



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική εργασία

Θέμα

«Νανοδιήθηση υφάλμυρου νερού»

Γιάγκου Κωνσταντία

Εξεταστική επιτροπή

Β. Γκέκας (επιβλέπων)

Ε. Παλαιολόγος

Ν. Παρανυχιανάκης

Χανιά,
Φεβρουάριος 2010

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Β. Γκέκα για την επιστημονική αλλά και την ψυχολογική υποστήριξη κατά τη διάρκεια συγγραφής της διπλωματικής εργασίας μου. Επίσης, τον ευχαριστώ θερμά για την πολύτιμη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας την εργαστηριακή επίβλεψη και βοήθεια προσέφερε ο κ. Φουντούλης Γεώργιος, μεταπτυχιακός φοιτητής του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την εξαιρετική συνεργασία, το ευχάριστο εργαστηριακό κλίμα καθώς και την πολύτιμη βοήθειά του.

Περίληψη

Η υφαλμύριση υπόγειων υδροφορέων σε παραλιακές ζώνες είναι ένα φαινόμενο που παρατηρείται σε αρκετές περιοχές της χώρας μας.

Εξαιτίας αυτού, αυτό το νερό μπορεί να γίνει ακατάλληλο είτε σαν πόσιμο είτε για γενικότερη χρήση από τον άνθρωπο (οικιακή, βιομηχανική κ.λ.π.)

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάστηκαν δείγματα από την Μίλατο του νομού Λασιθίου στο Εργαστήριο Φαινομένων Μεταφοράς και Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη τόσο της ποσοτικής όσο και της ποιοτικής απόδοσης μεμβρανών Νανοδιήθησης στην επεξεργασία υφάλμυρου νερού. Η μονάδα του εργαστηρίου στην οποία έγιναν όλα τα πειράματα είναι η DSS LabStack M20. Οι μεμβράνες που χρησιμοποιήθηκαν είναι η Nft50 καθώς και η NF99, της δανέζικης εταιρείας DSS.

Στο θεωρητικό μέρος αναφέρονται και αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των μεμβρανών και της διεργασίας της νανοδιήθησης. Στο πειραματικό μέρος αναλύονται οι συνθήκες εκτέλεσης των πειραμάτων καθώς και τα υλικά και μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ποσοτικά αλλά και ποιοτικά. Τέλος, γίνεται μια αναφορά σε εφαρμογές και αναφέρονται τα συμπεράσματα σε ότι αφορά την απόδοση της συγκεκριμένης διεργασίας. Με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων μπορούμε να πούμε ότι η διεργασία της νανοδιήθησης στην επεξεργασία των υφάλμυρων αυτών δειγμάτων είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική.

Abstract

In many coastal regions of Greece, water is often brackish. As a result, it is not suitable, neither for potable water nor for irrigation use.

The purpose of this dissertation is the study of Nanofiltration (NF) membranes and their suitability in the treatment of brackish water. NF is a pressure –driven membrane process. Membrane technology became particularly applicable to drinking water production in the late 1980s.

The experimental part of this Thesis was carried out in the Laboratory of the Transport Phenomena and Applied Thermodynamics of the department of Environmental Engineering. The membrane unit used was DSS LabStack M20 unit. The DSS company has also kindly provided us the membrane samples to work with. In this Thesis after a first introductory chapter the principles of Nanofiltration are outlined and then my experimental results are presented and discussed. The results are found to be very promising, so that at the end of the Thesis potential applications of our methodology are provided.

Conclusively, Nanofiltration could satisfactorily be applied for the desalination and softening of brackish waters.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	2
Περίληψη.....	3
Abstract.....	5
1.Εισαγωγή.....	7
1.1.Σκοπός και έκταση της παρούσας εργασίας.....	7
2.Θεωρητικό μέρος.....	8
2.1.Μεμβράνες.....	8
2.2.Νανοδιήθηση.....	11
3. Πειραματικό μέρος.....	26
3.1.Υλικά και μέθοδοι.....	26
3.2. Μεμβράνες.....	30
3.3. Πειραματικές συνθήκες.....	31
3.4. Συντήρηση μεμβρανών.....	32
3.5. Προσδιορισμός σκληρότητας και αλατότητας.....	33
4. Αποτελέσματα.....	34
4.1. Ποσοτική απόδοση.....	34
4.2.Ποιοτική απόδοση.....	42
5. Εφαρμογές.....	58
5.1. Αφαλάτωση νερού σε τουριστικές μονάδες.....	58
5.2 Νερό ψύξης.....	60
6. Συμπεράσματα.....	63
7.Βιβλιογραφία.....	64

1.Εισαγωγή

Στο Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος έχει κατανοηθεί η σημασία της Τεχνολογίας Μεμβρανών για περιβαλλοντικές Εφαρμογές (Εργαστήρια κκ Διαμαντόπουλου, Μαντζαβίνου, Καλογεράκη). Στο εργαστήριο του κ. Γκέκα έχουν εκπονηθεί πολλές διπλωματικές εργασίες σε επίπεδο προπτυχιακό και μεταπτυχιακό, με θέμα την ανάκτηση πολύτιμων συστατικών από αγρο-βιομηχανικά απόβλητα, ως επίσης την ανάπτυξη νέων σχετικά μεθόδων όπως η Νανοδιήθηση.

1.1.Σκοπός και έκταση της παρούσας εργασίας

Σκοπός ειδικά της παρούσας εργασίας εξ αφορμής του προβλήματος των υφάλμυρων νερών στην Κρήτη, ήταν να εξεταστεί κατά πόσον η μέθοδος της Νανοδιήθησης μπορεί να επιτύχει αποσκλήρυνση και μερική αφαλάτωση των υφάλμυρων νερών. Για σύγκριση δοκιμάστηκαν δείγματα νερού βρύσης ενώ τα κυρίως δείγματα ελήφθησαν από πηγάδια της περιοχής Μιλάτου του Ν. Λασηθίου.

2.Θεωρητικό μέρος

2.1.Μεμβράνες

Η μεμβράνη ορίζεται ως μια διεπιφάνεια η οποία παρεμβαλλόμενη μεταξύ δυο φάσεων επιτρέπει σε ορισμένα συστατικά να διέλθουν από τη μια φάση στην άλλη, ενώ σε άλλα συστατικά παρεμποδίζει την διέλευση.

Ως εκ τούτου, μια μεμβράνη θα πρέπει να έχει τις εξής ιδιότητες:

- Να είναι ημιπερατή
- Να έχει τη μεγαλύτερη δυνατή επιφάνεια σε δοσμένο όγκο
- Να έχει το μικρότερο δυνατό πάχος

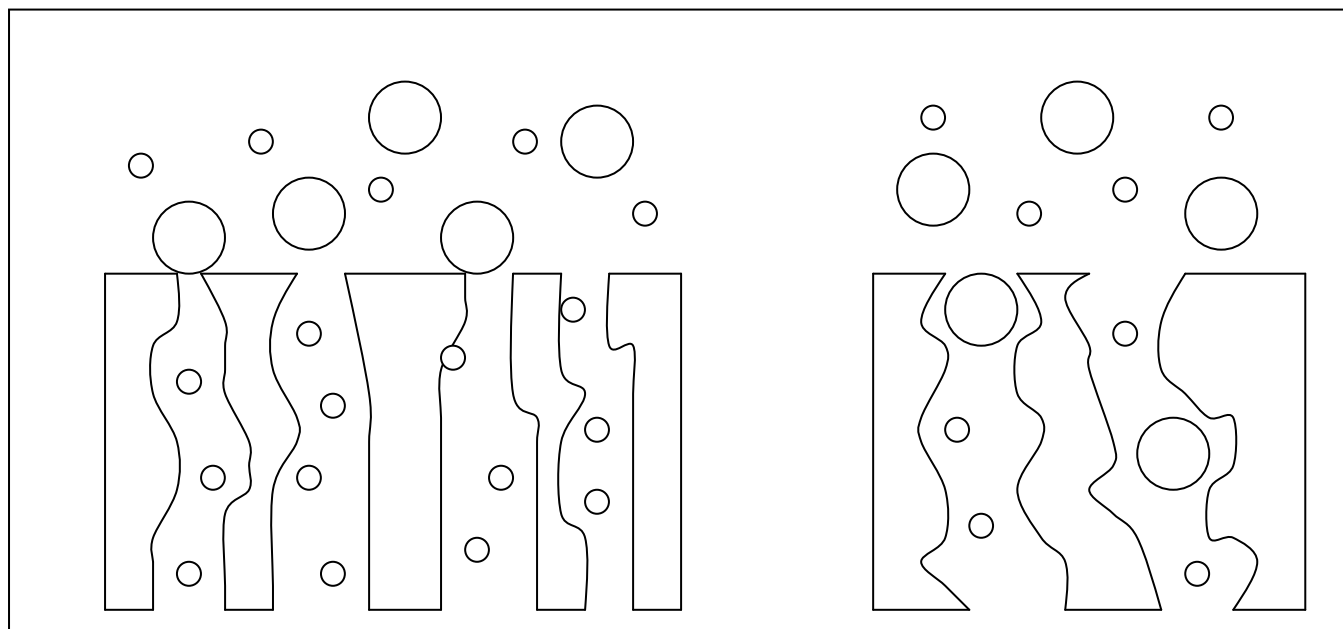
Για να επιτευχθούν τα παραπάνω, έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές γεωμετρίες των μεμβρανών οι οποίες ονομάζονται και διαμορφώσεις:

- Επίπεδες μεμβράνες (flat membranes)
- Σπειροειδής μεμβράνες ή σπειροειδούς τυλίξεως (spiral-wound membranes)
- Κοίλες ινώδεις μεμβράνες ή διάταξης λεπτών πορωδών ινών (hollow-fiber membranes)
- Σωληνοειδούς διατάξεως (tubular module)

Σημασία έχουν τόσο η ποιοτική όσο και η ποσοτική απόδοση των μεμβρανών. Η ποσοτική παράμετρος είναι η Πυκνότητα της Ροής (FLUX) του διηθήματος, δηλαδή η ποσότητα του διηθήματος στη μονάδα επιφάνειας και στη μονάδα χρόνου. Οι μονάδες μέτρησης στο σύστημα SI είναι $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, δηλαδή η FLUX έχει μονάδες φαινόμενης ταχύτητας ροής, ενώ οι συνηθισμένες πρακτικές μονάδες είναι λίτρα ανά τετραγωνικό μέτρο και ώρα ή ημέρα ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$).

Η ποιοτική απόδοση εκφράζεται από τον Συντελεστή Συγκράτησης ή Απόρριψης ο οποίος ορίζεται κατωτέρω και αποτελεί την σχετική ποσοστιαία μεταβολή της συγκέντρωσης του συστατικού που πρόκειται να συγκρατήσει ή απορρίψει η μεμβράνη .

Ειπώθηκε πιο πάνω ότι η μεμβράνη πρέπει να είναι μικρού πάχους, έτσι ώστε η αντίσταση στη ροή να είναι όσο γίνεται μικρότερη. Από την άλλη πλευρά η μεμβράνη πρέπει να έχει μια στοιχειώδη μηχανική αντοχή. Η επίλυση αυτού του προβλήματος επιτεύχθηκε κυρίως με την επινόηση της ασύμμετρης δομής της μεμβράνης αρχές της δεκαετίας του 1960 με πρώτη εφαρμογή στις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης. Μέχρι τότε οι μεμβράνες, κύρια μεμβράνες μικροδιήθησης, ήταν συμμετρικές δηλαδή υπήρχε η ίδια συμπεριφορά και από τις δυο πλευρές της μεμβράνης.



(α)

(β)

Σχήμα 1: Συμπεριφορά (α) μιας ασύμμετρης και (β) μιας συμμετρικής μεμβράνης στο διαχωρισμό.

Πηγή: Λάζος Ε., Λέρης Α., Τότσιου Γ. και Ωραιοπούλου Β., 'Νέες Τεχνολογίες στη Βιομηχανία Τροφίμων και Δυνατότητες Εφαρμογής των στην Ελλάδα', Τεχνικό Επιμελητήριο της Ελλάδος, Αθήνα 1989.

Μεμβρανοθήκη, μοναδιαίο στέλεχος μεμβράνης (MODULE)

Πέραν της επινοήσεως της ασύμμετρης δομής η μεμβράνη περικλείεται σε μια κατάλληλη θήκη τη Μεμβρανοθήκη. Μια ή περισσότερες μεμβράνες σε μεμβρανοθήκη αποτελούν ένα μοναδιαίο αυτόνομο στέλεχος ή κελλίο μεμβράνης, στα Αγγλικά MODULE. Τέτοιες μονάδες συνδεόμενες εν σειρά ή και εν παραλλήλω φτιάχνουν μια εγκατάσταση μεμβράνης.

2.2.Νανοδιήθηση

Η Νανοδιήθηση αποτελεί μία από τις τεχνολογίες αφαλάτωσης οι οποίες βασίζονται στη χρήση μεμβράνης. Ως διεργασία Μεμβρανών τοποθετείται από την άποψη πορώδους και της εξασκούμενης πίεσης για την υπερνίκηση της ωσμωτικής πίεσης μεταξύ της Αντίστροφης Ωσμωσης και της Υπερδιήθησης. Έτσι το μέγεθος πόρων είναι της τάξης 1-2 nm κι η πίεση που εφαρμόζεται είναι στην περιοχή 0.5-2 MPa. Για την υπερδιήθηση τα αντίστοιχα νούμερα είναι 2-50 nm και 0.1-0.8 MPa, ενώ για την Αντίστροφη Ωσμωση, το μέγεθος των πόρων παραμένει ένα φιλολογικό ερώτημα (δεν υπάρχουν πόροι με την κλασσική έννοια του όρου, ενώ η διαμεμβρανική πίεση είναι της τάξης των 2-7 MPa).

