

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ &
ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ»

**“ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΦΑΛΜΥΡΩΝ ΝΕΡΩΝ ΜΕΣΩ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ”**

*Εργασία που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της μερικής απόκτησης του
μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης*

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Διαμαντόπουλος

Ιωάννα Παρασκάκη

Χανιά, Μάρτιος 2005

Ευχαριστίες

Το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή κ. Ευάγγελο Διαμαντόπουλο, για την ανάθεση και επίβλεψη της εργασίας, καθώς και την κ. Ελισάβετ Κουκουράκη, για τη βοήθειά της στην πραγματοποίηση των χημικών αναλυτικών μετρήσεων. Ευχαριστώ ακόμη, την κ. Τίνα Παρασκευά και τους διδακτορικούς φοιτητές του εργαστηρίου για την καλή συνεργασία μας.

Τέλος, ευχαριστώ την Τεχνική Υπηρεσία του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τη βοήθειά της στην εγκατάσταση της μονάδας Αντίστροφης Όσμωσης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ-----	6
2.	ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ-----	8
2.1.	Τεχνολογίες αφαλάτωσης -----	8
2.2.	Αρχή Λειτουργίας RO -----	10
2.2.1.	Όσμωση-----	10
2.2.2.	Αντίστροφη Όσμωση -----	11
2.3.	Απόδοση συστήματος RO -----	13
2.4.	Μαθηματικές εξισώσεις σχεδιασμού -----	16
2.5.	Δομή-Υλικά κατασκευής-Τύποι μεμβρανών -----	18
2.6.	Φαινόμενα ‘fouling’ -----	19
2.6.1.	Δείκτες πρόβλεψης επικαθήσεων -----	22
2.6.1.1.	Δείκτης LSI για τις επικαθήσεις αλάτων -----	22
2.6.1.2.	Δείκτης SDI για τις επικαθήσεις κολλοειδών-----	24
2.6.2.	Πρόληψη και αντιμετώπιση επικαθήσεων στη μεμβράνη -----	25
2.6.2.1.	Προστασία μεμβράνης όταν βρίσκεται εκτός λειτουργίας-----	29
2.6.3.	Αποτέλεσμα του ‘fouling’ στην απόδοση - Παράδειγμα μονάδας στην Οία --	29
2.7.	Παράγοντες σχεδιασμού και λειτουργίας RO -----	31
2.8.	Κατανάλωση ενέργειας RO -----	33
2.9.	Εναλλακτικό σύστημα RO - Υποβρύχιο σύστημα -----	35
2.10.	Εναλλακτική εφαρμογή RO - Έλεγχος παραπροϊόντων απολύμανσης με όζον--	37
3.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ -----	38
3.1.	Περιγραφή διαγράμματος ροής-----	40
3.2.	Εκκίνηση - παύση μονάδας -----	43
3.3.	Στοιχεία μεμβράνης -----	44
4.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ-----	45
4.1	Συλλογή δείγματος -----	45
4.2	Μέθοδοι ανάλυσης -----	45

4.2.1. Αγωγιμότητα -----	45
4.2.2. Αλκαλικότητα-----	46
4.2.3. Σκληρότητα -----	46
4.2.4. Διαλυμένος Οργανικός Άνθρακας -----	46
4.2.5. Ιοντική χρωματογραφία -----	46
 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ -----	48
5.1.Ανάλυση ποιότητας Τροφοδοσίας-Διηθήματος-----	48
5.2. Επίδραση παραμέτρων λειτουργίας στην απόδοση της μονάδας -----	50
5.2.1. Επίδραση της δρώσας πίεσης στην πυκνότητα ροής και στο λόγο απομάκρυνσης -----	50
5.2.2. Επίδραση της ποιότητας τροφοδοσίας στο συντελεστή απομάκρυνσης και στο βαθμό ανάκτησης-----	52
5.2.3. Επίδραση του βαθμού ανάκτησης στην πυκνότητα ροής και στο λόγο απομάκρυνσης -----	53
5.2.4. Απόδοση υπό δύο διαφορετικές ρυθμίσεις λειτουργίας και όμοια δρώσα δύναμη -----	55
5.2.5. ‘Batch’ λειτουργία με συμπύκνωση της τροφοδοσίας στη δεξαμενή τροφοδοσίας-----	56
 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ -----	57
 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ-----	59
 8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-----	63

Περίληψη

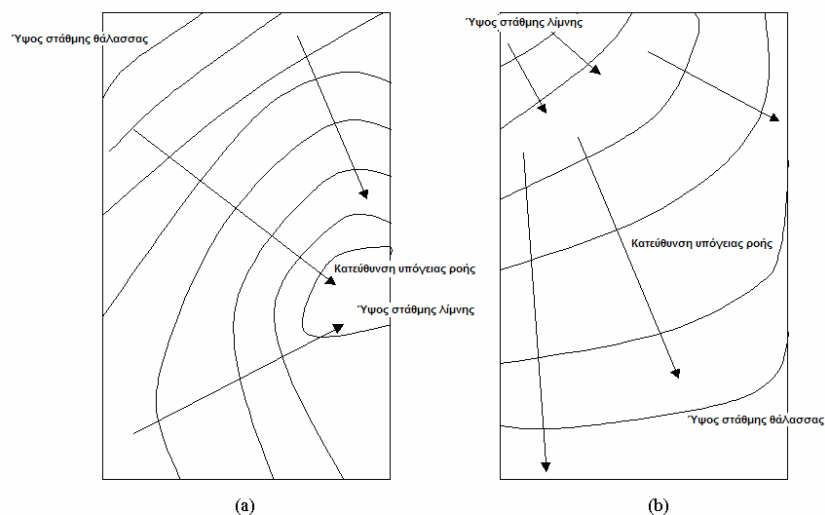
Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι να παρουσιαστεί τεχνική έκθεση αναφερόμενη στην εμπειρία που έχει αποκτηθεί από τη λειτουργία της εργαστηριακής μονάδας Αντίστροφης Όσμωσης, RO-E2-0375-DLX5, δυναμικότητας παραγωγής 1,4 L/min (~2 m³/d). Παρουσιάζονται αποτελέσματα που αφορούν στην απόδοση της μονάδας ως προς την πυκνότητα ροής της παραγωγής (flux) και τον λόγο απομάκρυνσης ιόντων άλατος, καθώς επίσης παρακολουθείται η χρονική μεταβολή της απόδοσης ως αποτέλεσμα επικαθήσεων (fouling) στη μεμβράνη. Πρόσθετα, ερευνώνται ζητήματα που αφορούν στην τεχνολογία αφαλάτωσης RO. Η εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος βασίζεται σε τροφοδοσίες διαφορετικής συγκέντρωσης ιόντων άλατος, που κυμαίνονται από 350 mg/l μέχρι 1650 mg/l προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της συγκέντρωσης των ολικών διαλυμένων στερεών (TDS) τροφοδοσίας σε σημαντικές παραμέτρους λειτουργίας, όπως είναι η πίεση, η πυκνότητα ροής, ο συντελεστής απομάκρυνσης ιόντων άλατος, η ανάκτηση. Αναφέρονται, επίσης, πρακτικές καλής λειτουργίας των εγκαταστάσεων Αντίστροφης Όσμωσης όπως, σχετικές ρυθμίσεις λειτουργίας καθώς και τρόποι συντήρησης της μονάδας. Τέλος, παρουσιάζεται εναλλακτικό υποβρύχιο σύστημα RO, καθώς επίσης ερευνάται -σε βιβλιογραφικό επίπεδο- η αποτελεσματικότητα της αντίστροφης όσμωσης στην απομάκρυνση παραπροϊόντων απολύμανσης με όξον από υφάλυμνα νερά.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι εγκαταστάσεις αφαλάτωσης μπορούν να συμβάλουν στη μερική ή/και συνολική αντιμετώπιση του πρόβληματος λειψυδρίας που παρουσιάζεται σε πολλές περιοχές ανά τον κόσμο, στις οποίες οι ποσότητες υπόγειων ή/και επιφανειακών υδάτων είναι περιορισμένες ή ανεπαρκείς. Οι τεχνολογίες αφαλάτωσης, και ιδιαίτερα η Αντίστροφη Όσμωση, μπορεί να αποτελέσει εναλλακτική λύση για την ύδρευση, και μάλιστα μπορεί να έχει πολύ χαμηλότερο κόστος και πολύ μικρότερη, αν όχι μηδαμινή, περιβαλλοντική επιβάρυνση συγκρινόμενη με αυτή της κατασκευής φράγματος. Από την άλλη, φαινόμενα υφαλμύρισης¹ που παρατηρούνται σε παράκτιες/νησιωτικές ζώνες, όταν το ισοζύγιο των υδροφορέων είναι ελλειμματικό λόγω υπεράντλησης, μπορούν να αντιμετωπιστούν με μονάδες αφαλάτωσης.

