0 | 4      | 5      | 7      | 8      | 9      |
| t(sec)            |   | 81     | 64     | 44     | 37     | 33     |
|                   |   | 80     | 64     | 44     | 37     | 33     |
|                   |   | 79     | 62     | 45     | 37     | 34     |
|                   |   |        |        |        | 37     | 33     |
| M.O.              |   | 80     | 63,33  | 44,33  | 37,0   | 33,25  |
|                   |   |        |        |        |        |        |
| Flux              | 0 | 300,00 | 378,95 | 541,35 | 648,65 | 721,80 |
| M.O. Θερμοκρασίας |   | 26     | 26     | 26     | 26     | 26     |

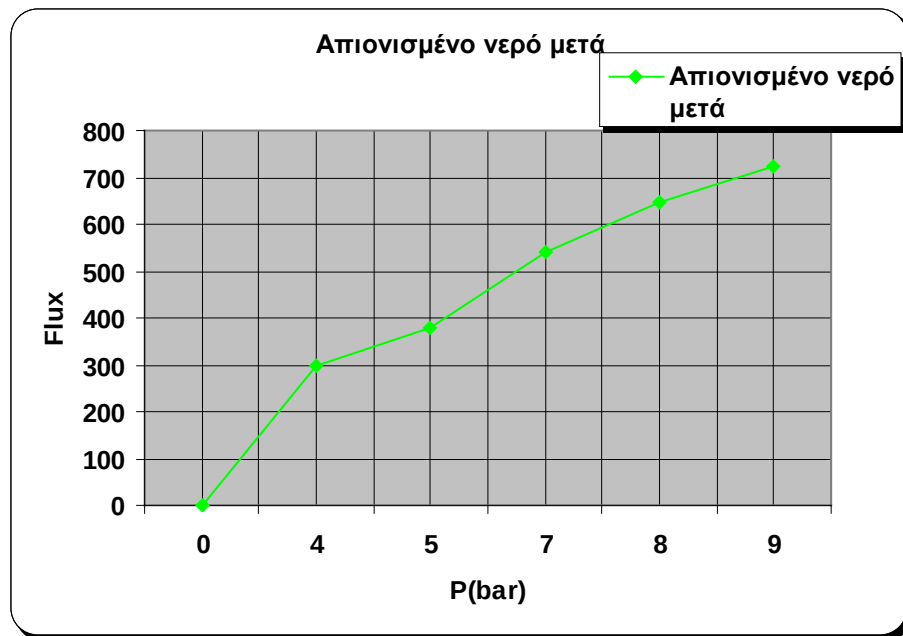


Figure 6.35

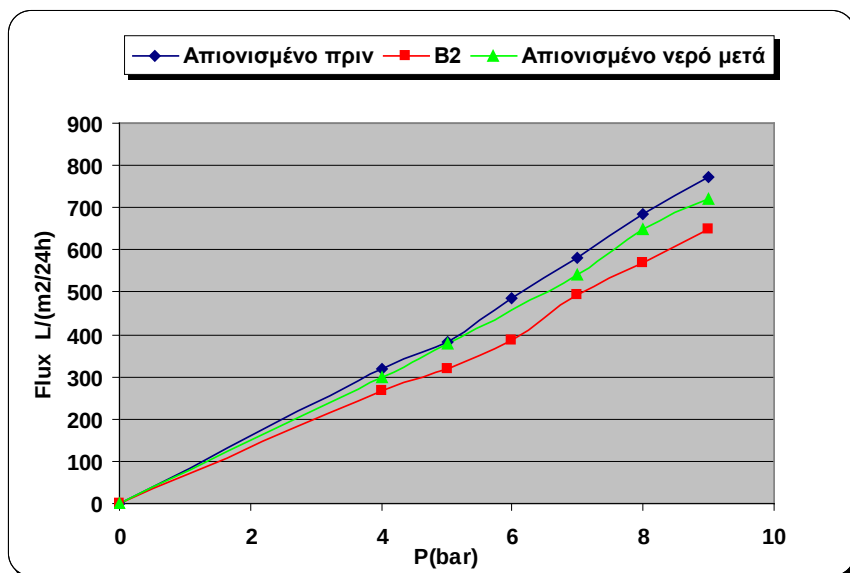


Figure 6.36

### Συμπεράσματα:

Στο τελευταίο σετ πειραμάτων, το δείγμα ήταν το ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στο τρίτο σετ πειραμάτων και η μεμβράνη που χρησιμοποιήθηκε ήταν η NF99. Και αυτή την φορά ο σκοπός ήταν να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεμβρανών (NF99 και Nft 50).