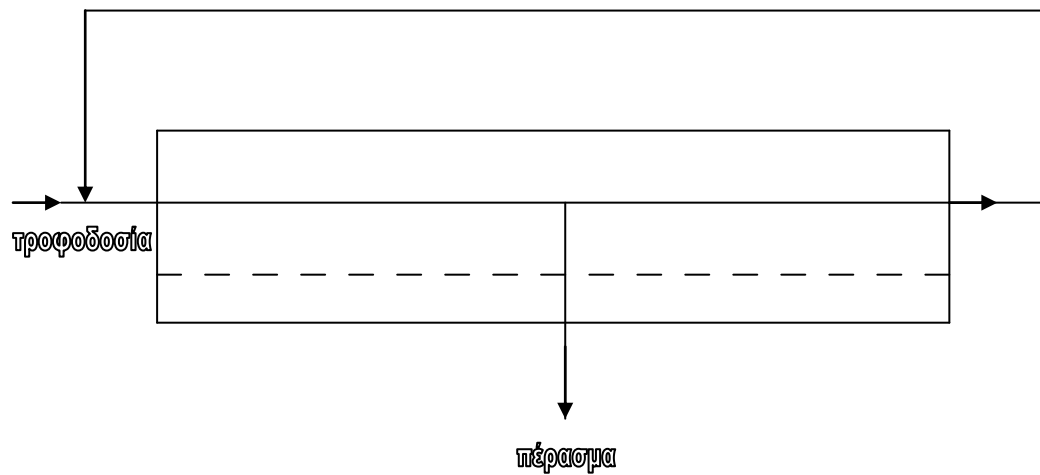
Το διάλυμα εισχωρεί διαμέσου της μεμβράνης, η οποία λειτουργεί ως ένα κόσκινο για τα συστατικά τα οποία είναι να απορριφθούν από τη μεμβράνη, π.χ. τα άλατα σκληρότητας, ενώ επιτρέπεται η διέλευση των μικρότερων μορίων, δηλαδή νερού και μονοσθενών ιόντων. Ο κύριος μηχανισμός θα μπορούσαμε να πούμε είναι το σούρωμα, ειδικά όμως για την Νανοδιήθηση παίζουν σημαντικό ρόλο κι οι διεπιφανειακές και διαμοριακές δυνάμεις. Το μοριακό βάρος των διαλυμένων συστατικών τα οποία συγκρατούνται είναι από 300 έως και 1000 Da.

Οι μεμβράνες Νανοδιήθησης είναι ασύμμετρης δομής και ο τρόπος λειτουργίας (MODE OF OPERATION) είναι ο της εφαπτομενικής τροφοδοσίας (CROSS FLOW)

Φάσεις-συστατικά

Σε διεργασίες μεμβρανών, όπως και στη νανοδιήθηση, υπάρχει μια λεπτή μεμβράνη η οποία παρεμβάλλεται ανάμεσα στην τροφοδοσία και το διήθημα. Ό,τι δεν περνάει από τη μεμβράνη ονομάζεται υπόλειμμα και είναι η φάση από την πλευρά της τροφοδοσίας. Η μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται είναι η εφαπτομενική τροφοδοσία (cross flow).

Σε αντίθεση με την κατά μέτωπο τροφοδοσία (dead end), έχει σκοπό να ελαχιστοποιήσει τις εναποθέσεις υλικού στην επιφάνεια της μεμβράνης.



Σχήμα 2: Εφαπτομενική τροφοδοσία(cross flow)

Δρώσα δύναμη είναι η διαφορά πίεσης ή η κλίση της πίεσης εγκάρσια της μεμβράνης: $\text{Driving force} = \frac{\Delta P}{b}$. Συνδέεται με την πυκνότητα ροής

με τη σχέση: $J = K \frac{\Delta P}{b}$ όπου K: συντελεστής διαπερατότητας της μεμβράνης, b: πάχος της μεμβράνης. Στον παρακάτω Πίνακα δίνονται

χαρακτηριστικά της Νανοδιήθησης όσον αφορά την απόρριψη:

Παράμετρος	NF
Θολότητα	92-99%
TSS	97-99.5%
TOC	65-80%
BOD	80-90%
COD	85-95%
Ολικό N	≈ 16%
Ολικός P	≈ 32%
Μικρόβια	99%

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά απόδοσης της διεργασίας

Πυκνότητα ροής(flux)

Είναι η μάζα ή ο όγκος του συστατικού που διέρχεται δια μέσου της μεμβράνης ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου. Συμβολίζεται με J. Μονάδες μέτρησής της είναι οι εξής:

- Ογκομετρική ροή(volumetric flux) $m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
- Μοριακή ροή(chemical flux) $kmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
- Ροή μάζας(mass flux) $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$

Σχετίζεται με τη δρώσα δύναμη με ένα απλό μοντέλο ευθείας αναλογίας:

$$\text{Ροή} = \text{Διαπερατότητα} \cdot \text{Δρώσα δύναμη}$$

Το φαινόμενο του ‘στομώματος’(fouling)

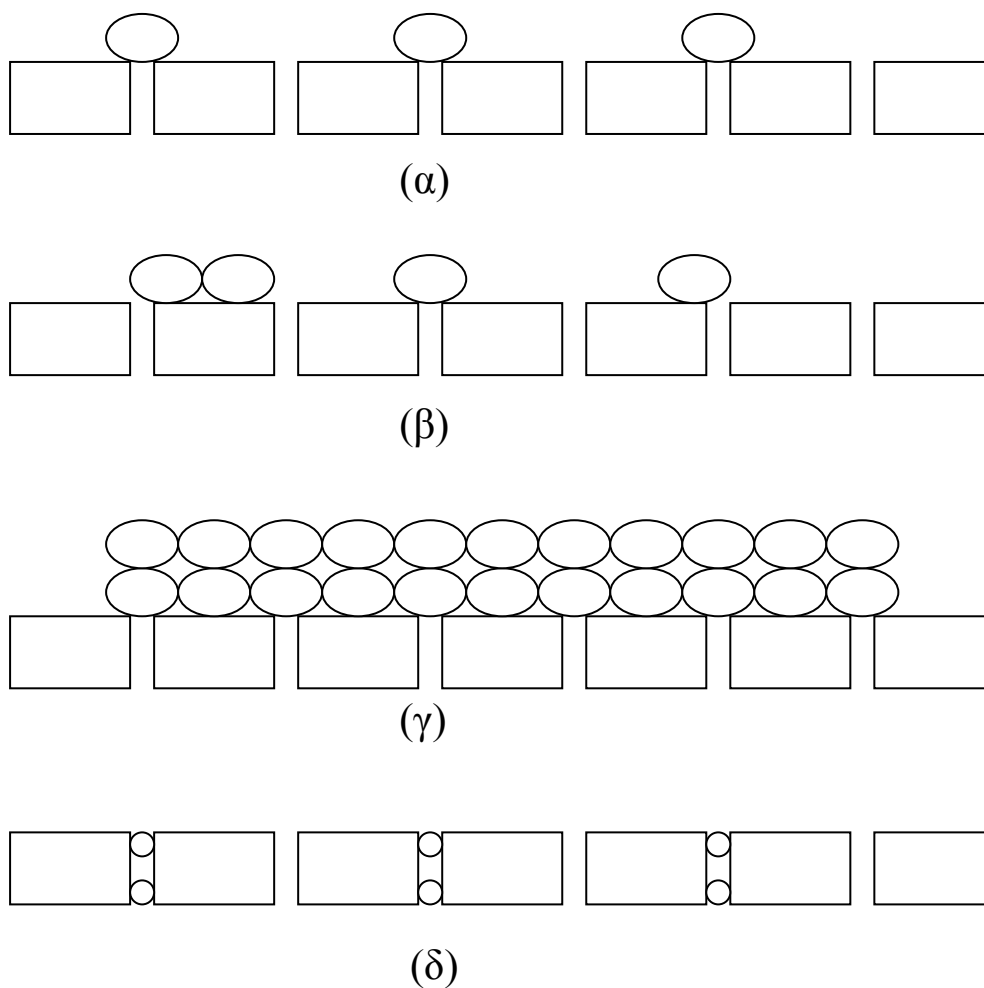
Είναι η πτώση της ροής με το πέρασμα του χρόνου όταν όλες οι παράμετροι λειτουργίας όπως η πίεση, η θερμοκρασία, ο ρυθμός ροής και η συγκέντρωση τροφοδοσίας παραμένουν σταθερά.

Η έκταση του φαινομένου εξαρτάται από το είδος του διαχωρισμού διήθησης καθώς και από τον τύπο της χρησιμοποιούμενης μεμβράνης.

Οι ουσίες που προκαλούν το στόμωμα μπορούν να διακριθούν στις εξής 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

Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί στομώματος των μεμβρανών (σχήμα 3), οι οποίοι είναι συνάρτηση του μεγέθους και του σχήματος του στερεού/ διαλυμένης ουσίας σε σχέση με την κατανομή των πόρων της μεμβράνης.



Σχήμα 3: Μηχανισμοί στομώματος(fouling) των μεμβρανών (α) πλήρες μπλοκάρισμα πόρων, (β) μερικό μπλοκάρισμα πόρων, (γ) σχηματισμός στρώματος 'cake', (δ) εσωτερικό μπλοκάρισμα πόρων

Συντελεστής συγκράτησης ή απόρριψης

Αποτελεί μια σχέση συγκεντρώσεων του συστατικού στο υπόλειμμα και στο διήθημα. Δίνεται σαν ποσοστό επί τοις εκατό:

$$R = \left(\frac{C_f - C_p}{C_f} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Όπου

R: Συντελεστής συγκράτησης ή απόρριψης

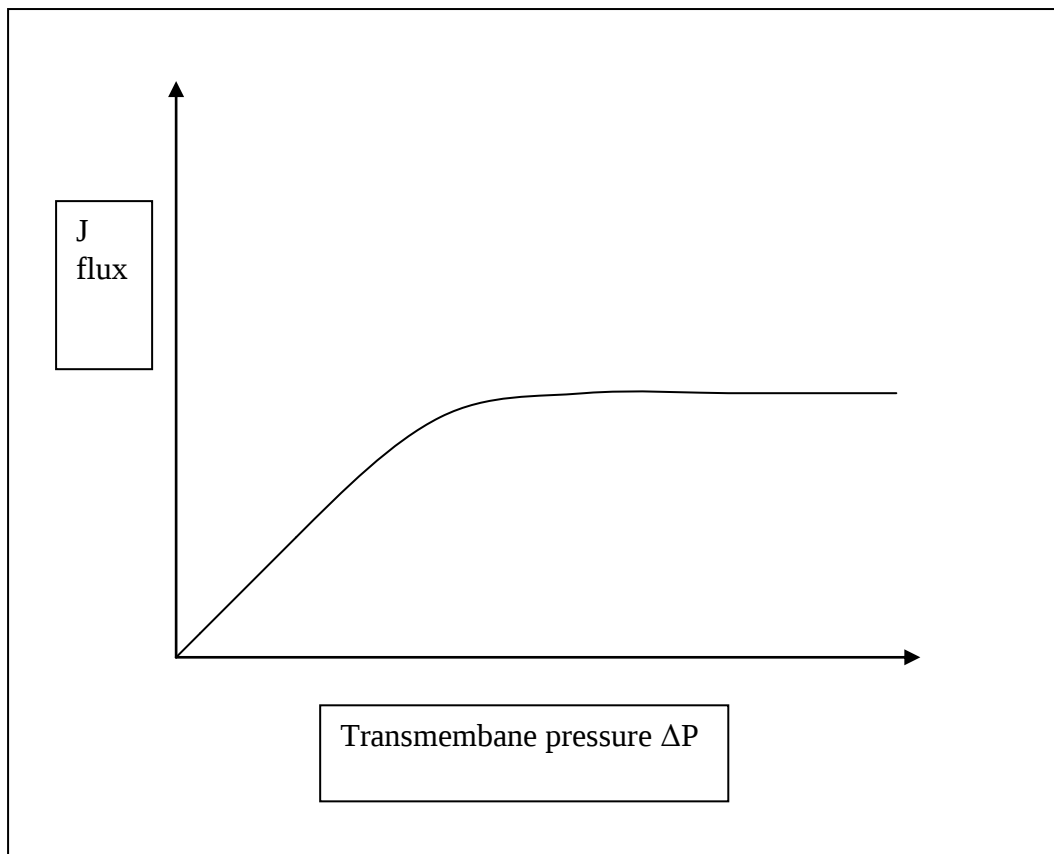
C_f :Συγκέντρωση στην τροφοδοσία

C_p :Συγκέντρωση στο πέρασμα

Διαπερατότητα (permeability)

Η ροή ενός συστατικού μέσα από τη μεμβράνη ανά μονάδα ωθούσας δύναμης. Συμβολίζεται με L [Gekas 1988, Koros et al. 1996].

Πόλωση συγκέντρωσης (concentration polarization)



Σχήμα 4: Διάγραμμα ροής συναρτήσει πίεσης

Η ροή καθαρού νερού μέσω μιας μεμβράνης είναι απευθείας ανάλογη της εφαρμοζόμενης πίεσης σύμφωνα με τη σχέση:

$$J = \frac{\Delta P}{n \cdot R_m} \quad (2)$$

Όπου R_m είναι η υδροδυναμική αντίσταση της μεμβράνης.

Αυξάνοντας την πίεση, η ροή αυξάνεται, αλλά ύστερα από την εφαρμογή μιας συγκεκριμένης πίεσης, η ροή δεν αυξάνεται άλλο όσο κι αν αυξήσουμε την πίεση (σχήμα 4). Η μέγιστη αυτή ροή ονομάζεται οριακή (limitation flux). Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο εξής: καθώς τα μόρια του διαλύτη διαπερνούν τη μεμβράνη, τα μεγαλύτερα μόρια της διαλυμένης ουσίας συσσωρεύονται στην επιφάνεια της μεμβράνης. Με το πέρασμα του χρόνου τα μόρια αυτά σχηματίζουν ένα ‘στρώμα’, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να μην παρατηρείται αύξηση της ροής μετά την αύξηση της εφαρμοζόμενης πίεσης, αλλά απλά να αυξάνεται το πάχος αυτού του στρώματος [Mulder 1995, Field 1996, Zydney 1996d, Cheryan 1998c].