Παγκόσμια έρευνα του 1971 έδειξε ότι η συνολική παγκόσμια παραγωγή αφαλατωμένου νερού ήταν περίπου 1,5 εκατ. m³/d. Έρευνα το 1997 έδειξε ότι υπάρχουν παγκόσμια περίπου 12.500 εγκαταστάσεις αφαλάτωσης οι οποίες παράγουν πάνω από 23

¹Η υφαλμύριση υπόγειου υδροφορέα οφείλεται στη διείσδυση θαλασσινού νερού, κατά τη θερινή περίοδο, λόγω υπεράντλησης. Συγκεκριμένα η πτώση στάθμης ύδατος π.χ. στη λίμνη συνεπάγεται χαμηλότερο δυναμικό σε σχέση με τη μέση στάθμη της θάλασσας (υψηλότερο δυναμικό), με τις γραμμές ροής να έχουν διεύθυνση προς τη λίμνη που σημαίνει διείσδυση θαλασσινού νερού στον υδροφορέα όπως φαίνεται στο χάρτη ισοδυναμικών γραμμών (a).



Χάρτης ισοδυναμικών (contour maps) της στάθμης του υπογείου ύδατος (a) Περίπτωση εισροής θαλασσινού ύδατος (b) Περίπτωση εκροής υπόγειου ύδατος (Καρατζάς Γ., 2002).

εκατ. m^3/d αφαλατωμένου νερού. Υπολογίζεται ότι σήμερα, υπάρχουν περίπου 13.600 μονάδες αφαλάτωσης, οι οποίες παράγουν 26 εκατ. m^3/d πόσιμο νερό. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις αφαλάτωσης βρίσκονται στη Μέση Ανατολή. Η Σαουδική Αραβία είναι παγκόσμια ο μεγαλύτερος καταναλωτής αφαλατωμένου νερού με δυναμικότητα παραγωγής περίπου 25% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής, και ακολουθούν οι ΗΠΑ με δυναμικότητα παραγωγής περίπου 10% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής, (Cerci, 2002; CO-OPET, 2004). Στον Ελλαδικό χώρο, εγκατεστημένες μονάδες Αντίστροφης Όσμωσης παρατηρούνται στις νησιωτικές περιοχές όπου υπάρχει έντονο το πρόβλημα λειψυδρίας ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο. Στους πίνακες 1.1, 1.2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των υφιστάμενων μονάδων.

Πίνακας 1.1: Μονάδες Αντίστροφης Όσμωσης (SWRO, Saline Water Reverse Osmosis) στον Ελλαδικό χώρο, (Avlonitis et al., 2003).

Location	Capacity, m^3/d	Type of membranes	Recovery, %	Operating pressure, bar	Permeate quality, $\mu\text{S}/\text{cm}$	Temperature, $^{\circ}\text{C}$
Oia	400	FilmTec	33	62	700	25–27
Oia	180	FilmTec	40	61	700	25–27
Oia	300	FilmTec	28	59	450	25–27
Ios	500	Osmonics	40	67	800	25–27
Ithaki	600	B-10 DuPont	25	71	900	25–27
Syros	580	FilmTec	38	56	250	25–27
Mykonos	500	B-10 DuPont	23	70	430	25–27

Πίνακας 1.2: Κατανάλωση ενέργειας ανά m^3 παραγωγής αφαλατωμένου νερού, (Avlonitis et al., 2003).

Location	Production, m^3	Power of the HP pump, kW	Energy consumption, kWh	Specific energy consumption, kWh/m^3
Oia	12,000	110	55,200	4.60
Oia	5,400	75	25,110	4.65
Oia	9,000	75	47,563	5.28
Ios	14,880	75	45,073	3.02
Ithaki	9,275	200	87,000	9.38
Syros	17,856	110	109,992	6.16
Mykonos	15,000	160	125,350	8.36

2. ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ

2.1.Τεχνολογίες αφαλάτωσης

Οι τεχνολογίες αφαλάτωσης μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις σημαντικές κατηγορίες:

1. Θερμικές διεργασίες στις οποίες η διεργασία αφαλάτωσης πραγματοποιείται με αλλαγή φάσης του νερού προς επεξεργασία, (θερμικές διεργασίες Απόσταξης).
2. Διεργασίες διαχωρισμού με τη βοήθεια μεμβρανών στις οποίες η αφαλάτωση γίνεται χωρίς αλλαγή φάσης (Αντίστροφη Όσμωση, Ηλεκτροδιάλυση -δρώσα δύναμη είναι το ηλεκτρικό δυναμικό-).
3. Εναλλακτικές διεργασίες (Ιοντοεναλλαγή κ.λπ.).