Και σε αυτήν την περίπτωση, για τον υπολογισμό της ολικής σκληρότητας πριν και μετά τον διαχωρισμό, έγινε αραίωση 1/10 και 1/2 αντίστοιχα.

### Παράμετροι χαρακτηρισμού νερού:

Η σκληρότητα του νερού, μετρήθηκε αυτήν τη φορά 75d° όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα (figure6.33) και μετά τον διαχωρισμό μειώθηκε στους 18 γερμανικούς βαθμούς. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα από 5100μS ελαττώθηκε στα 2740μS (figure6.34).

Table 6.20 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Nft 50 – NF99 (Π: ΠΡΙΝ, Μ: ΜΕΤΑ)

| Nft 50           |      |      |          |     |          |      | NF 99 |      |          |     |          |      |
|------------------|------|------|----------|-----|----------|------|-------|------|----------|-----|----------|------|
| Δείγμα           | Νερό |      | Μίλατος1 |     | Μίλατος2 |      | Νερό  |      | Μίλατος1 |     | Μίλατος2 |      |
| Πριν/Μετά        | Π    | Μ    | Π        | Μ   | Π        | Μ    | Π     | Μ    | Π        | Μ   | Π        | Μ    |
| Σκληρότητα (d°)  | 11   | 3    | 40       | 10  | 70       | 21   | 8     | 3    | 37       | 7   | 60       | 14   |
| Αγωγιμότητα (μS) | 285  | 74.8 | 1215     | 515 | 6008     | 3017 | 239   | 89.1 | 1184     | 390 | 5100     | 2740 |



### 6.3 Συμπεράσματα – Προτάσεις για έρευνα

Οι τιμές της ροής (flux) που μετρήθηκαν είναι ικανοποιητικές αν και όχι ιδιαίτερα υψηλές. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει ότι στην πράξη θα χρειαστεί να αυξηθεί η πίεση, πέραν της τιμής των 14 bar έτσι ώστε να υπάρξει και αύξηση της ροής. Σύμφωνα με πηγές [Kenneth Persson, 2009] οι μεμβράνες νανοδιήθησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πιέσεις μέχρι και 25 έως 30 bar. Στο εργαστήριο δεν ήταν δυνατόν να γίνουν τα πειράματα σε αυτές τις πιέσεις για λόγους πρακτικών δυσχερειών της μονάδας DssLabStak M20. Για την ακρίβεια, ο εναλλάκτης θερμότητας δεν λειτουργούσε σε ικανοποιητικό βαθμό με αποτέλεσμα αν υπήρχε αύξηση της πίεσης πέραν μιας τιμής, η θερμοκρασία θα αυξανόταν κατά πολύ και θα επηρεάζονταν και τα αποτελέσματα της ροής (flux).

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί, ότι με την αύξηση της πίεσης πέραν των 15 bar αναμένεται η εμφάνιση του φαινομένου της πόλωσης συγκέντρωσης. Το παραπάνω φαινόμενο δεν ήταν εμφανές στα πειράματα αυτά γιατί το διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν υφάλμυρο νερό. Από πηγές [Βασίλης Γκέκας, Φυσικοχημικές Διεργασίες Διαχωρισμού, 2009] , το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης δεν παρουσιάζεται έντονα σε υφάλμυρα νερά.

Όσον αφορά την αποδοτικότητα των μεμβρανών σε αποσκλήρυνση υφάλμυρου νερού, τα αποτελέσματα (Πίνακα 6.20) είναι πολύ ικανοποιητικά καθώς ακόμα και στα ‘σκληρότερα’ δείγματα υπήρξε σημαντική μείωση των ιόντων ασβεστίου ( $\text{Ca}^{+2}$ ) και μαγνησίου ( $\text{Mg}^{+2}$ ).