Έννοιες και παράγοντες της Θερμοδυναμικής και της Φυσικοχημείας που επηρεάζουν την απόδοση της μεμβράνης

Η απόδοση της μεμβράνης εκτός από την πίεση, τη συγκέντρωση και το ΡΗ επηρεάζεται και από άλλα μεγέθη μερικά εκ των οποίων αναφέρονται και αναλύονται παρακάτω:

Αγωγιμότητα

Η αγωγιμότητα (conductance) L ορίζεται ως το αντίστροφο της ωμικής αντίστασης:

$$L = 1/R \quad (3)$$

Άλλο σύμβολο που χρησιμοποιείται για την αγωγιμότητα είναι το S .

Μονάδα μέτρησής της είναι το Siemens (S).

Η μοριακή αγωγιμότητα προκύπτει από την αγωγιμότητα κανονικοποιώντας ως προς την ιονική συγκέντρωση:

$$\Lambda = \kappa/C \quad (4)$$

Όπου κ η ειδική αγωγιμότητα.

Σκληρότητα

Η σκληρότητα εκφράζει το σύνολο των διαλυμένων αλάτων ασβεστίου και μαγνησίου και εξαρτάται από τα πετρώματα που έχει περάσει το νερό. Διακρίνεται σε ολική σκληρότητα (general hardness) και σε ανθρακική σκληρότητα (carbonate hardness).

Τα νερά ως προς τη σκληρότητα σε ppm χαρακτηρίζονται:

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

Πίνακας 2: Ταξινόμηση με βάση τη σκληρότητα σε ppm

Μήκος διαλογής Debye

Το μήκος διαλογής Debye (κ^{-1}) είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος που περιγράφει το ιονισμένο περιβάλλον κοντά σε μια φορτισμένη επιφάνεια. Είναι ουσιαστικά η απόσταση από μια φορτισμένη επιφάνεια, στην οποία δεν υπάρχει αλληλεπίδραση ανάμεσα στην επιφάνεια και τους ηλεκτρολύτες της κύριας μάζας του διαλύματος. Το μήκος διαλογής Debye εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες των ηλεκτρολυτών και είναι ανεξάρτητο από τις ιδιότητες της επιφάνειας (Nilsson et al, 2008).

$$\kappa^{-1} = \left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r kT}{\sum_i (z_i e)^2 C} \right)^{1/2} \quad (5)$$

Όπου:

ε_0 : διαπερατότητα στο κενό

ε_r : σχετική διηλεκτρική διαπερατότητα

k: σταθερά Boltzmann

T: θερμοκρασία

z_i : σθένος του ιόντος

e: φορτίο σε ένα ηλεκτρόνιο και

C: η συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη στο διάλυμα

Διαχυτότητα στα υγρά

Ο συντελεστής διαχυτότητας της διαλυμένης ουσίας στο διάλυμα μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση της εξίσωσης Stokes – Einstein (εξίσωση 6), η οποία χρησιμοποιεί ένα μοντέλο άκαμπτης σφαίρας για να περιγράψει τη διαχυτότητα της διαλυμένης ουσίας στο διαλύτη (Nilsson et al,2008).

$$D = \frac{kT}{6\pi\mu R_s} \quad (6)$$

Όπου:

D: διαχυτότητα

μ : δυναμικό ιξώδες του διαλύτη

R_s : ακτίνα της διαλυμένης ουσίας

Διαπερατότητα νερού

Η διαπερατότητα του νερού ορίζεται ως εξής:

$$P_o = \frac{J_w}{(\Delta P - \Delta \pi)} \quad (7)$$

Όπου:

J_w : ροή του νερού

ΔP : διαφορά πίεσης

$\Delta \pi$: διαφορά οσμωτικής πίεσης

Εφαρμογές νανοδιήθησης

Αποσκλήρυνση

Οι μεμβράνες νανοδιήθησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για αστικά όσο και για θαλάσσια δείγματα. Και στις δύο περιπτώσεις το ποσοστό αποσκλήρυνσης είναι σημαντικό.

Αλκοόλες

Σε βιομηχανικό επίπεδο πολλά είδη αλκοολών χρησιμοποιούνται ως διαλυτικά και καθαριστικά. Μετά από εκτεταμένη χρήση επιβάλλεται να καθαρίζονται και σε πολλές περιπτώσεις αυτό γίνεται με τη βοήθεια μεμβρανών νανοδιήθησης.

Διαχωρισμός ελαίων και νερού

Η τεχνολογία μεμβρανών ενδείκνυται να χρησιμοποιείται σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας ελαιωδών αποβλήτων έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ανάκτηση υλικών.

Σε βιομηχανικό επίπεδο

Βιομηχανία ζάχαρης

Οι μεμβράνες νανοδιήθησης χρησιμοποιούνται προκειμένου να συγκεντρώσουν τη ζάχαρη και να τη διαχωρίσουν από προσμίξεις. Η μέθοδος ενφείκνυται όταν ο παραδοσιακός τρόπος διαχωρισμού με τη χρήση θερμότητας κρίνεται ανεπιθύμητος ή ανεπαρκής.

Βιομηχανία υφασμάτων

Στη βιομηχανία υφασμάτων χρησιμοποιείται πλήθος χρωστικών ουσιών οι οποίες δημιουργούν σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα. Με τη βοήθεια μεμβρανών νανοδιήθησης οι χρωστικές μπορούν να διαχωριστούν σε μεγάλο βαθμό από το νερό.

Βιομηχανία γαλακτοκομικών προϊόντων

Η κύρια χρήση της τεχνολογίας πραγματοποιείται στον τομέα της επεξεργασίας του τυρόγαλου, ενός πρωτεϊνικού παραπροϊόντος της τυροκομικής διαδικασίας, προκειμένου να διαχωριστεί μέρος της λακτόζης που περιέχεται σε αυτό. Σε συνδυασμό με την τεχνολογία της υπερδιήθησης και της αντίστροφης όσμωσης επιτυγχάνεται η μετατροπή του ακατέργαστου τυρόγαλου σε χρήσιμο προϊόν.

3. Πειραματικό μέρος

3.1.Υλικά και μέθοδοι

Τροφοδοσία

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, χρησιμοποιήθηκε αφενός νερό βρύσης και αφετέρου δείγματα από την τουριστική περιοχή της Μιλάτου, του νομού Λασιθίου. Σε όλα τα πειράματα, χρησιμοποιήθηκε η ίδια ποσότητα διαλύματος (feed), 2L. Τα δείγματα με κωδικό αριθμό B1, B2 και B3 προέρχονται από 3 διαφορετικά πηγάδια.

Μονάδα DSS LabStack M20

Στη συγκεκριμένη μονάδα χρησιμοποιήσαμε μεμβράνες Νανοδιήθησης, αλλά μπορεί να πραγματοποιηθεί επίσης διήθηση με μεμβράνες Μικροδιήθησης, Υπερδιήθησης και αντίστροφης όσμωσης. Στη μεμβράνη παρέχεται εφαπτομενική τροφοδοσία (cross flow) και συγκρατείται ανάμεσα σε δύο φλάντζες μέσα σε έναν υδραυλικό κύλινδρο.

Επιφάνεια μεμβράνης (m ²)	0,036-0,72
Μέγιστη πίεση εισόδου (bar)	64
Μέγιστη λειτουργική θερμοκρασία (° C)	90
PH	1-14
Βάρος μονάδας (kg)	71
Εφαπτομενική διαδικασία (l/min)	3,5-15
Χωρητικότητα υγρού (l/m ²)	2.75l + 2.14l/m ² επιφάνειας μεμβράνης

Πίνακας 3: Όρια λειτουργίας DSS Labstack M20

Μονάδα DSS LabStack M20



Εικόνα 1: Συσκευή Labstack M20

Στο τμήμα της κυλινδρικής στήλης υπάρχει εναλλάκτης θερμότητας, πιεσόμετρο εισόδου, πιεσόμετρο εξόδου, βαλβίδα εκτόνωσης της πίεσης, συνδετικά τεμάχια εισόδου και εξόδου.

Η αντλία πάκτωσης της μονάδος M20 λειτουργεί χειροκίνητα και ασκεί πίεση ίση με 320bar περιμετρικά του συστήματος των μεμβρανών και των ελασμάτων.



Εικόνα 2: Ογκομετρικό δοχείο και ογκομετρική φιάλη

3.2. Μεμβράνες

Οι μεμβράνες Νανοδιήθησης που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα τόσο η Nft50 όσο και η NF99 είναι επίπεδες, κυκλικές και ημιπερατές. Η ενεργή επιφάνεια της μεμβράνης είναι $0,018\text{m}^2$, αλλά επειδή πάντοτε χρησιμοποιούνται ανά ζεύγη το συνολικό εμβαδόν είναι $0,036\text{m}^2$. Η κάθε πλευρά της είναι διαφορετική. Η μία πλευρά της μεμβράνης είναι πυκνής υφής – το λεγόμενο ‘skin’- ενώ η άλλη πλευρά είναι σπογγώδους υφής και ενισχύει την αντοχή της μεμβράνης. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό των δύο παραπάνω μεμβρανών είναι το πολύ μικρό πάχος (thinfilm) σύνθεσης πολυεστέρα (PE).

3.3. Πειραματικές συνθήκες

Όρια λειτουργίας Nft50

PH	5-6.5
Πίεση (bar)	1-50
Θερμοκρασία (° C)	0-30

Πίνακας 4: Όρια λειτουργίας Nft50

Όρια λειτουργίας NF99

PH	2-10
Πίεση (bar)	1-55
Θερμοκρασία (° C)	0-50

Πίνακας 5: Όρια λειτουργίας NF99

Για κάθε πίεση συλλέγουμε όγκο δείγματος 10ml και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία 3 ή 4 φορές, έτσι ώστε να περιορίσουμε το σφάλμα.

Φροντίζουμε έτσι ώστε η τιμή της θερμοκρασίας να διατηρείται σταθερή.

Εάν η θερμοκρασία αυξηθεί κατά 1°C, η πυκνότητα ροής(flux)-σύμφωνα με προηγούμενες μετρήσεις στο εργαστήριο φαινομένων μεταφοράς και εφαρμοσμένης θερμοδυναμικής-αυξάνεται κατά 1.5%.

3.4. Συντήρηση μεμβρανών

Μετά το τέλος κάθε πειράματος και εφόσον πρόκειται να σταματήσει η λειτουργία της συσκευής για περισσότερες από 24 ώρες, αποθηκεύουμε τη μεμβράνη σε μία ογκομετρική φιάλη όγκου 500ml με 0.25% όξινο θειικό νάτριο (sodium hydrogen sulphite) και PH 3-4. Με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιούμε την ανάπτυξη μικροβίων στην επιφάνεια της μεμβράνης.

Παρακάτω δίνεται ένας πίνακας με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού που πρέπει να έχει το διάλυμα συντήρησης/ αποθήκευσης:

CIP (cleaning in place) water quality table	
Σίδηρο (Fe)	0.05ppm
Μαγγάνιο	0.02ppm
Silicate (SiO ₂)	5ppm
Ολική σκληρότητα	20 d°
Μέγεθος σωματιδίων (particles size)	25 micron
Total Plate Count	1,000 per ml
Coli Count (μικροοργανισμοί)	10 per 100 ml
Θολρότητα (Turbidity)	1 NTU
Αγωγιμότητα (Conductivity)	> 5μS/ cm

Πίνακας 6: Ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού που χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της μεμβράνης [Εγχειρίδιο DssLabStak M20].

3.5. Προσδιορισμός σκληρότητας και αλατότητας

Για τη μέτρηση της αγωγιμότητας χρησιμοποιήθηκε το Conductivity Meter 524 από την Crison Company.

Οι μετρήσεις έγιναν μέσω κατάλληλου ηλεκτροδίου, το οποίο προστατεύεται με λαστιχένιο κάλυμμα και για τη μέτρηση βυθίζεται σε ποτήρι ζέσεως που περιέχει το δείγμα.

Για τη μετατροπή της αγωγιμότητας σε αλατότητα, διαιρούμε την κάθε τιμή με το συντελεστή 1.4.

Για τη μέτρηση της ολικής σκληρότητας χρησιμοποιήθηκε το Total Hardness Test της Aquamerck. Ο αριθμός των σταγόνων του αντιδραστηρίου ισοδυναμεί με τους γερμανικούς βαθμούς. Για τη μετατροπή σε ppm NaCl κάνουμε τους εξής υπολογισμούς:

$$(\text{γερμανικοί βαθμοί}) \cdot (17.86 \text{ ppm}) \cdot (58.5/100)$$

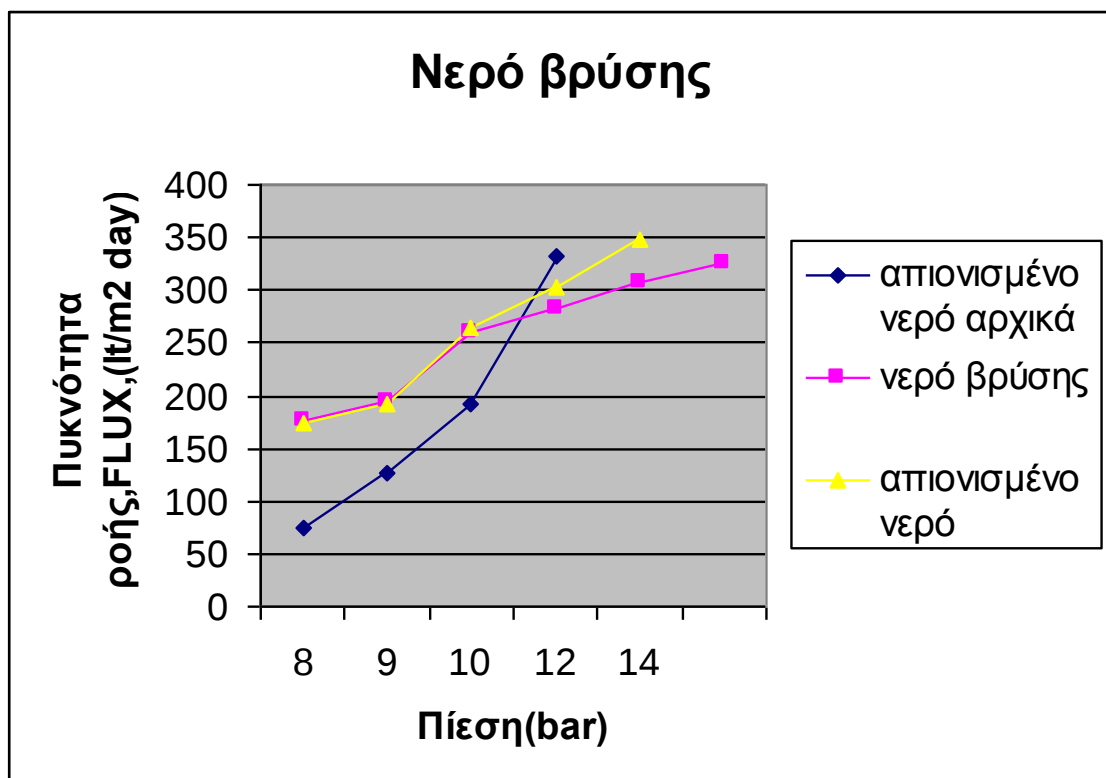
Όπου 58.5g/mol είναι το μοριακό βάρος του NaCl.