Οι διαφορές ανάμεσα στις θερμικές διεργασίες και τις διεργασίες μεμβρανών παρουσιάζονται συμπυκνωμένα στον πίνακα 2.1. Στον πίνακα 2.1, διαφαίνεται ότι οι θερμικές διεργασίες είναι πολύ πιο ενεργοβόρες των διεργασιών μεμβρανών για την ίδια ποιότητα τροφοδοσίας.

Πίνακας 2.1: Τυπικά στοιχεία για τις μονάδες αφαλάτωσης (CO-OPET, 2004).

Process			Sea-water	Maintenance requirements	Size range per production unit (m³/day)		Specific energy consumptions												
							Electricity(*)		Thermal energy (heat)				Primary energy(**)						
									GOR		kWh/m³		Tempera- ture	electric (kWh/m³)		Heat (kWh/m³)		Total (kWh/m³)	
							min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min
Membrane processes	Electrodialysis Reversal	EDR	NO	↗	0	30.000	0,2	1,5	n/a				0,5	5	n/a		0,5	5	
	Brackish Water Reverse Osmosis	BWRO	NO	↗	0	10.000	0,3	1,9	n/a				0,8	6	n/a		0,8	6	
	Seawater Reverse Osmosis	SWRO	yes	↗	0	10.000	4,0	7,9	n/a				12	24	n/a		12	24	
Thermal processes	Multiple Effect Distillation	MED	yes	↘	2.000	20.000	0,8	1,8	1	10	63	630	60-80°C	2,3	5	63	630	65	635
	Multiple Effect Distillation with thermo-compression	MED-TC	yes	↘	2.000	20.000	0,8	1,5	3	15	42	210	60-80°C	2,3	5	42	210	44	215
	Multiple Stage Flash - Brine recirculation	MSF-BR	yes	↘	4.000	75.000	2,6	4,0	4	12	52	160	90-120°C	8	12	52	160	60	172
	Mechanical Vapour Compression (all electric)	MVC	yes	↘	100	3.000	8,5	12,0	20	40	16	31	90-120°C	26	36	16	31	41	67

(*) Upstream feed-water intake and downstream distribution pumping not considered

(**) Considering average specific fuel consumption of diesel generators = 260g/kWh

↗ = high

↘ = low

n/a= not applicable

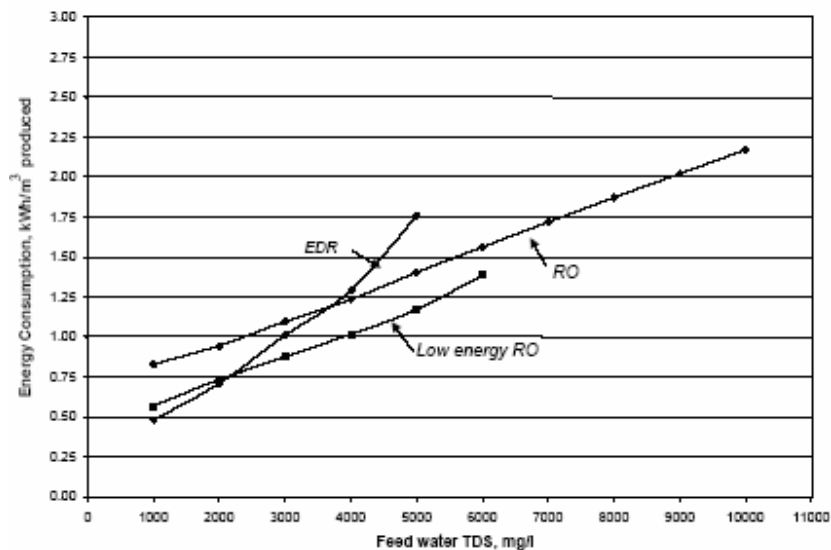
Από το φάσμα διηθήσεως μέσω μεμβρανών (βλ. σχήμα 2.1), το οποίο χωρίζεται σε τέσσερις περιοχές, οι οποίες καθορίζονται κυρίως από το μέγεθος των στερεών που διαχωρίζονται ή από το ονομαστικό μέγεθος πόρου της μεμβράνης MWCO², διακρίνεται

² Ως MWCO (Molecular Weight Cut-Off) ορίζεται το ονομαστικό σημείο αποκοπής Μοριακού Βάρους.

ότι η Αντίστροφη Όσμωση και η Ηλεκτροδιάλυση, απομακρύνουν διαλυμένες ενώσεις του ίδιου MB. Η Αντίστροφη Όσμωση ως προς την κατανάλωση ενέργειας είναι πιο συμφέρουσα στην αφαλάτωση τροφοδοσίας μεγαλύτερης αλατότητας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.

	Atomic Force Microscopy	Electron Microscope		Optical Microscope	Visible		
	Dissolved Matter		Colloids		Suspended Matter		
	Ions	Molecules	Macromolecules		Microparticles	Macroparticles	
Molecular Weight [Da]	100	1000	10000	100000			
Size [μm]	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000
Solute/Particle Dimension							
Membrane Separation Process							

Σχήμα 2.1: Φάσμα διηθήσεως μέσω μεμβρανών.

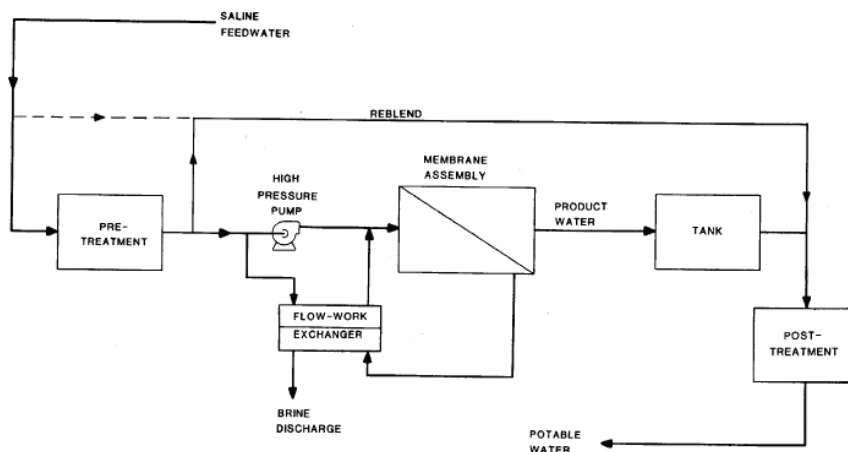


Σχήμα 2.2: Σύγκριση κατανάλωσης ενέργειας Αντίστροφης Όσμωσης και Ηλεκτροδιάλυσης, (Watson et al., 2003).