Για να κατανοήσουμε καλύτερα την μέθοδο της νανοδιήθησης και την αποδοτικότητα των αντίστοιχων μεμβρανών θα μπορούσαμε, σε μια μελλοντική έρευνα να κατασκευάσουμε διαλύματα με ένα πλήθος συγκεντρώσεων αλάτων, τα οποία συναντάμε στο νερό και η ύπαρξη τους είναι απαραίτητη, καθώς και διαφορετικές τιμές σε pH και να μελετήσουμε την αποδοτικότητα των μεμβρανών και της νανοδιήθησης.

Τέλος, η εκπόνηση μίας τεχνικοοικονομικής μελέτης θα ήταν πολύ σημαντική για την αξιολόγηση της καταλληλότητας της μεθόδου σε βιομηχανικό επίπεδο.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Reverse Osmosis Technology – Application for high purity water production, Bipin S.Parekh
- Φυσικοχημικές Διεργασίες Διαχωρισμού, Βασίλειος Γκέκας – Σπυριδούλα Πρωιμάκη, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ
- Future Industrial Prospects of Membrane Processes, L.Cecille, J-C Toussaint
- Γενική Υδρογεωλογία-Γ τόμος, Γεώργιος Σούλιος
- Εφαρμογή Μονάδας Αφαλάτωσης με χρήση Αιολικής ενέργειας στο νησί της Πάτμου – Διπλωματική εργασία του Καλλονιάτη Ανδρέα, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος – Πολυτεχνείου Κρήτης, 2008
- Αξιολόγηση Ζεολιθικών Τοφφών ως προς την καταλληλότητα τους για αποσκλήρυνση νερών, Διπλωματική εργασία Βασιλείας Δασκαλάκη, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων – Πολυτεχνείο Κρήτης, 2004
- Συμβολή στον χαρακτηρισμό των Μεμβρανών, Διδακτορική διατριβή του Ιωάννη Ξίρχου, Τμήμα Χημικών Μηχανικών - Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2006
- Τεχνική Φυσική Διεργασιών – Νανοδιήθηση, Διπλωματική εργασία της Μαρία Νικολοπούλου – Μαρία Αϊβαλιώτη – Μαρία Αποστολάκη – Σιμόνη Τριανταφυλλίδου – Νίκη Φραντζεσκάκη, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος – Πολυτεχνείου Κρήτης, 2001
- Εισαγωγή στην Γεωλογία Ελλάδος, Ε. Μανούτσου, 2009

### **Από το δίκτυο:**

- Brackish water-Wikipedia, the free encyclopedia  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Brackish\\_water](http://en.wikipedia.org/wiki/Brackish_water)
- Nanofiltration Process Efficiency in Water Desalination - Separation & PurificationReviews:

<http://www.informaworld.com/smpp/content~content=a901401420~db=all~jumptype=rs>

- Shoaiba Desalination Plant - Water Technology:  
<http://www.water-technology.net/projects/shuaiba/>
- *Ultrafiltration, Nanofiltration, Microfiltration and Reverse Osmosis for Liquid Separation:*  
[http://www.niroinc.com/filtration/filtration\\_technologies.asp](http://www.niroinc.com/filtration/filtration_technologies.asp)
- Η χημική σύσταση του πόσιμου νερού:  
<http://www.servitoros.gr/education/view.php/49/901/>
- Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Χαλίων (ΔΕΥΑΧ) - Ποιότητα Νερού – Έλεγχος:  
[http://www.deyax.org.gr/index.php?option=com\\_content&task=view&id=26&Itemid=38](http://www.deyax.org.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=26&Itemid=38)
- Nanofiltration and Reverse Osmosis:  
<http://www.lenntech.com/nanofiltration-and-rosmosis.htm>
- Nanofiltration:  
<http://www.eurodia.com/html/nab.html>
- <http://www.eurodia.com/html/nab.html>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Nanofiltration>
- Σκληρότητα Νερού: [2oekfe.googlepages.com/sklirotita\\_nerou1.pps](http://2oekfe.googlepages.com/sklirotita_nerou1.pps)
- Φυσικοχημικά Χαρακτηριστικά Νερού:  
[www.ekke.gr/estia/gr\\_pages/Erevnit\\_Prg/Life/Valitsaki/4\\_fusikoxhmika\\_xarakthristika.pdf](http://www.ekke.gr/estia/gr_pages/Erevnit_Prg/Life/Valitsaki/4_fusikoxhmika_xarakthristika.pdf)
- Φυσικές και Χημικές Διεργασίες Εξυγίανσης:  
[www.teekerk.gr/uploads/psifiaki/almbanis\\_paragogi\\_nerou%20\(4\).pdf](http://www.teekerk.gr/uploads/psifiaki/almbanis_paragogi_nerou%20(4).pdf)
- Spain Desalination:  
[www.technologyreview.com/microsites/spain/water/docs/Spain\\_desalination.pdf](http://www.technologyreview.com/microsites/spain/water/docs/Spain_desalination.pdf)
- Εφαρμογή τεχνολογίας Μεμβρανών σε προωθημένη επεξεργασία αστικών αποβλήτων με στόχο την επαναχρησιμοποίηση:  
[library.tee.gr/digital/kdth/kdth\\_m3070/kdth\\_m3070\\_fitili.pdf](http://library.tee.gr/digital/kdth/kdth_m3070/kdth_m3070_fitili.pdf)
- Μέθοδοι επεξεργασίας Βιομηχανικού Νερού:  
[www.uowm.gr/enman/dep/marnellos/Nero\\_3\\_presentation.pdf](http://www.uowm.gr/enman/dep/marnellos/Nero_3_presentation.pdf)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### ΛΕΞΙΛΟΓΙΟ ΑΓΓΛΙΚΩΝ – ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΟΡΩΝ

|                                                |                                                    |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| back flushing                                  | περιοδική αναστροφή της ροής                       |
| brackish water                                 | υφάλμυρο νερό                                      |
| barbital                                       | βαρβιτάλη (ή βερονάλη)                             |
| barbituric acid                                | διαιθυλοβαρβιτουρικό οξύ                           |
| cross flow filtration                          | διήθηση εφαπτομενικής τροφοδοσίας                  |
| concentration polarization                     | πόλωσης της συγκέντρωσης                           |
| creep                                          | βαθμιαία παραμόρφωση λόγω τάνυσης                  |
| compaction                                     | συμπύεση                                           |
| cross – flow velocity                          | εφαπτομενικής ταχύτητας ροής                       |
| conductivity                                   | αγωγιμότητα                                        |
| coli count                                     | μικροοργανισμοί                                    |
| driving force                                  | ωθούσα δύναμη                                      |
| dead end filtration                            | διήθηση μετωπικής τροφοδοσίας                      |
| diphenylene sulfone                            | διφαινυλο-σουλφονών                                |
| external quality control or quality assessment | εξωτερικός ποιοτικός έλεγχος                       |
| filter papers                                  | διηθητικό χαρτί                                    |
| feed                                           | τροφοδοσία                                         |
| four leaf spiral wound                         | τετράφυλλη ελικοειδείς περιτύλιξη                  |
| flux                                           | ροή                                                |
| fouling                                        | φαινόμενο «στομώματος»                             |
| fresh water                                    | πόσιμο νερό / που προέρχεται από<br>λίμνες/ποτάμια |
| hollow fiber                                   | πορωδών ινών                                       |
| hazardous waste                                | επικίνδυνο απόβλητο                                |
| indicator                                      | χημικός δείκτης                                    |
| industrially implemented                       | ενταγμένες στην βιομηχανική παραγωγή               |

|                                                                |                                                               |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| ISO, Standard methods for the examination water and wastewater | διεθνή πρότυπα ανάλυσης του νερού                             |
| limitation flux                                                | οριακή ροή                                                    |
| loose reverse osmosis'                                         | νανοδιήθηση                                                   |
| lock ring                                                      | δακτυλίδι ασφαλείας                                           |
| membrane Module and Plant                                      | κελί Μεμβράνης και Μονάδα                                     |
| membrane Configurations                                        | διαμορφώσεις της μεμβράνης                                    |
| monolithic                                                     | μονολιθικές                                                   |
| molecular mass cut off – MMOC                                  | ελάχιστο μοριακό βάρος συγκράτησης ουσίας                     |
| permeate                                                       | πέρασμα – διήθημα                                             |
| plate and frame                                                | επίπεδη                                                       |
| particles size                                                 | μέγεθος σωματιδίων                                            |
| phenyl sulfone                                                 | φαινυλοσουλφόνων                                              |
| permeability                                                   | διαπερατότητα                                                 |
| propylene glycol                                               | προπυλεν γλυκόλη (1.2 προπανογλυκόλη)                         |
| polyamide polymers                                             | πολυμερή πολυαμιδίου                                          |
| quality control                                                | ποιοτικός έλεγχος                                             |
| retentate                                                      | συγκρατηθείσα Φάση ή Υπόλειμμα                                |
| sandwich                                                       | η δομή δύο spacer και ενός support plate                      |
| selective barrier                                              | εκλεκτικό φράγμα                                              |
| sodium                                                         | νάτριο                                                        |
| spiral wound                                                   | ελικοειδή περιτύλιξη                                          |
| surface fouling                                                | επιφανειακό fouling                                           |
| soluble oil                                                    | διαλυτό λάδι                                                  |
| sodium hydrogen sulphite                                       | όξινο θειικό νάτριο                                           |
| spacer                                                         | δίσκος προστασίας της μεμβράνης και κατανομής πίεσης και ροής |
| support plate                                                  | δίσκος στήριξης μεμβράνης                                     |
| titration                                                      | τιτλοδότηση                                                   |