Επίσης, σε κάποια δείγματα λόγω της μεγάλης τους σκληρότητας, κάναμε αραιώσεις της τάξης του $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{10}$.

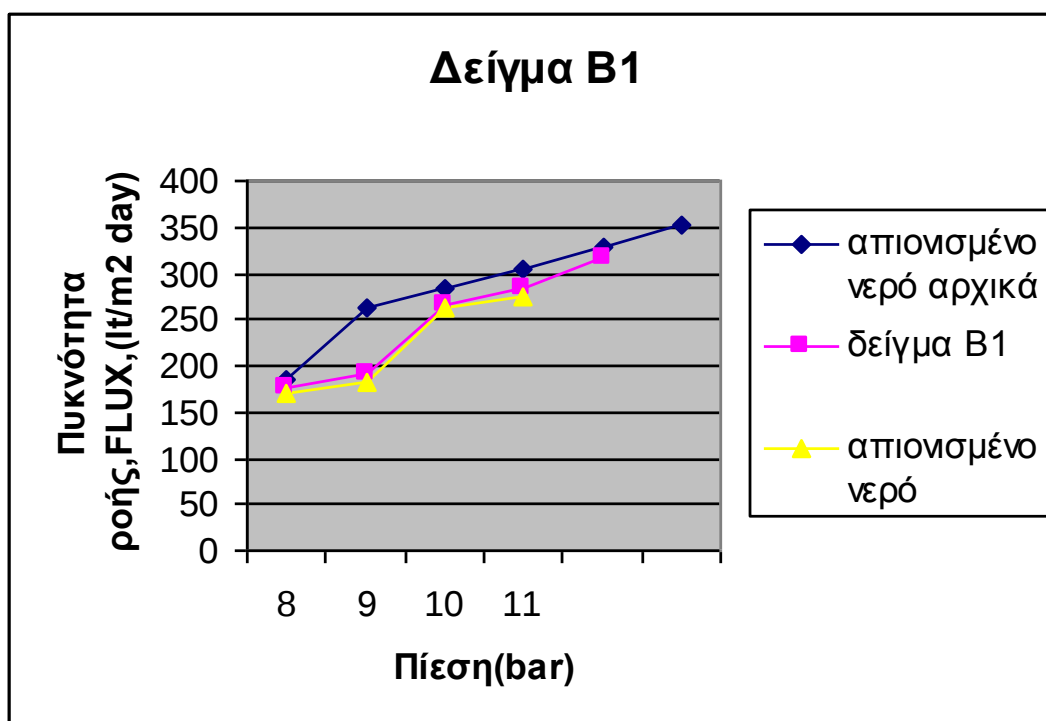
4. Αποτελέσματα

4.1. Ποσοτική απόδοση

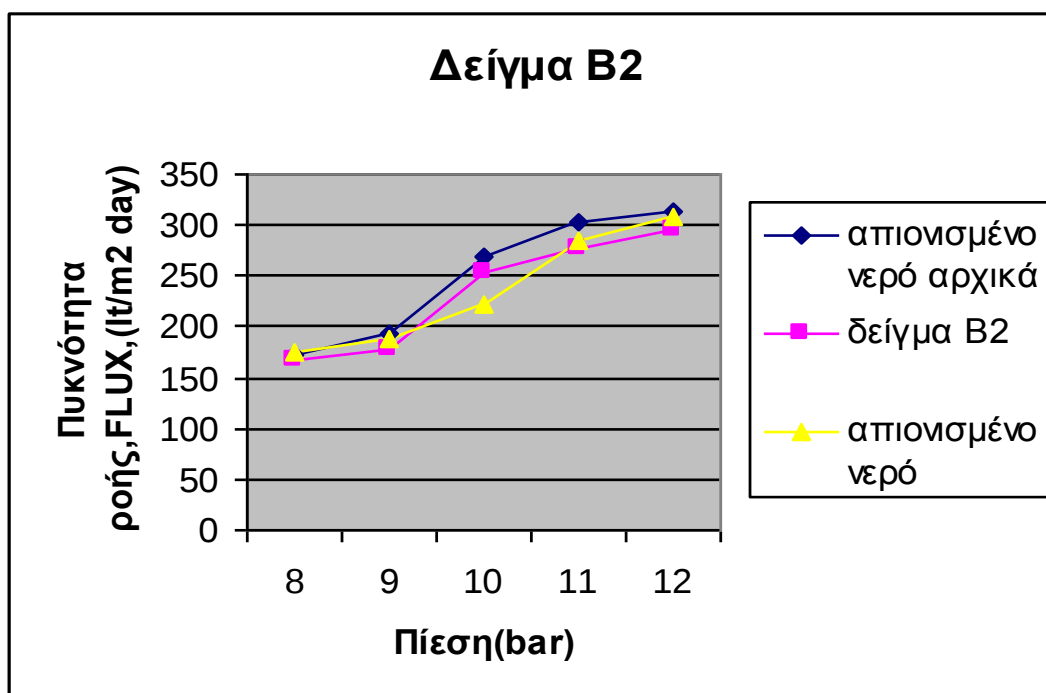
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η πυκνότητα ροής, FLUX, ως προς τις διάφορες πιέσεις. Σε κάθε ένα υπάρχει συγκεντρωτικά η FLUX για απιονισμένο νερό, για το εκάστοτε διάλυμα και για απιονισμένο νερό μετά τη χρήση της μεμβράνης.



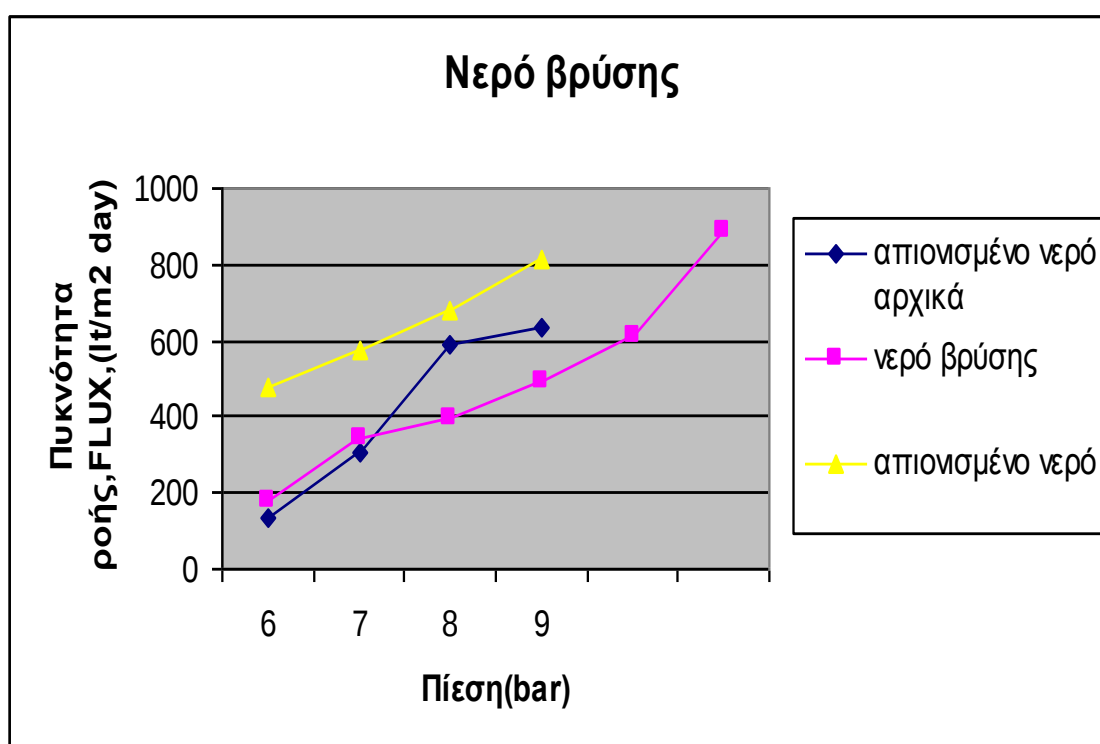
Διάγραμμα 1: Νερό βρύσης σε μεμβράνη Nft50



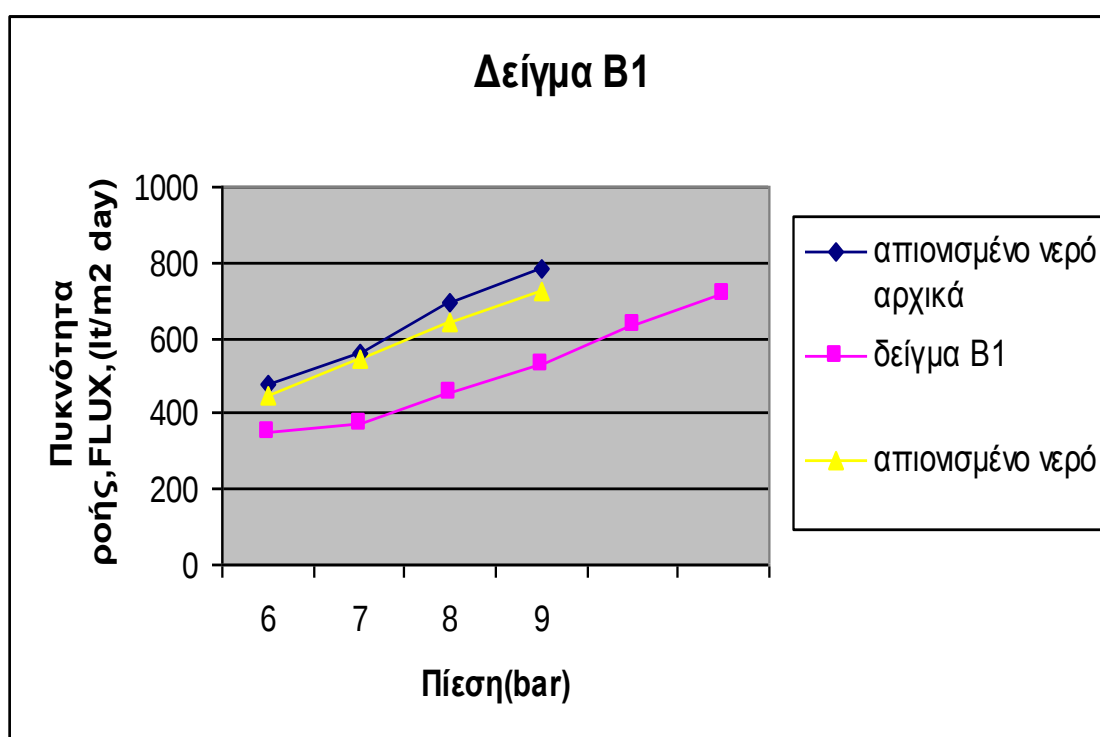
Διάγραμμα 2: Δείγμα B1 σε μεμβράνη Nft50



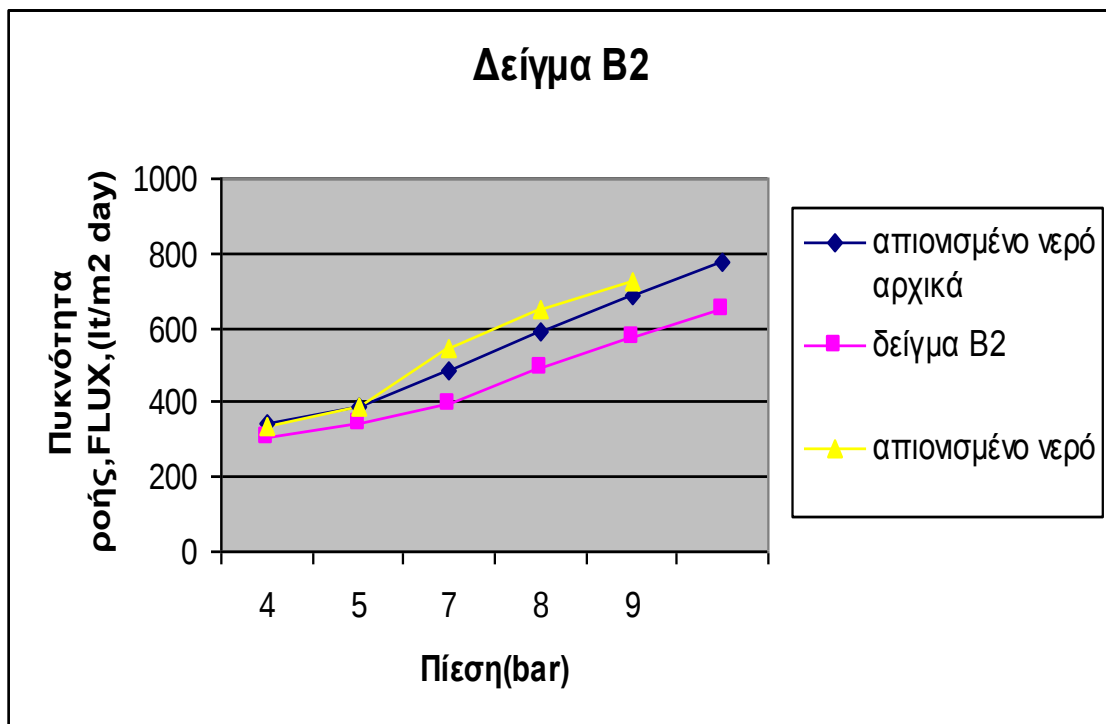
Διάγραμμα 3: Δείγμα B2 σε μεμβράνη Nft50