Η Αντίστροφη Όσμωση ως τεχνολογία μεμβρανών καλύπτει τις εξής λειτουργίες:

1. Αφαλάτωση.
2. Αποσκλήρυνση.
3. Απολύμανση.
4. Απομάκρυνση THMs³, BrO³⁻ καθώς και άλλων παραπροϊόντων απολύμανσης, DBPs (Disinfection by-products).

Το σύστημα αντίστροφης όσμωσης δε χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την απομάκρυνση των παθογενών μικροοργανισμών γιατί έχει σχετικά υψηλό κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος συγκρινόμενο με τη συμβατική απολύμανση. Το σχήμα 2.3 δείχνει μια τυπική διάταξη ενός συστήματος Αντίστροφης Όσμωσης.



Σχήμα 2.3: Τυπική διάταξη συστήματος Αντίστροφης Όσμωσης (Technical manual, 1986).

2.2. Αρχή Λειτουργίας RO

2.2.1. Όσμωση

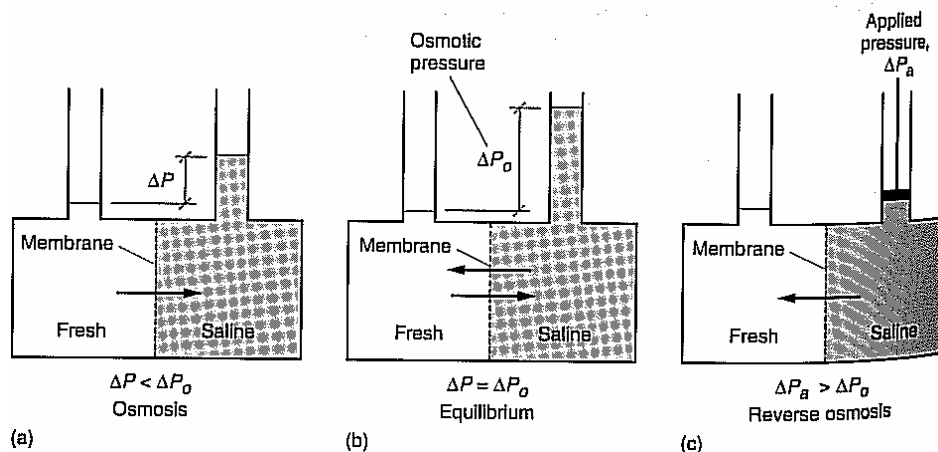
Η όσμωση συμβαίνει, όταν ο διαλύτης του αραιού διαλύματος διαχυθεί, διαμέσου της ημιπερατής μεμβράνης, στην πλευρά του συμπυκνωμένου διαλύματος (βλ. σχήμα 2.4). Η όσμωση μορίων του διαλύτη διαμέσου ημιπερατής μεμβράνης, είναι στην ουσία μια αυθόρμητη διάχυση. Η οσμωτική ροή συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί μια κατάσταση ισορροπίας η οποία χαρακτηρίζεται από την υψηλότερη στάθμη του διαλύματος της μεγαλύτερης συγκέντρωσης. Η κατάσταση αυτή ισορροπία είναι γνωστή ως οσμωτική,

³ THMs (Trihalomethanes), παράγωγα της χλωρίωσης.

και η διαφορά της στάθμης των δύο διαλυμάτων, αντιστοιχεί στην οσμωτική πίεση του συστήματος των διαλυμάτων, (Μήτακας, 2001). Η οσμωτική πίεση ορίζεται ως η υδροστατική πίεση που απαιτείται για να εμποδισθεί η όσμωση, η οποία εξαρτάται από τη διαφορά συγκέντρωσης άλατος στα υδατικά διαλύματα. Η οσμωτική πίεση P_s δίνεται από την εξίσωση Van't Hoff:

$$P_s = c \cdot R \cdot T \quad (2.1)$$

όπου c , η μοριακή συγκέντρωση ιοντικών αλάτων (mole/l), $R = 0,082$ (liter bar/K mole), η σταθερά αερίων, και T , η απόλυτη θερμοκρασία σε μονάδες Kelvin. Τυπική συγκέντρωση άλμης θαλασσινού ύδατος: $c = 1,1$ mole / liter, και η αντίστοιχη οσμωτική πίεση είναι: $P_{sea} = 1,1 \times 0,082 \times 300 = 27$ bar.



Σχήμα 2.4: Διεργασία Αντίστροφης Όσμωσης (Metcalf & Eddy, 2003).

2.2.2. Αντίστροφη Όσμωση

Η αντίστροφη όσμωση είναι μια φυσική διεργασία διαχωρισμού, που βασίζεται στην εκλεκτικότητα ή ημιπερατότητα της μεμβράνης, η οποία επιτρέπει το διαχωρισμό των διαλυτών συστατικών από το νερό. Ο διαχωρισμός βασίζεται στο ονομαστικό μέγεθος πόρων της μεμβράνης, MWCO. Οι μεμβράνες RO, που έχουν μέγεθος πόρων 1-15 Å ($\text{\AA} = 0,0001$ μικρό), εμποδίζουν το πέρασμα πρωτόζωων, βακτηρίων και ιών (σχήμα 2. 1).

Στην αντίστροφη όσμωση ο διαχωρισμός επιτυγχάνεται με την εφαρμογή πίεσης από την πλευρά της τροφοδοσίας, μεγαλύτερης της οσμωτικής πίεσης του υδατικού διαλύματος τροφοδοσίας. Συγκεκριμένα από την πλευρά της τροφοδοσίας, η αντλία υψηλής πίεσης εξασφαλίζει την αναγκαία πίεση για τη διεργασία της RO, ενώ από τη

πλευρά του διηθήματος, η πίεση ισούται με την ατμοσφαιρική. Η διαφορική πίεση ΔP εκατέρωθεν της μεμβράνης είναι η δρώσα διαφορική πίεση. Η σχέση (2) δίνει την καθαρή δρώσα διαφορική πίεση εκατέρωθεν της μεμβράνης (net applied pressure (NAP)) (Song, et al., 2003).

$$\Delta P = \left[\left(\frac{P_{in} + P_{out}}{2} \right) - P_{atm} \right] - (\pi_f - \pi_p) \quad (2.2)$$

όπου $\left[\left(\frac{P_{in} + P_{out}}{2} \right) - P_{atm} \right]$ - διαφορά υδροστατικής πίεσης εκατέρωθεν της μεμβράνης.

P_{in} -πίεση τροφοδοσίας.

P_{out} -πίεση συμπυκνώματος από ανακυκλοφορία.