|                              |                     |
|------------------------------|---------------------|
| transmembrane pressure – TMP | διαμεμβρανική πίεση |
| tubular                      | σωληνοειδείς        |
| turbidity                    | θολερότητα          |
| unit operation               | φυσική διεργασία    |

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

## ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΩΝ

|      |                                                                          |
|------|--------------------------------------------------------------------------|
| AOC  | Assimilable Organic Carbon<br>Αφομοιώσιμο Οργανικό Άνθρακα               |
| BOD  | Biochemical Oxygen Demand<br>Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο               |
| CA   | Cellulose (di – and tri -) Acelate<br>Κυτταρινικό Άλας Οξικού Οξέος      |
| COD  | Chemical Oxygen Demand<br>Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο                     |
| MF   | Microfiltration<br>Μικροδιήθηση                                          |
| MWCO | Molecular Weight Cut Off<br>Ελάχιστο Μοριακό Βάρος Συγκράτησης<br>Ουσίας |
| NF   | Nanofiltration<br>Νανοδιήθηση                                            |
| PE   | Polyester<br>Πολυεστέρας                                                 |
| PS   | Polysulfone<br>Πολυσουλφόνη                                              |
| RO   | Reverse Osmosis<br>Αντίστροφη όσμωση                                     |
| TMP  | Trans Membrane Pressure<br>Διαμεμβρανική Πίεση                           |
| TDS  | Total Dissolved Solids<br>Ολικά Διαλυμένα Στερεά                         |
| TSS  | Total Suspended Solids<br>Ολικά Αιωρούμενα Στερεά                        |

|     |                                     |
|-----|-------------------------------------|
| THM | Trihalomethane<br>Τριαλογονομεθάνιο |
| UF  | Ultrafiltration<br>Υπερδιήθηση      |

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΧΗΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΟ ΝΕΡΟ

| Παράμετρος             | Τυπική συγκέντρωση στο δίκτυο ύδρευσης ΔΕΥΑΧ      | Ανώτατη συγκέντρωση σύμφωνα με την ΚΥΑ Υ2/2600/2001        |
|------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| PH                     | 7.95-8.15                                         | >6.5 και < 9,5                                             |
| Θερμοκρασία            | 14-18 °C                                          |                                                            |
| Αγωγιμότητα            | 250-270 $\mu\text{S}/\text{cm}$                   | 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$                               |
| Θολερότητα             | 0.5 NTU                                           | Αποδεκτή από τους καταναλωτές και άνευ ασυνήθους μεταβολής |
| Νιτρικά                | 1.3-2.2 mg/l                                      | 50 mg/l                                                    |
| Νιτρώδη                | 0.02 mg/l                                         | 0,5 mg/l                                                   |
| Αμμωνία                | <0.05 mg/l                                        | 0,50 mg/l                                                  |
| Χλωριούχα              | 10-12 mg/l                                        | 250 mg/l                                                   |
| Θειικά                 | 14-18 mg/l                                        | 250 mg/l                                                   |
| Φθοριούχα              | 0.2-0.5 mg/l                                      | 1,5 mg/l                                                   |
| Δείκτης υπερμαγγανικών | 0-1 mg O <sub>2</sub> /l                          | 5 mg/l                                                     |
| Ασβέστιο               | 38-43 mg/l                                        |                                                            |
| Μαγνήσιο               | 12-13 mg/l                                        |                                                            |
| Ολική σκληρότητα       | 145-160 mg CaCO <sub>3</sub> /l (8-9 γερμ βαθμοί) |                                                            |
| Παροδική σκληρότητα    | 110-120 mg CaCO <sub>3</sub> /l                   |                                                            |
| Μόνιμη σκληρότητα      | 35-45 mg CaCO <sub>3</sub> /l                     |                                                            |
| Αλκαλικότητα           | 110-120 mg/l                                      |                                                            |
| Διτανθρακικά           | 130-145 mg/l                                      |                                                            |
| Σίδηρος                | 10-20 $\mu\text{g}/\text{l}$                      | 200 $\mu\text{g}/\text{l}$                                 |
| Χαλκός                 | 3-15 $\mu\text{g}/\text{l}$                       | 2000 $\mu\text{g}/\text{l}$                                |