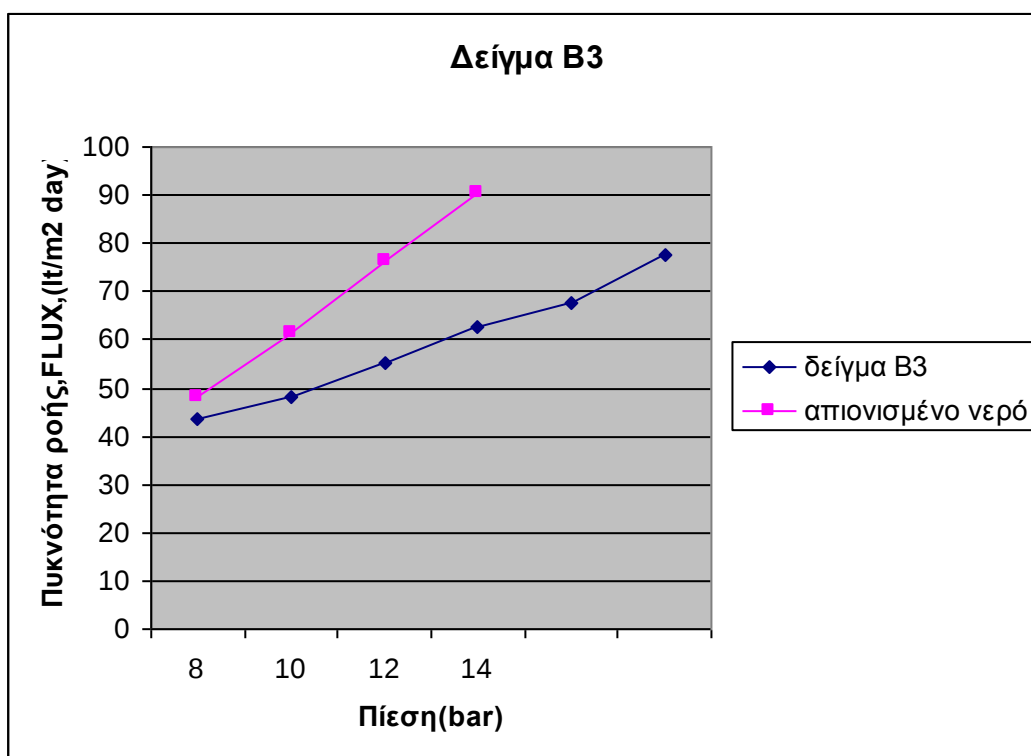
Διάγραμμα 4: Νερό βρύσης σε μεμβράνη NF99



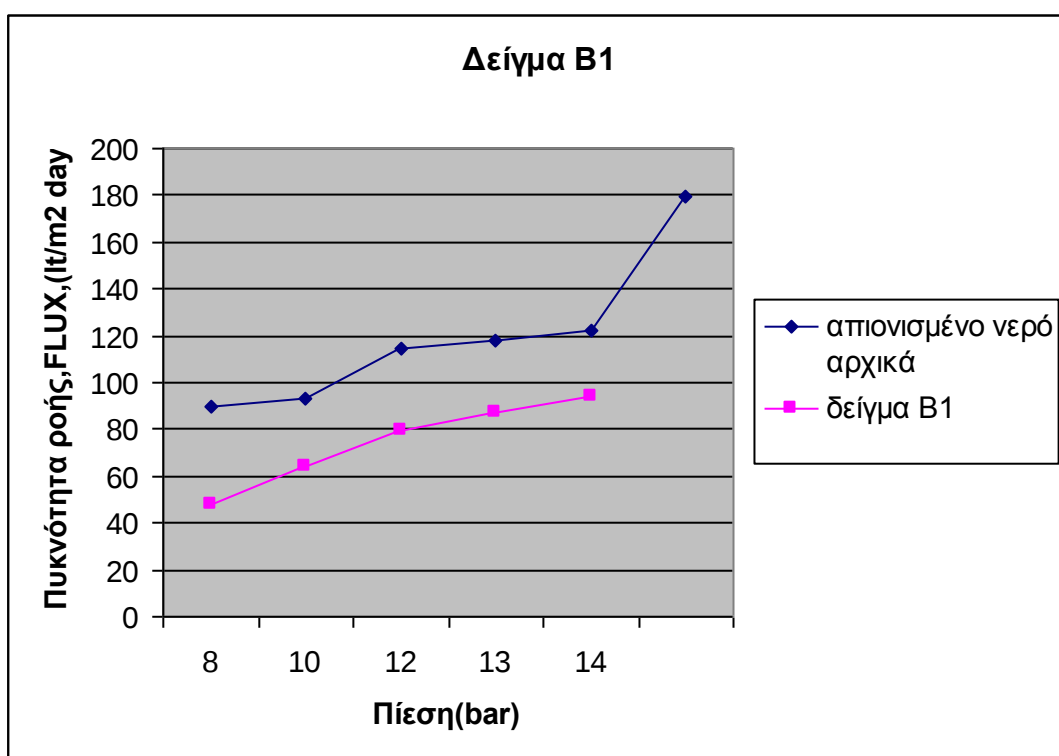
Διάγραμμα 5: Δείγμα B1 σε μεμβράνη NF99



Διάγραμμα 6: Δείγμα B2 σε μεμβράνη NF99



Διάγραμμα 7: Δείγμα B3 σε μεμβράνη Nft50



Διάγραμμα 8: Δείγμα B1 επαναληπτικό σε μεμβράνη Nft50

4.2.Ποιοτική απόδοση

Αρχικά οι μεμβράνες δοκιμάστηκαν με σκληρό νερό της βρύσης. Τα αποτελέσματα ως προς τον συντελεστή συγκράτησης είναι τα εξής:

Μεμβράνη Nft50

Μείωση σκληρότητας

Αρχική τιμή – τελική τιμή = $135.8 - 31.3 = 104.5 \text{ ppm NaCl}$

Συντελεστής απομάκρυνσης σκληρότητας:

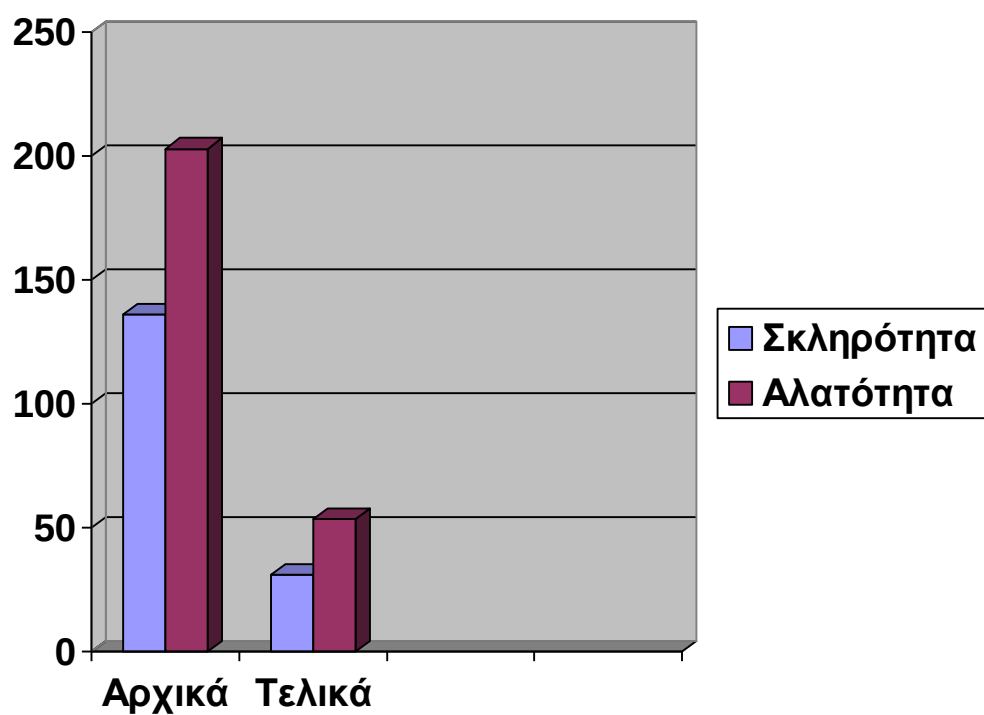
$$1 - (31.3/135.8) = 0.77 \text{ ή } 77\%$$

Μείωση ολικής αλατότητας

Αρχική τιμή – τελική τιμή = $203 - 53.4 = 149.6 \text{ ppm}$

Συντελεστής απομάκρυνσης αλατότητας :

$$1 - (53.4/203) = 0.74 \text{ ή } 74\% \text{ (διάγραμμα 9)}$$



Διάγραμμα 9: Μείωση σκληρότητας και αλατότητας νερού βρύσης από τη μεμβράνη Nft50.

Μεμβράνη NF99

Μείωση σκληρότητας

$$\text{Αρχική τιμή} - \text{τελική τιμή} = 104.4 - 20.9 = 83.5 \text{ ppm}$$

Συντελεστής απομάκρυνσης σκληρότητας:

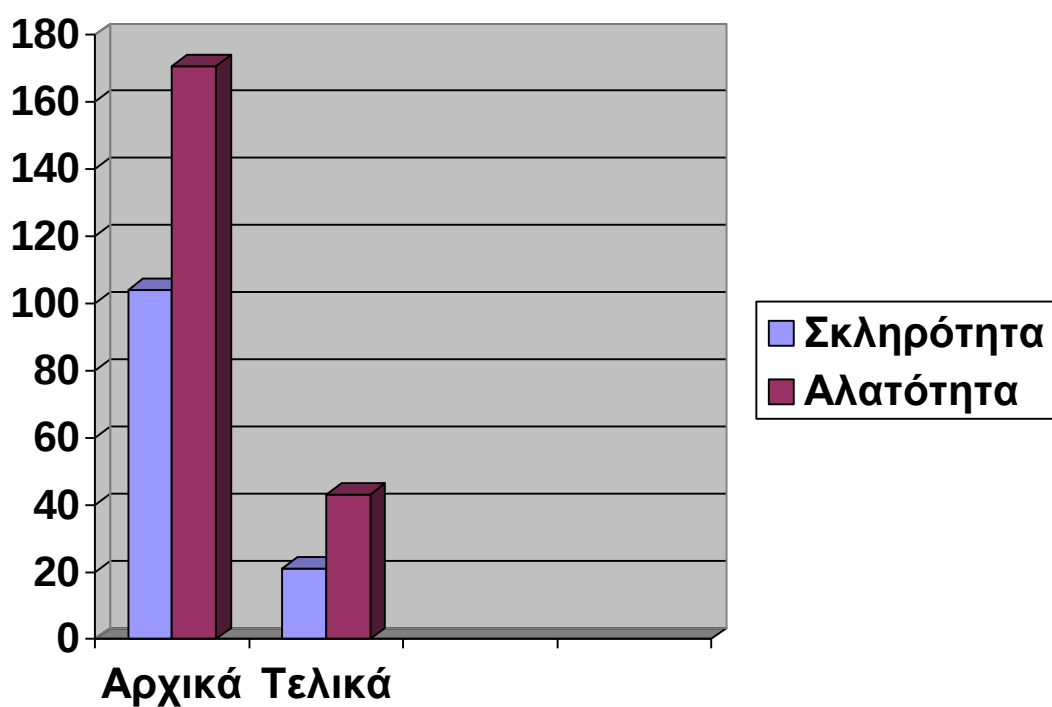
$$1 - (20.9/104.4) = 0.80 \text{ ή } 80\%$$

Μείωση ολικής αλατότητας

$$\text{Αρχική τιμή} - \text{τελική τιμή} = 170.7 - 43 = 127.7 \text{ ppm}$$

Συντελεστής απομάκρυνσης αλατότητας :

$$1 - (43/170.7) = 0.75 \text{ ή } 75\% \text{ (διάγραμμα 10)}$$



Διάγραμμα 10: Μείωση σκληρότητας και αλατότητας νερού βρύσης από τη μεμβράνη NF99.