$P_{atm}=1,013 \text{ atm}$.

$(\pi_f - \pi_p)$ -διαφορά οσμωτικής πίεσης ανάμεσα στην τροφοδοσία και το διήθημα.

Όταν το διάλυμα τροφοδοσίας είναι καθαρό νερό, και το π_f και π_p είναι μηδέν, και επομένως η σχέση (2) γράφεται:

$$\Delta P = \left[\left(\frac{P_{in} + P_{out}}{2} \right) - P_{atm} \right] \quad (2.3)$$

Ο ρυθμός ροής ύδατος μέσα από τη μεμβράνη δίνεται από τη σχέση:

$$F_{rate} = K_f (P_{pump} - P_s) \quad (2.4)$$

Όπου P_{pump} -πίεση που παράγεται από την αντλία και που ελέγχεται από τη βαλβίδα ελέγχου πίεσης.

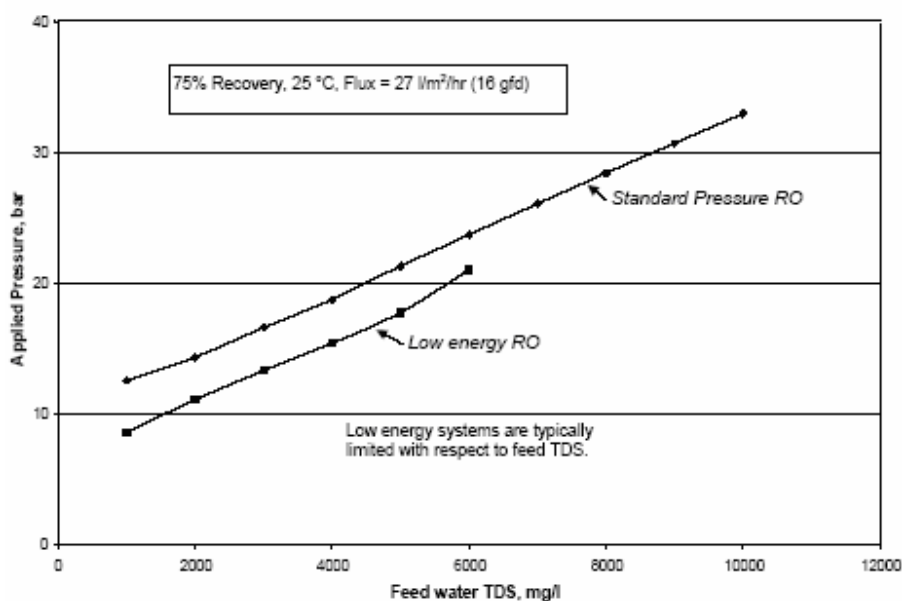
P_s , -οσμωτική πίεση υδατικού διαλύματος.

K_f -συντελεστή ροής εξαρτώμενος από τις ιδιότητες και την επιφάνεια της μεμβράνης.

Η πίεση της αντλίας πρέπει να είναι υψηλότερη της οσμωτικής πίεσης του υδατικού διαλύματος τροφοδοσίας προκειμένου να επιτευχθεί ροή υφάλμυρου νερού διαμέσου της μεμβράνης. Ο ρυθμός ροής είναι ανάλογος της διαφορικής πίεσης. Όταν οι πιέσεις είναι ίσες το ύδωρ δεν διαπερνάει από τη μεμβράνη. Στην πράξη για το γρήγορο υπολογισμό της οσμωτικής πίεσης ενός υδατικού διαλύματος, χρησιμοποιείται ο πρακτικός κανόνας ότι 100 mg/l TSD δημιουργούν 1 psi οσμωτική πίεση. Έτσι, το θαλασσινό νερό με

35.000 mg/l TDS έχει περίπου 350 psi οσμωτική πίεση, ενώ το υφάλμυρο νερό με 15.000 mg/l 150 psi (Μήτρακας, 2001).

Η εφαρμοζόμενη πίεση λειτουργίας στο σύστημα Αντίστροφης Όσμωσης έχει πεδίο τιμών 20-70 bar (Abulbasher et al., 2002), ανάλογη της συγκέντρωσης ολικών διαλυμένων στερεών (TDS)⁴. Η πίεση τροφοδοσίας συναρτήσει των TDSs δείχνεται στο σχήμα 2.5, όπου παρατηρείται ότι υψηλότερες συγκεντρώσεις TDSs στην τροφοδοσία οδηγούν σε μεγαλύτερη διαφορική οσμωτική πίεση ως αποτέλεσμα της μεγαλύτερης πίεσης τροφοδοσίας.



Σχήμα 2.5: Πίεση τροφοδοσίας υφάλμυρου νερού έναντι TDS σε μονάδα Αντίστροφης Όσμωσης (Watson et al., 2003).

2.3.Απόδοση συστήματος RO

Η απόδοση ενός συστήματος Αντίστροφης Όσμωσης μεταβάλλεται με το χρόνο και τις συνθήκες λειτουργίας. Η εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος RO βασίζεται στην πυκνότητα ροής του περάσματος $\left(\frac{Q}{A}\right)$ και στο λόγο απομάκρυνσης άλατος (R) υπό δεδομένη πίεση λειτουργίας και ποιότητα τροφοδοσίας. Η πυκνότητα ροής της παραγωγής δηλώνει την ποσοτική απόδοση της μονάδας ενώ ο συντελεστής απομάκρυνσης δηλώνει την ποιοτική απόδοση της μονάδας. Η πυκνότητα ροής της

⁴ TDS: Τα ολικά διαλυμένα στερεά είναι μια μέτρηση των ιόντων που υπάρχουν σε διάλυση.

παραγωγής (flux) υπολογίζεται με τη βοήθεια της σχέσης (2.5), (IUPAC, 1996):

$$Flux = \frac{Q_p}{A} \quad (2.5)$$

όπου Q_p -παροχή διήθηματος (l/min).

A -ενεργή επιφάνεια της μεμβράνης (cm²).

Ο λόγος απομάκρυνσης R (rejection factor), προσδιορίζεται από τη σχέση (2.6), (IUPAC, 1996).

$$R = (1 - \frac{C_p}{C_f}) \quad (2.6)$$

όπου C_p -συγκέντρωση του περάσματος (mg/l).

C_f -συγκέντρωση της τροφοδοσίας (mg/l).