|                                           |                  |                              |
|-------------------------------------------|------------------|------------------------------|
| Μαγγάνιο                                  | <10 µg/l         | 50 µg/l                      |
| Βόριο                                     | 0.15 mg/l        | 1 mg/l                       |
| Νάτριο                                    | 7-8 mg/l         | 200 mg/l                     |
| Κάλιο                                     | 0.5-1 mg/l       | 12 mg/l                      |
| Αρσενικό                                  | <1 µS/l          | 10 µg/l                      |
| Αντιμονιο                                 | <1 µg/l          | 5 µg/l                       |
| Κάδμιο                                    | <1 µg/l          | 5 µg/l                       |
| Μόλυβδος                                  | <1 µg/l          | 10 µg/l                      |
| Αργίλιο                                   | 2-7 µg/l         | 200 µg/l                     |
| Νικέλιο                                   | < 1µg/l          | 20 µg/l                      |
| Χρώμιο                                    | < 1 µg/l         | 50 µg/l                      |
| Υδράργυρος                                | < 0,4 µg/l       | 1 µg/l                       |
| Σελήνιο                                   | < 2 µg/l         | 10 µg/l                      |
| TOC                                       | 0.8 µg/l         | Άνευ ασυνήθους μεταβολής     |
| ΡΑΗ                                       | <0.032 µg/l      | 0,1 µg/l                     |
| Βενζο-α-πυρένιο                           | < 0.003 µg/l     | 0,01 µg/l                    |
| Παρασιτοκτόνα                             | Δεν ανιχνεύονται | 0,1 µg/l                     |
| Σύνολο παρασιτοκτόνων                     | Δεν ανιχνεύονται | 0,5 µg/l                     |
| Ολικά τριαλογονομεθάνια                   | <2 µg/l          | 100 µg/l                     |
| Τριχλωροαιθυλένιο+<br>Τετραχλωροαιθυλένιο | < 0,8            | 10 µg/l                      |
| 1,2-διχλωροαιθάνιο                        | Δεν ανιχνεύεται  | 3 µg/l                       |
| Βρωμικά                                   | < 2 µg/l         | 10 µg/l                      |
| Υδρόθειο                                  | Δεν ανιχνεύεται  | Μη ανιχνεύσιμο οργανοληπτικά |
| Ολικά διαλυμένα στερεά                    | 165 mg/l         | 1500 mg/l                    |
| Επιφανειοδραστικοί παράγοντες             | < 0.05 mg/l      | 0.2 mg/l                     |

|                         |                     |                               |
|-------------------------|---------------------|-------------------------------|
| Φωσφόρος P2O5           | 0.18 mg/l           | 5 mg/l                        |
| Υπολειμματικό χλώριο    | 0.25-0.35 mg/l      | Ελάχιστη συγκέντρωση 0.2 mg/l |
| Ολικά κολοβακτηριοειδή  | 0 αποικίες / 100 ml | 0 αποικίες / 100 ml           |
| E.Coli                  | 0 αποικίες / 100 ml | 0 αποικίες / 100 ml           |
| Εντερόκοκκος            | 0 αποικίες / 100 ml | 0 αποικίες / 100 ml           |
| Κλωστηρίδιο perfringens | 0 αποικίες / 100 ml | 0 αποικίες / 100 ml           |
| Ολικά βακτήρια 37°C     | < 10 αποικίες /1 ml | Άνευ ασυνήθους μεταβολής      |
| Ολικά βακτήρια 22°C     | < 20 αποικίες /1 ml | Άνευ ασυνήθους μεταβολής      |