Απόδοση στο δείγμα B1

Μεμβράνη Nft50

Μείωση σκληρότητας

$$\text{Αρχική τιμή} - \text{τελική τιμή} = 470 - 135.8 = 334.2\text{ppm}$$

Συντελεστής απομάκρυνσης σκληρότητας:

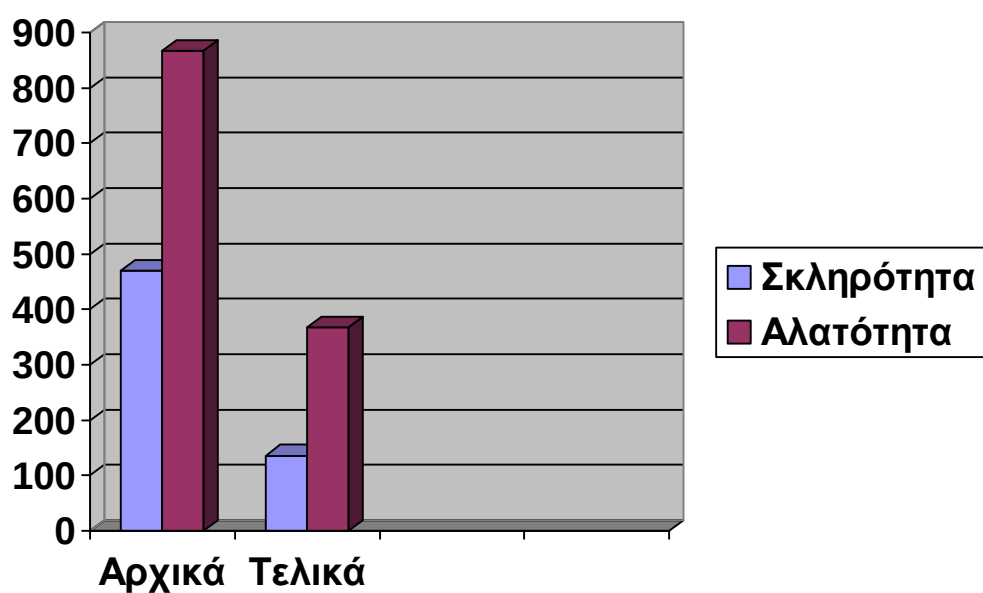
$$1 - (135.8/470) = 0.72 \text{ ή } 72\%$$

Μείωση ολικής αλατότητας

$$\text{Αρχική τιμή} - \text{τελική τιμή} = 867.8 - 367.8 = 500\text{ppm}$$

Συντελεστής απομάκρυνσης αλατότητας :

$$1 - (367.8/867.8) = 0.58 \text{ ή } 58\% \text{ (διάγραμμα 11)}$$



Διάγραμμα 11: Μείωση σκληρότητας και αλατότητας του δείγματος B1 από τη μεμβράνη Nft50.

Μεμβράνη NF99

Μείωση σκληρότητας

$$\text{Αρχική τιμή} - \text{τελική τιμή} = 386 - 104.5 = 281.5\text{ppm}$$

Συντελεστής απομάκρυνσης σκληρότητας:

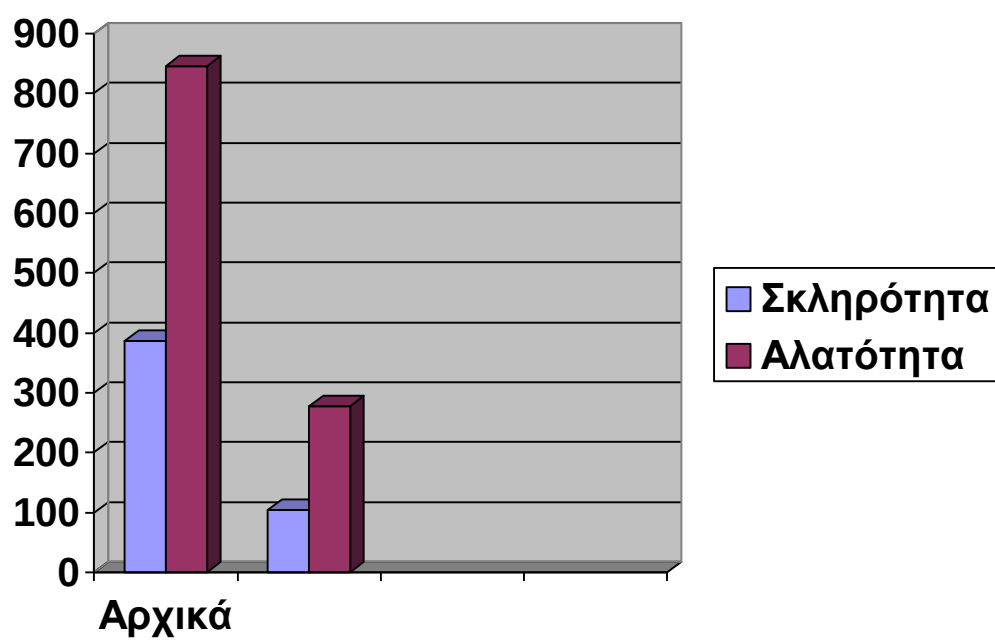
$$1 - (104.5/386) = 0.73 \text{ ή } 73\%$$

Μείωση ολικής αλατότητας

$$\text{Αρχική τιμή} - \text{τελική τιμή} = 845.7 - 278 = 567.7\text{ppm}$$

Συντελεστής απομάκρυνσης αλατότητας :

$$1 - (278/845.7) = 0.67 \text{ ή } 67\% \text{ (διάγραμμα 12)}$$



Διάγραμμα 12: Μείωση σκληρότητας και αλατότητας του δείγματος B1 από τη μεμβράνη NF99.

Επαναληπτικό πείραμα

Μεμβράνη Nft50

Μείωση σκληρότητας

$$\text{Αρχική τιμή} - \text{τελική τιμή} = 313 - 62.7 = 250.3\text{rpm}$$

Συντελεστής απομάκρυνσης σκληρότητας:

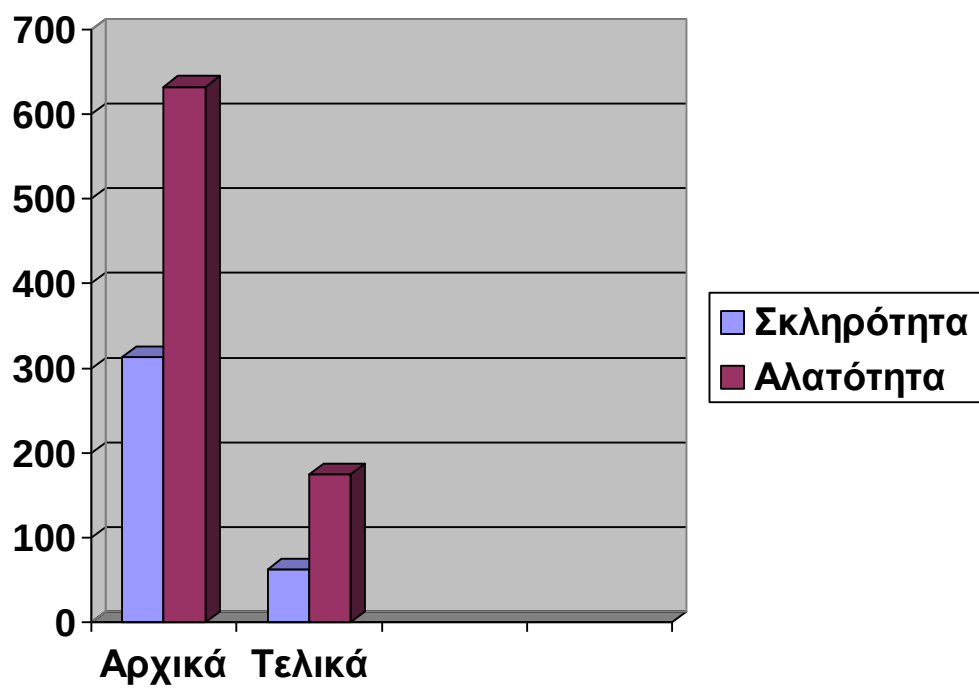
$$1 - (62.7/313) = 0.80 \text{ ή } 80\%$$

Μείωση ολικής αλατότητας

$$\text{Αρχική τιμή} - \text{τελική τιμή} = 632 - 175 = 457\text{rpm}$$

Συντελεστής απομάκρυνσης αλατότητας :

$$1 - (175/632) = 0.72 \text{ ή } 72\% \text{ (διάγραμμα 13)}$$



Διάγραμμα 13: Μείωση σκληρότητας και αλατότητας του δείγματος B1 επαναληπτικό από τη μεμβράνη Nft50.

Απόδοση στο δείγμα B2

Μεμβράνη Nft50

Μείωση σκληρότητας

$$\text{Αρχική τιμή} - \text{τελική τιμή} = 731.4 - 219.4 = 512\text{ppm}$$

Συντελεστής απομάκρυνσης σκληρότητας:

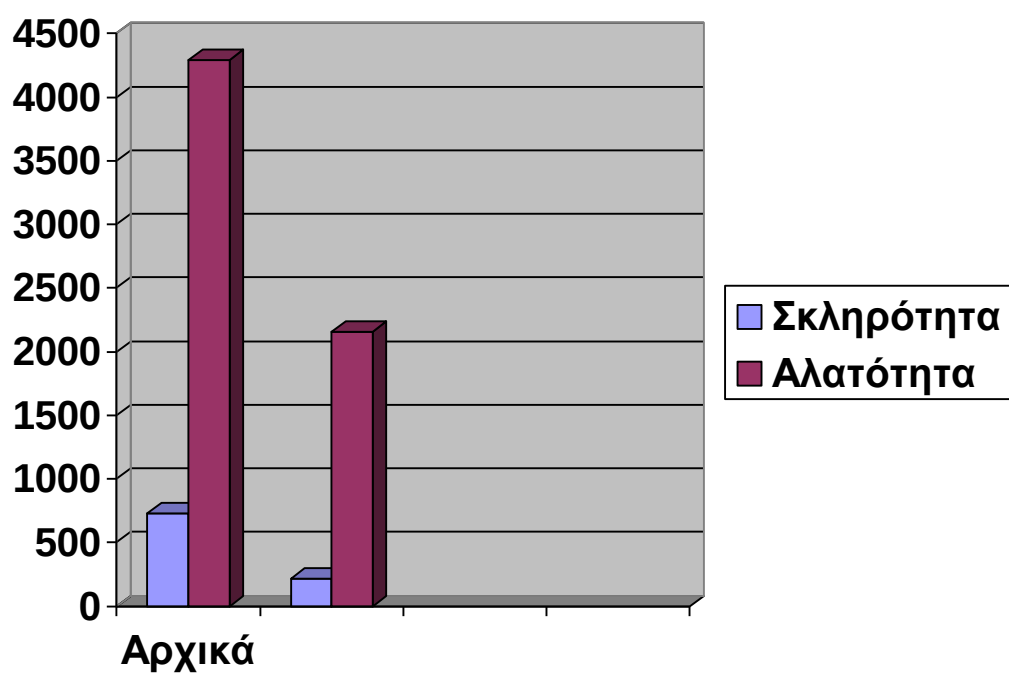
$$1 - (219.4/731.4) = 0.70 \text{ ή } 70\%$$

Μείωση ολικής αλατότητας

$$\text{Αρχική τιμή} - \text{τελική τιμή} = 4291 - 2155 = 2136\text{ppm}$$

Συντελεστής απομάκρυνσης αλατότητας :

$$1 - (2155/4291) = 0.50 \text{ ή } 50\% \text{ (διάγραμμα 14)}$$



Διάγραμμα 14: Μείωση σκληρότητας και αλατότητας του δείγματος B2

από τη μεμβράνη Nft50.

Μεμβράνη NF99

Μείωση σκληρότητας

$$\text{Αρχική τιμή} - \text{τελική τιμή} = 626.9 - 146.3 = 480.6 \text{ ppm}$$

Συντελεστής απομάκρυνσης σκληρότητας:

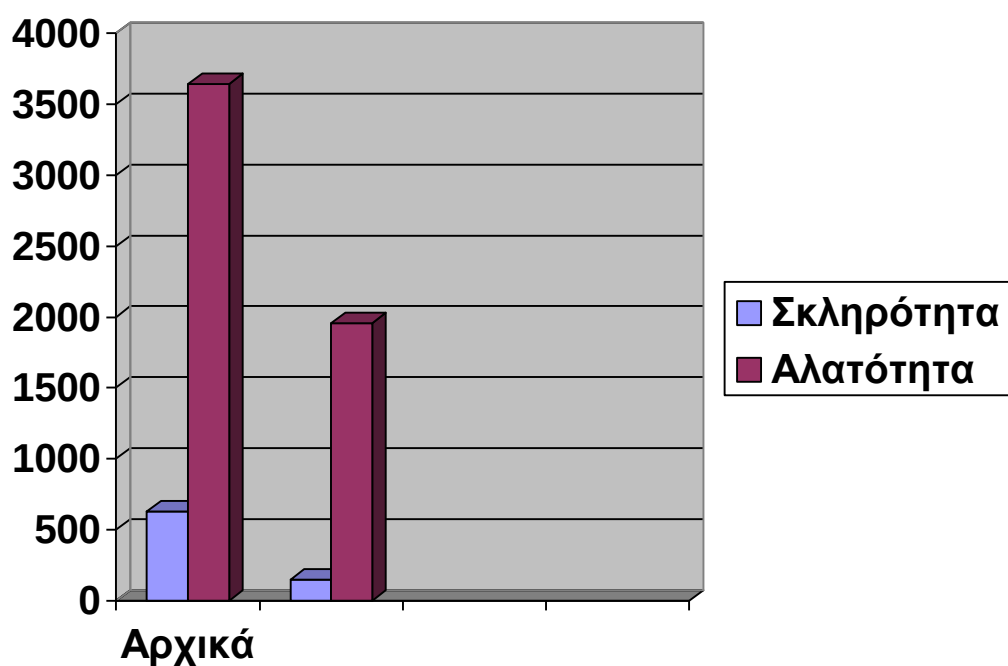
$$1 - (146.3/626.9) = 0.77 \text{ ή } 77\%$$

Μείωση ολικής αλατότητας

$$\text{Αρχική τιμή} - \text{τελική τιμή} = 3643 - 1957 = 1686 \text{ ppm}$$

Συντελεστής απομάκρυνσης αλατότητας :

$$1 - (1957/3643) = 0.46 \text{ ή } 46\% \text{ (διάγραμμα 15)}$$



Διάγραμμα 15: Μείωση σκληρότητας και αλατότητας του δείγματος B2 από τη μεμβράνη NF99.