Επειδή όμως η συγκέντρωση είναι ανάλογη της αλατότητας, μπορούμε στον τύπο (2.6) να αντικαταστήσουμε τις συγκεντρώσεις με τις αντίστοιχες τιμές της αγωγιμότητας, και να πάρουμε τη σχέση (2.7).

$$R = (1 - \frac{\text{Αγωγιμότητα παραγωγής}}{\text{Αγωγιμότητα τροφοδοσίας}}) \quad (2.7)$$

Ο συντελεστής διαχωρισμού S (separation factor), προσδιορίζεται από τη σχέση (2.8), (IUPAC, 1996).

$$S = \frac{C_p}{C_r} \quad (2.8)$$

όπου C_p -συγκέντρωση του περάσματος (mg/l).

C_r -συγκέντρωση του συμπυκνώματος (mg/l).

Ο συντελεστής συγκράτησης r (retention factor), προσδιορίζεται από τη σχέση, (IUPAC, 1996) (2.9).

$$r = (1 - \frac{C_p}{C_r}) \quad (2.9)$$

όπου C_p -συγκέντρωση του περάσματος (mg/l).

C_r -συγκέντρωση του συμπυκνώματος (mg/l).

Την απόδοση ενός συστήματος αντίστροφης όσμωσης μπορεί να περιγράψει και ο βαθμός ανάκτησης n (relative recovery). Η σχέση (2.10) δίνει το βαθμό ανάκτησης, (IUPAC, 1996).

$$n = \frac{Q_p}{Q_f} \quad (2.10)$$

όπου Q_p -ρυθμός ροής του περάσματος (mg/l).

Q_f -ρυθμός ροής της τροφοδοσίας (mg/l).

Σημειώνεται ότι υπάρχει διαφορά μεταξύ του βαθμού ανάκτησης, ο οποίος αναφέρεται στο νερό και του συντελεστή απομάκρυνσης, ο οποίος αναφέρεται στα διαλελυμένα συστατικά του νερού προς διαχωρισμό.

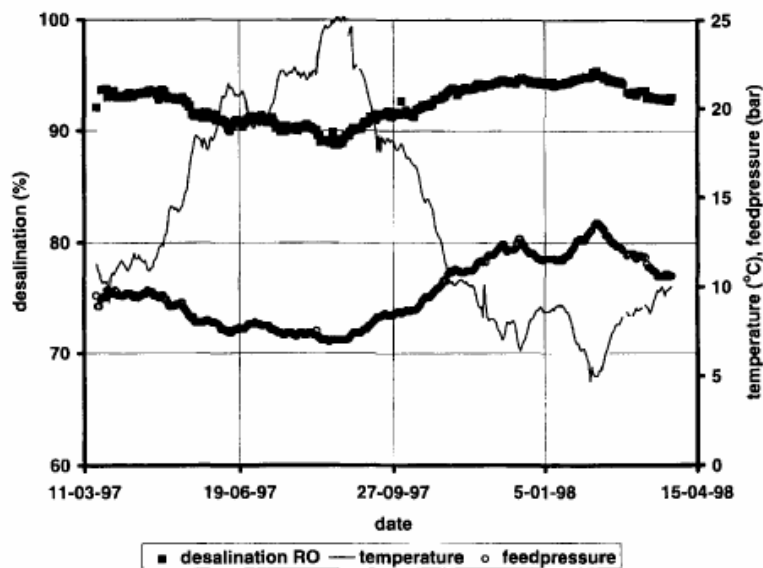
Ο συντελεστής διαπερατότητα P της μεμβράνης (permeability coefficient), ($\text{kmol m m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{kPa}^{-1}$) δίνεται από τη σχέση (2.11), (IUPAC, 1996).

$$P = \frac{\text{Flux}}{\Delta P} L \quad (2.11)$$

όπου L -πάχος μεμβράνης (m).

Στο σχήμα 2.6, διακρίνεται η σχέση μεταξύ εφαρμοζόμενης πίεσης (από την πλευρά της τροφοδοσίας), απόδοσης αφαλάτωσης (εκφρασμένη ως προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα) και θερμοκρασίας, όπου παρατηρείται ότι η απόδοση αφαλάτωσης είναι σχεδόν σταθερή. Μείωση της απόδοσης παρατηρείται στις υψηλές θερμοκρασίες, λόγω αύξησης της ροής της τροφοδοσίας. Σημειώνεται ότι, η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα, την ελάττωση του ιξώδους του νερού, και επομένως την αύξηση της παροχής του νερού που διέρχεται από τη μεμβράνη. Η αύξηση της παροχής ύδατος τροφοδοσίας, διαμέσου μιας μεμβράνης RO με την αύξηση της θερμοκρασίας, βασίζεται σε δύο διαφορετικούς μηχανισμούς (Safar et al., 1998):

1. Το νερό τροφοδοσίας γίνεται λιγότερο ιξώδες (πιο λεπτόρρευστο) με την αύξηση της θερμοκρασίας, και επομένως, διαπερνάει ευκολότερα από τη μεμβράνη.
2. Η δομή της μεμβράνης αλλάζει, αυξάνοντας το πορώδες της.



Σχήμα 2.6: Σχέση δρώσας πίεσης και απόδοσης αφαλάτωσης με θερμοκρασία, (Van der Hoek et al., 1998).

2.4. Μαθηματικές εξισώσεις σχεδιασμού

Γνωρίζοντας την ποιότητα και ποσότητα τροφοδοσίας (Q_f , C_f) καθώς και το συντελεστή απομάκρυνσης και το βαθμό ανάκτησης υπολογίζονται οι υπόλοιπες μεταβλητές με τη χρήση των ισοζυγίων (2.12 – 2.17).

$$\text{Ισοζύγιο όγκου για την παροχή του νερού: } Q_r + Q_p = Q_f \quad (2.12)$$

όπου Q_f -παροχή τροφοδοσίας, m^3/sec .

Q_p -παροχή διηθήματος, m^3/sec .

Q_r -παροχή συμπυκνώματος, m^3/sec .

$$\text{Ισοζύγιο μάζας για τα διαλυμένα συστατικά (Cl}^-, \text{Br}^- \text{ κ.λπ.): } Q_f C_f = Q_r C_r + Q_p C_p \quad (2.13)$$

όπου C_f -συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας τροφοδοσίας, mg/l .

C_p -συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας διηθήματος, mg/l .

C_r -συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας συμπυκνώματος, mg/l .

Βαθμός ανάκτησης:

$$n = \frac{Q_p}{Q_f} \quad (2.14)$$

Λόγος απομάκρυνσης R:

$$R = (1 - \frac{C_p}{C_f}) \quad (2.15)$$

Η μεταφορά μάζας διαμέσου ημιπερατών μεμβρανών υψηλής εκλεκτικότητας, μπορεί να περιγραφεί μέσα από τη θεωρία διάχυσης διαλυμάτων. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή το νερό και τα συστατικά διαχέονται ανεξάρτητα ως νερό και συστατικά στη μεμβράνη (Μήτρακας, 2001). Ακολουθώντας αυτό το μοντέλο, η συνολική μεταφορά μάζας μπορεί να διαχωριστεί σε τρία επάλληλα βήματα όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.7:

1. Προσρόφηση ενός συστατικού διαλύματος στην επιφάνεια της μεμβράνης.
2. Μεταφορά διαμέσω της μεμβράνης κατά μήκος μιας πιθανής βαθμίδας πίεσης, συγκέντρωσης.
3. Εκρόφηση από την πλευρά παραγωγής της μεμβράνης.

Πυκνότητα ροής διηθήματος (νερού) J_w :

$$J_w = \frac{Q_p}{A} = K_w (\Delta P - \Delta \pi) \quad (2.16)$$

όπου K_w -συντελεστής διαπερατότητας (m^2/s).

A - επιφάνεια της μεμβράνης.

Πυκνότητα ροής διαλυμένου συστατικού J_s :

$$J_s = K_s \frac{C_m - C_p}{x}, \text{ (1ος νόμος του Fick).} \quad (2.17)$$

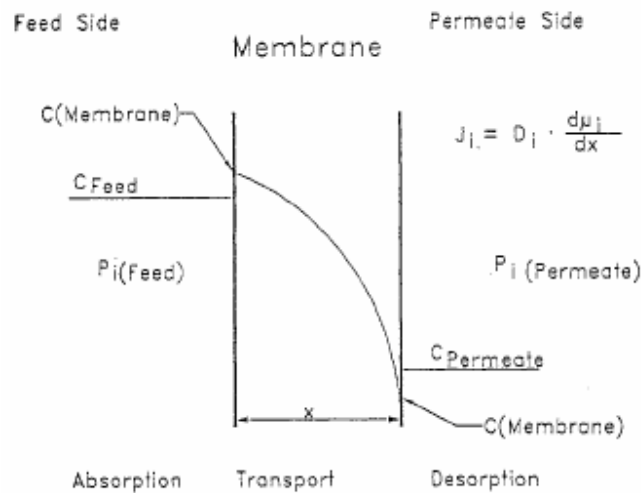
όπου K_s -συντελεστής διαχυτότητας (m^2/s).

C_m -συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας τροφοδοσίας στην επιφάνεια της μεμβράνης.

C_p -συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας διηθήματος.

x -πάχος της μεμβράνης.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι δε μπορεί να υπάρξει ιδανική ημιπερατή μεμβράνη, η οποία θα επιτρέπει τη διέλευση μόνο του νερού και θα είναι αδιαπέραστη από τα διαλυτά συστατικά του. Επίσης ισχύει $J_w > J_s$, λόγω των μεγαλύτερων ταχυτήτων προσρόφησης, διάχυσης και εκρόφησης του νερού σε σχέση με τις αντίστοιχες των διαλυτών συστατικών του (Μήτρακας, 2001).



Σχήμα 2.7: Μηχανισμός Αντίστροφης Διάχυσης διαλυμάτων, (Bruschke, 1995).

2.5.Δομή-Υλικά κατασκευής-Τύποι μεμβρανών

Οι συνθετικές μεμβράνες RO κατασκευάζονται από διάφορα πολυμερή, όπως είναι η οξική κυτταρίνη (cellulose acetate, CA) και τα παράγωγά της, το πολυαμίδιο (aromatic polyamides, PA), το πολυακρυλονιτρίλιο (polyacrylonitrile), polysulphone και polyethersulphone. Τα πολυμερή είναι δομημένα σε δύο κυρίως στρώσεις, την πρώτη προς το μέρος της πίεσης τροφοδοσίας, η οποία είναι μη πορώδης και έχει λεπτό πάχος (φιλμ), (Thin-Film Composite, TFC), και τη δεύτερη στρώση η οποία είναι πορώδης και χρησιμεύει ως υποστήριγμα της πρώτης στρώσης, αυξάνοντας τη μηχανική αντοχή της. Η μη πορώδης στρώση είναι εκείνη που διαχωρίζει το νερό από τα διαλυμένα συστατικά του (Μήτράκας 2001).

Η μεμβράνη από CA αποσυντίθεται χημικά, μέσω υδρόλυσης με την πάροδο του χρόνου, θέτει περιορισμούς στο pH της τροφοδοσίας, απαιτεί υψηλές πιέσεις λειτουργίας, ενώ παρουσιάζει ανθεκτικότητα στο υπολειμματικό χλώριο της τροφοδοσίας. Από την άλλη, στη μεμβράνη από PA, παρατηρείται καλύτερη απομάκρυνση διαλυμένων στερεών, χημική και βιολογική σταθερότητα, διπλάσια απόδοση παραγωγής, στην ίδια πίεση λειτουργίας, ενώ εμφανίζει σχεδόν μηδενική ανθεκτικότητα στο υπολειμματικό χλώριο, (Redondoa, et al., 2001; Shahalam, et al., 2002; Μήτράκας 2001).

Ένα από τα κριτήρια κατασκευής και επιλογής μεμβράνης, είναι η όσο το δυνατό

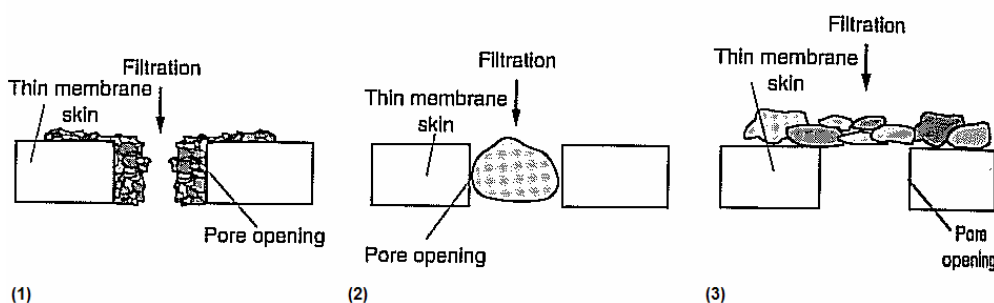
μεγαλύτερη επιφάνεια σε συνδυασμό με το μικρότερο δυνατό πάχος. Με βάση το κριτήριο επιφανείας ανά μονάδα όγκου μεμβράνης, κατασκευάσθηκαν διάφοροι τύποι μεμβρανών (Μήτρακας, 2001):

- | | |
|-----------------------------|---------------------------------|
| 1. Επίπεδη | $165 \text{ m}^2/\text{m}^3$ |
| 2. Κυλινδρική | $335 \text{ m}^2/\text{m}^3$ |
| 3. Σπειροειδούς διαμόρφωσης | $1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ |
| 4. Λεπτών κοίλων ινών | $16.500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ |

2.6.Φαινόμενα ‘fouling’

Οι τρεις μηχανισμοί ‘fouling’ που συνεργούν στην αντίσταση της ροής λόγω συσσώρευσης διαλυμένων στερεών στη μεμβράνη είναι (βλ. σχήμα 2.8), (Metcalf & Eddy, 2003):

1. Αλλοίωση της μεμβράνης λόγω παρουσίας χημικών τα οποία μπορούν να αντιδράσουν με τη μεμβράνη ή βιολογικών μέσων που μπορούν να αποικίσουν στη μεμβράνη (pore narrowing).
2. Έμφραξη της μεμβράνης (pore plugging).
3. Σταδιακή ανάπτυξη φιλμ πάνω στην επιφάνεια της μεμβράνης (gel/cake formation).