Απόδοση στο δείγμα B3

Μεμβράνη Nft50

Μείωση σκληρότητας

$$\text{Αρχική τιμή} - \text{τελική τιμή} = 1044.8 - 292 = 752.8\text{ppm}$$

Συντελεστής απομάκρυνσης σκληρότητας:

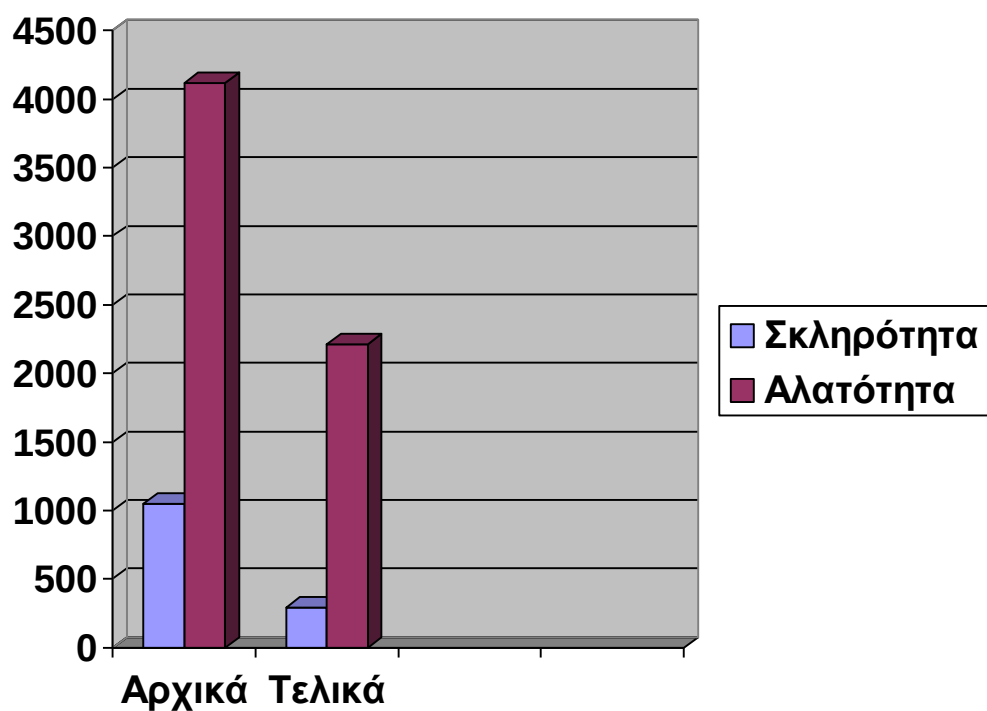
$$1 - (292/1044.8) = 0.72 \text{ ή } 72\%$$

Μείωση ολικής αλατότητας

$$\text{Αρχική τιμή} - \text{τελική τιμή} = 4121 - 2214 = 1907\text{ppm}$$

Συντελεστής απομάκρυνσης αλατότητας :

$$1 - (2214/4121) = 0.46 \text{ ή } 46\% \text{ (διάγραμμα 16)}$$

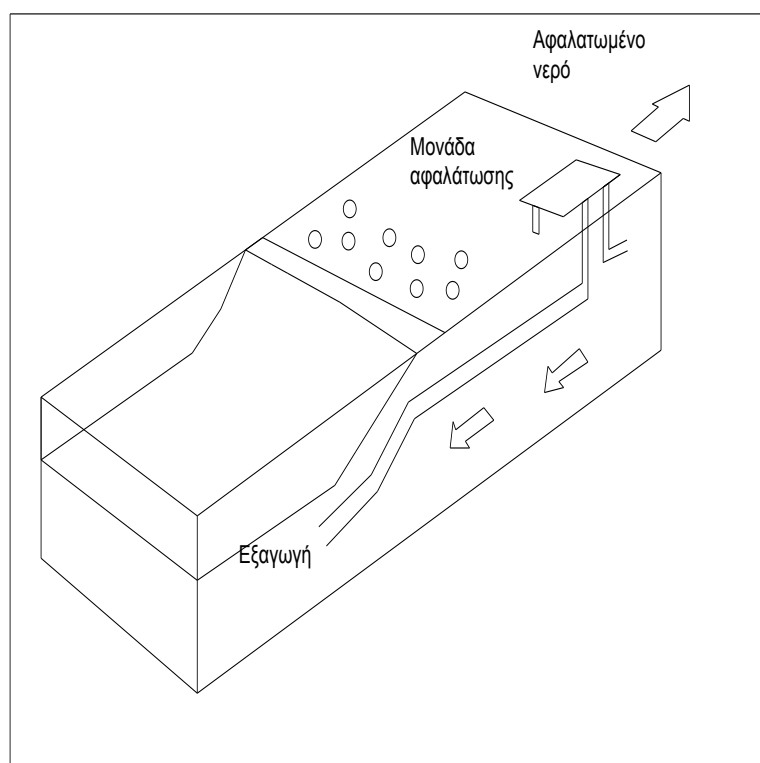


Διάγραμμα 16: Μείωση σκληρότητας και αλατότητας του δείγματος B3 από τη μεμβράνη Nft50.

5. Εφαρμογές

5.1. Αφαλάτωση νερού σε τουριστικές μονάδες

Πολλές μεγάλες ξενοδοχειακές μονάδες σε τουριστικές περιοχές όπως η Κρήτη κι άλλα νησιά, τύπου resort hotels, αντιμετωπίζουν προβλήματα επάρκειας νερού, ιδίως στις περιόδους αιχμής. Επειδή αυτές οι μεγάλες μονάδες, όπως αυτή της Μιλάτου που απετέλεσε την αφορμή εκπόνησης της παρούσας εργασίας, είναι εγκατεστημένες σε περιοχές απόμακρες από τα αστικά κέντρα, έχουν πρόσβαση σε πηγές νερού ή τη θάλασσα ή τα πηγάδια που περιέχουν υφάλμυρο νερό. Αφαλάτωση θαλασσίου νερού επιτυγχάνεται με αντίστροφη ώσμωση, η οποία είναι μια ήδη εμπορικοποιημένη μέθοδος, λόγω όμως της μεγάλης τιμής ωσμωτικής πίεσης του θαλασσίου νερού και της εμφάνισης στο προσκήνιο της Νανοδιήθησης κατάλληλης για εφαρμογή σε υφάλμυρα νερά εξετάσαμε τη δυνατότητα εφαρμογής αυτής και προτείνουμε κατόπιν των θετικών αποτελεσμάτων των πειραμάτων μας την παρακάτω μονάδα:

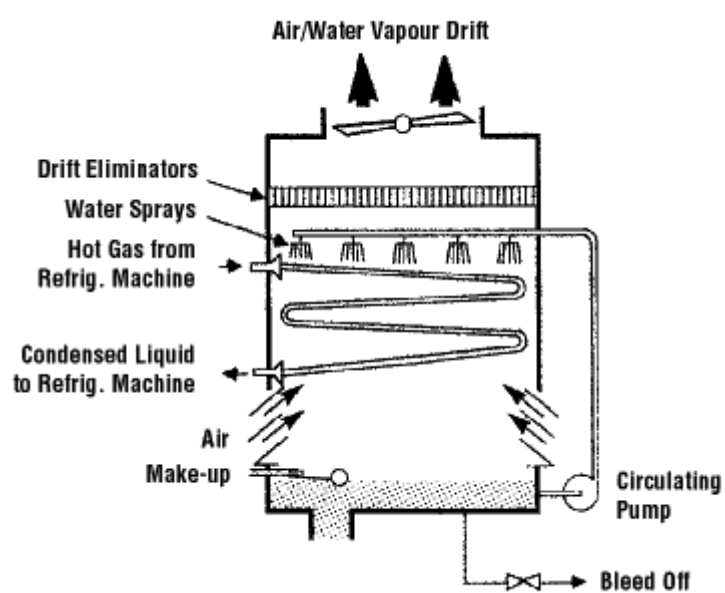


Σχήμα 5: Σχηματικό διάγραμμα μιας μονάδας αφαλάτωσης

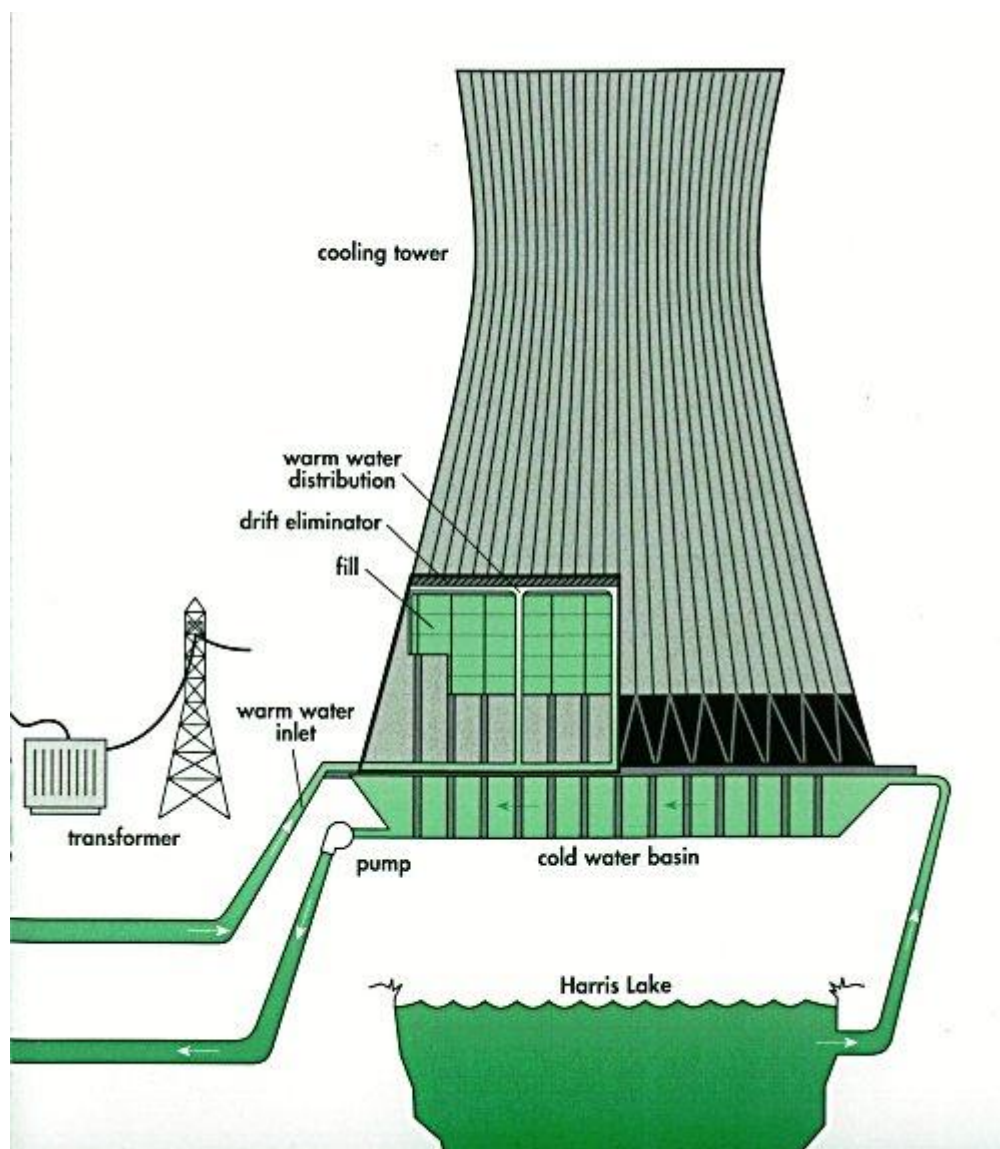
5.2 Νερό ψύξης

Είναι γνωστό ότι η ΔΕΗ χρησιμοποιεί τεράστιες ποσότητες νερού για την ψύξη των μονάδων της. Η ανεύρεση αυτών των τεράστιων ποσοτήτων δεν είναι πάντα ευχερής ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μονάδες που πρόκειται να εγκατασταθούν σε νησιά με το γνωστό τους πρόβλημα στενότητας των υδατικών πόρων. Μια προφανής για μας λύση είναι τα πηγάδια υφάλμυρων νερών κι η αποσκλήρυνση/αφαλάτωσή τους μέσω Νανοδιήθησης.

Το πρόβλημα του να υπάρχει μια στοιχειωδώς καλή ποιότητα του νερού, δηλαδή μειωμένη περιεκτικότητα αλάτων, σκληρότητας και μη, που θα χρησιμοποιηθεί για σκοπούς ψύξης έχει διττό χαρακτήρα , αφενός η πρόληψη αποθέσεων στις σωληνώσεις και στα άλλα μηχανήματα, αλλά κι η πρόληψη να έχουμε σοβαρό πρόβλημα στη διάθεση των νερών αυτών μετά την ψύξη. Σχετικά με το δεύτερο θέμα κατά καιρούς ακούγεται η επιβολή προστίμων στη ΔΕΗ για παράνομη διάθεση λυμάτων από τους πύργους ψύξης σε ποτάμια ή λίμνες.



Εικόνα 3: Αρχή λειτουργίας πύργου ψύξης
(<http://www.nucleartourist.com/images/ct-natur.jpg>)



Εικόνα 4: Πύργος ψύξης

(<http://www.nucleartourist.com/images/ct-natur.jpg>)

6. Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι οι τιμές της πυκνότητας ροής, Flux, είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικές. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μεμβράνες νανοδιήθησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πιέσεις έως 25 και 30 bar.

Εργαστηριακά αυτό δεν μπόρεσε να επιτευχθεί εξαιτίας πρακτικών δυσχερειών της μονάδας DSS LabStack M20. Επίσης με την αύξηση της πίεσης άνω των 15 bar αναμένεται να εμφανιστεί το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης (fouling). Αν και για υφάλμυρα νερά, το φαινόμενο δεν είναι έντονο.

Όσον αφορά την αποσκλήρυνση, παρατηρούμε ότι οι τιμές των συντελεστών συγκράτησης/ απόρριψης είναι υψηλές, ακόμη και για τα σκληρότερα δείγματα.

Εφαρμογή της νανοδιήθησης στην αφαλάτωση νερού τουριστικών μονάδων καθώς και για νερό ψύξης απαιτεί την εκπόνηση τεχνοοικονομικής μελέτης έτσι ώστε να διαπιστωθεί εάν η συγκεκριμένη λύση έχει μικρό κόστος επένδυσης και λειτουργίας.

7.Βιβλιογραφία

- Γκέκας Β., Μπαλτά Κ., *Βιομηχανία τροφίμων και περιβάλλον*, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2005
- Γκέκας Β., Πρωιμάκη Σπ., *Φυσικοχημικές διεργασίες διαχωρισμού για μηχανικούς περιβάλλοντος*, Εκδόσεις Τζιόλα
- Κλωνιζάκη Μ., *Επίδραση της συγκέντρωσης και του ΡΗ υδατικών διαλυμάτων αλάτων στην απόδοση μεμβρανών νανοδιήθησης*, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης
- Λάζος Ε., Λέρης Α., Τότσιου Γ. και Ωραιοπούλου Β., *Νέες Τεχνολογίες στη Βιομηχανία Τροφίμων και Δυνατότητες Εφαρμογής των στην Ελλάδα*, Τεχνικό Επιμελητήριο της Ελλάδος, Αθήνα 1989.
- Παπαθανάσης Ηλ., (2009) ,Αφαλάτωση – πρακτική λύση στο πρόβλημα της λειψυδρίας , *Περισκόπιο της επιστήμης* ,τεύχος 337 ,σελ. 34 – 49
- Τζωράκη Ουρ., (2000) ,*Διαχωρισμός και ανάκτηση φαινολικών ενώσεων στον κασσίγαρο* , Μεταπτυχιακή εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης
- Τσιφής Δ.,(2008) , *Εφαρμογή νανοδιήθησης στην επεξεργασία αποβλήτων ελαιουργείων* ,Διπλωματική εργασία ,Πολυτεχνείο Κρήτης
- American Water Works Association , *Reverse osmosis and nanofiltration* ,manual of water supply practices ,first edition ,1999

- Gekas V., Tragardh G. and Hallstrom B., '*Ultrafiltration Membrane Performance Fundamentals*', Lund University and the Swedish Foundation for Membrane Technology, Lund 1993

Ιστοσελίδες

- <http://www.nucleartourist.com/images/ct-natur.jpg>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Flux>
- <http://www.sciencedirect.com/>
- <http://www.epa.gov/>
- http://www.tsamisaquarium.gr/Selides/Themata/GH_PH.htm
- <http://www.lenntech.com/applications/ultrapure/conductivity/water-conductivity.htm>
- http://www.kochmembrane.com/sep_nf.html

Παραρτήματα

1^ο Πείραμα

Απιονισμένο νερό

P = 12bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
6.35	27
5.42	27
5	28
4.53	28

P = 13bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
3.32	28
3.12	28.5
3.09	28
3.10	28

P = 14bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
2.17	28.5
2.12	28.5
2.06	28.5
2.01	28.5

P = 15bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.23	29
1.21	29
1.20	29
1.18	29

Νερό βρύσης

P = 9bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
2.30	26
2.28	26
2.27	26
2.27	26

P = 10bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
2.05	27
2.03	27
2.11	27
2.09	27

P = 11bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.55	27
1.55	27
1.53	27
1.53	27

P = 12bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.43	28
1.44	28
1.42	28
1.42	28

P = 13bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.34	28
1.29	28
1.29	28
1.30	28.5

P = 14bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.24	29
1.23	29
1.23	29
1.23	29

Απιονισμένο νερό

P = 8bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
2.30	29
2.31	29
2.29	29
2.28	29.5

P = 9bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
2.08	29.5
2.07	29.5
2.09	29.5
2.08	29.5

P = 10bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.55	30
1.52	30
1.49	30
1.50	30

P = 12bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.32	30
1.33	30
1.30	30
1.32	30

P = 14bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.17	30.5
1.14	30.5
1.15	30.5
1.15	30.5

Πριν

Σκληρότητα: 11 γερμανικοί βαθμοί

Ηλεκτρική αγωγιμότητα: 285μS

T = 21.3°C

Μετά

Σκληρότητα: 3 γερμανικοί βαθμοί

Ηλεκτρική αγωγιμότητα: 74.8μS

T = 30°C

2^ο Πείραμα

Απιονισμένο νερό

P = 6bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
3.33	21
3.21	22
3.08	22
2.53	22

P = 7bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.45	22
1.37	23
1.26	23
1.20	23

P = 8bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
42	24
40	24
39	24
41	24

P = 9bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
38	24
39	24
38	24
38	24

Νερό βρύσης

P = 3bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
2.30	22
2.21	23
2.20	23.5

P = 5bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.18	25
1.18	25
1.17	25
1.17	25

P = 6bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1	25.5
1.01	25.5
1.01	25.5
1.01	25.5

P = 7bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
49	26
49	26
48	26
48	26

P = 9bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
39	26
39	26.5
39	26.5
38	26.5

P = 10bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
27	27
27	27
27	27
26	27

Απιονισμένο νερό

P = 6bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
50	26.5
50	26.5
50	26.5
50	26.5

P = 7bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
43	27
43	27
41	27
41	27

P = 8bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
36	27
36	27
35	27.5
35	27.5

P = 9bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
30	27.5
30	28
29	28
29	28

Πριν

Σκληρότητα: 8 γερμανικοί βαθμοί

Ηλεκτρική αγωγιμότητα: 239μS

T = 18.2°C

Μετά

Σκληρότητα: 2 γερμανικοί βαθμοί

Ηλεκτρική αγωγιμότητα: 60.4μS

T = 25.6°C

3^ο Πείραμα

Δείγμα: B1

Μεμβράνη: Nft50

Απιονισμένο νερό

P = 9bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
2.17	24
2.15	24
2.16	24
2.14	24.5

P = 10bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.57	25
1.56	25
1.52	25
1.49	25.5

P = 11bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.42	26
1.41	26
1.40	26
1.39	26

P = 12bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.33	26.5
1.32	26.5
1.30	26.5
1.31	26.5

P = 13bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.23	27
1.22	27
1.21	27
1.20	27

P = 14bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.15	27.5
1.14	27.5
1.12	28
1.13	28

B1

P = 8bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
2.34	27
2.31	27.5
2.25	27.5
2.23	28
2.22	28

P = 9bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
2.10	28
2.08	28
2.08	28.5
2.08	28.5

P = 10bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.52	29
1.50	29
1.52	29
1.50	29

P = 11bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.42	29
1.41	29
1.41	29
1.40	29.5

P = 12bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.28	29.5
1.27	30
1.26	30
1.26	30

Απιονισμένο νερό

P = 8bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
2.44	23
2.36	23.5
2.35	23.5
2.33	24

P = 9bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
2.22	24
2.18	24
2.18	24.5
2.18	25

P = 10bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.55	25.5
1.54	25.5
1.53	25.5
1.53	26

P = 11bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.45	26
1.49	26
1.45	26.5
1.45	26.5

Πριν

Αραίωση 1/10

Σκληρότητα: 40 γερμανικοί βαθμοί

Αγωγιμότητα: 1215μS

T = 14.3°C

Μετά

Αραίωση 1/2

Σκληρότητα: 10 γερμανικοί βαθμοί

Αγωγιμότητα: 515μS

T = 24.4°C

4° Πείραμα

Δείγμα: B1

Μεμβράνη: NF99

Απιονισμένο νερό

P = 6bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
50	26
50	26
51	26
49	26

P = 7bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
43	26
43	26
43	26
43	26

P = 8bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
35	26
35	26
34	26
34	26

P = 9bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
30	26
31	26
30	26
31	26

B1

P = 4bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.13	26
1.14	26
1.14	26
1.15	26

P = 5bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.08	26
1.08	26
1.08	26
1.08	26

P = 6bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
53	25.5
53	25.5
53	25.5
53	25.5

P = 7bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
45	26
45	26
45	26
45	26

P = 8bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
38	26
38	26
38	26
38	26

P = 9bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
34	26
34	26
33	26
33	26

Απιονισμένο νερό

P = 6bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
54	25.5
54	25.5
53	26
53	26

P = 7bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
44	26
43	26
44	26
44	26

P = 8bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
38	26
37	26
37	26
38	26

P = 9bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
33	26
33	26
32	26
33	26

Πριν

Αραίωση 1/10

Σκληρότητα: 37 γερμανικοί βαθμοί

Αγωγιμότητα: 1184μS

T = 11°C

Μετά

Αραίωση 1/2

Σκληρότητα: 7 γερμανικοί βαθμοί

Αγωγιμότητα: 390μS

T = 23.5°C

5^ο Πείραμα

Δείγμα: B2

Μεμβράνη: Nft50

Απιονισμένο νερό

P = 8bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
2.36	25
2.32	25.5
2.30	25.5
2.29	26

P = 9bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
2.11	26
2.07	26
2.04	26.5
2.03	26.5
2.08	27

P = 10bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.48	27
1.48	27
1.49	27.5
1.48	27.5

P = 11bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.34	28
1.32	28
1.32	28
1.32	28

P = 12bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.28	28
1.29	28
1.27	28
1.29	28

B2

P = 8bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
2.36	27
2.40	27
2.39	27
2.39	27

P = 9bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
2.28	27.5
2.26	27.5
2.25	27.5
2.23	27.5

P = 10bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.58	28
1.58	28
1.58	28
1.57	28.5

P = 11bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.46	28.5
1.45	28.5
1.45	28.5
1.45	28.5

P = 12bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.38	29
1.35	28.5
1.35	28.5
1.36	29

Απιονισμένο νερό

P = 8bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
2.31	26
2.30	26
2.28	26
2.27	26

P = 9bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
2.14	26.5
2.12	27
2.12	27
2.10	27

P = 10bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
2.03	27
2	27
1.59	27
1.58	27.5

P = 11bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.42	27.5
1.41	27.5
1.40	28
1.40	28

P = 12bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.30	28
1.30	28
1.31	28
1.30	28

Πριν

Αραίωση 1/10

Σκληρότητα: 70 γερμανικοί βαθμοί

Αγωγιμότητα: 6008μS

T = 21.7°C

Μετά

Αραίωση 1/5

Σκληρότητα: 21 γερμανικοί βαθμοί

Αγωγιμότητα: 3017μS

T = 25°C

6^ο Πείραμα

Δείγμα: B2

Μεμβράνη: NF99

Απιονισμένο νερό

P = 4bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.17	25.5
1.16	25.5
1.16	25.5
1.14	25.5

P = 5bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.03	26
1.03	26
1.02	26
1.03	26

P = 6bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
50	26
50	26
49	26
49	26

P = 7bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
41	26
41	26
41	26
42	26

P = 8bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
35	26
35	26
35	26
35	26

P = 9bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
31	26
31	26
31	26

B2

P = 4bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.32	26
1.30	26
1.28	26
1.28	26

P = 5bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.17	26.5
1.15	26.5
1.16	26.5
1.15	26.5

P = 6bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.02	26.5
1.02	26
1.02	26
1.02	26

P = 7bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
48	26.5
49	26.5
49	26.5
49	26.5

P = 8bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
42	26.5
42	26.5
42	26.5

P = 9bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
37	27
37	27
37	27

Απιονισμένο νερό

P = 4bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.21	26
1.20	26
1.19	26

P = 5bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
1.04	26
1.04	26
1.02	26

P = 7bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
44	26
44	26
45	26

P = 8bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
37	26
37	26
37	26
37	26

P = 9bar

Χρόνος(sec)	Θερμοκρασία(°C)
33	26
33	26
34	26
33	26

Πριν

Αραίωση 1/10

Σκληρότητα: 60 γερμανικοί βαθμοί

Αγωγιμότητα: 5100 μ S

T = 18.6°C

Μετά

Αραίωση 1/2

Σκληρότητα: 18 γερμανικοί βαθμοί

Αγωγιμότητα: 2740 μ S

T = 24.3°C

7^ο Πείραμα

Δείγμα: B3

Μεμβράνη: Nft50

B3

P = 8bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
9.08	25.5
9.39	25.5

P = 9bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
8.30	24.5
8.26	24

P = 10bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
7.44	24
7.28	25.5
7.12	26

P = 11bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
6.31	26
6.45	25.5

P = 12bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
5.56	25.5
6.04	25
6.09	25

P = 14bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
5.12	25
5.19	25
5.17	25.5

Απιονισμένο νερό

P = 8bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
8.36	25
8.28	24.5
8.26	24.5

P = 10bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
6.48	24.5
6.56	25
6.46	25

P = 12bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
4.84	25.5
4.86	25.5
4.84	25.5

P = 14bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
4.42	25.5
4.42	25.5
4.40	25.5

Πριν

Αραίωση 1/10

Σκληρότητα: 100 γερμανικοί βαθμοί

Αγωγιμότητα: 5770 μ S

T = 20.8°C

Μετά

Αραίωση 1/2

Σκληρότητα: 28 γερμανικοί βαθμοί

Αγωγιμότητα: 3100 μ S

T = 22°C

8^ο Πείραμα

Επαναληπτικό

Δείγμα: B1

Μεμβράνη: Nft50

Απιονισμένο νερό

P = 14bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
4.50	25
4.45	25

P = 15bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
4.31	25
4.30	25

P = 17bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
3.48	25
3.50	25.5
3.50	25.5

P = 18bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
3.39	25
3.38	25
3.37	25

P = 19bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
3.29	24.5
3.29	24.5
3.27	24.5

P = 20bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
3.25	24.5
3.20	24.5
3.22	24.5

B1

P = 8bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
8.37	25

P = 10bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
6.23	27.5

P = 12bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
5.05	28.5

P = 13bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
4.57	27.5
4.56	27.5
4.58	27.5

P = 14bar

Χρόνος(min)	Θερμοκρασία(°C)
4.27	27.5
4.29	27.5
4.26	27.5

Πριν

Αραίωση 1/5

Σκληρότητα: 30 γερμανικοί βαθμοί

Αγωγιμότητα: 885μS

T = 15.5°C

Μετά

Αραίωση 1/2

Σκληρότητα: 6 γερμανικοί βαθμοί

Αγωγιμότητα: 245μS

T = 22.3°C