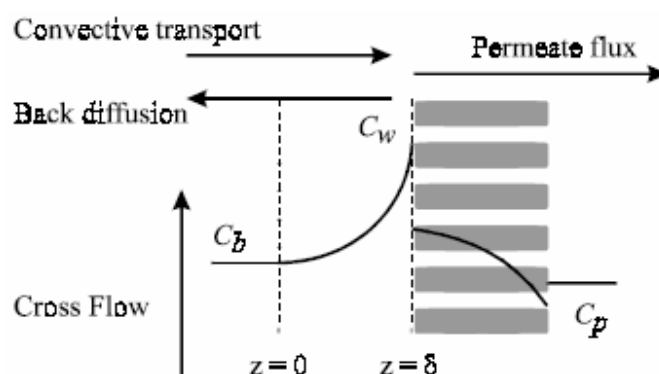
Σχήμα 2.8: Οι τρεις μηχανισμοί ‘fouling’, (Metcalf & Eddy, 2003).

Φαινόμενα ‘fouling’ στη μεμβράνη, οδηγούν στη μείωση της παραγωγικότητας της μονάδας, καθώς και στην υποβάθμιση της ποιότητας παραγωγής. Η έκταση του ‘fouling’ στην επιφάνεια της μεμβράνης εξαρτάται από το σχετικό μέγεθος των διαλυμένων στερεών σε σχέση με το μέγεθος πόρων της μεμβράνης (MWCO). Όταν το MWCO της μεμβράνης είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος των στερεών της τροφοδοσίας, παρατηρείται να συμβαίνει το βούλωμα ή/και η στένωση της μεμβράνης (Zhu et al., 1997).

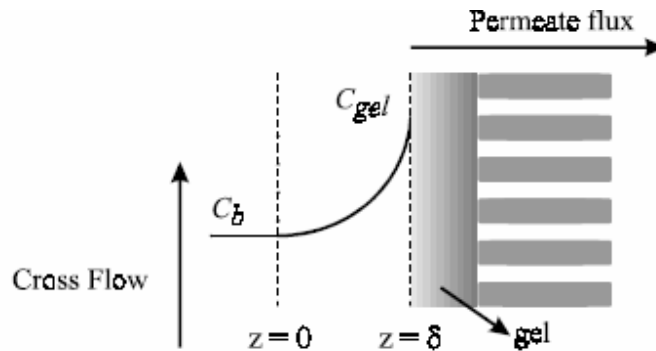
Ο κυρίαρχος μηχανισμός ‘fouling’ στις μεμβράνες RO είναι η σταδιακή ανάπτυξη φιλμ στην επιφάνεια, αφού αυτές είναι μη πορώδεις. Το στρώμα αυτό παρέχει μια πρόσθετη υδραυλική αντίσταση, με αποτέλεσμα τη μείωση της ροής της παραγωγής. Το παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα, να εμφανίζονται δύο επάλληλες αντιστάσεις ροής, η αντίσταση λόγω καθαρής μεμβράνης και η αντίσταση λόγω σχηματιζόμενου φιλμ στην επιφάνεια της μεμβράνης. Ο σχηματισμός φιλμ στην επιφάνεια της μεμβράνης δημιουργείται εξαιτίας φαινομένων πόλωσης συγκέντρωσης (concentration polarization). Η πόλωση συγκέντρωσης αναφέρεται στη σταδιακή ανάπτυξη φιλμ, διαδικασία που είναι αντιστρεπτή και που συμβαίνει όταν το μέγεθος πόρων της μεμβράνης (MWCO) είναι μικρότερο από το μέγεθος των διαλυμένων στερεών της τροφοδοσίας (βλ. σχήμα 2.9). Η πόλωση συγκέντρωσης οδηγεί στο σχηματισμό κέικ/φιλμ κοντά ή πάνω στην επιφάνεια της μεμβράνης, και επομένως σε μη αναστρέψιμες επικαθήσεις, δηλαδή σε αλλαγή αλληλεπίδρασης μεταξύ διαλύτη, μεμβράνης και διαλυμένων συστατικών (βλ. σχήμα 2.10). Το αποτέλεσμα της πόλωσης συγκέντρωσης είναι (Kahdim et al., 2003):

1. Αύξηση της οσμωτικής πίεσης της τροφοδοσίας.
2. Μείωση της καθαρής δρώσας διαφορικής πίεσης εκατέρωθεν της μεμβράνης.
3. Μείωση της παροχής της παραγωγής.

Το πάχος του σχηματιζόμενου φιλμ εξαρτάται κυρίως από τις υδροδυναμικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα από τον αριθμό Reynolds. Η ανάκτηση και ο βαθμός απόδοσης, αποκαθίστανται με την εφαρμογή μεγαλύτερης πίεσης από την πλευρά της τροφοδοσίας ή με υδροδυναμικό/χημικό καθαρισμό της μεμβράνης.



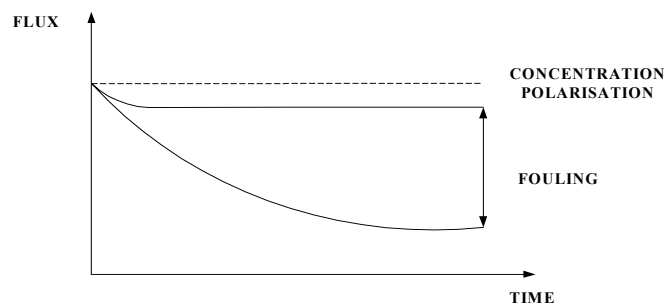
Σχήμα 2.9: Πόλωση Συγκέντρωσης.



Σχήμα 2.10: Σχηματισμός στρώματος ‘gel’ πάνω στη μεμβράνη. Η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στη διεπιφάνεια μεμβράνης-νερού θεωρείται ότι προσεγγίζει σταθερή τιμή, που είναι ίση με τη διαλυτότητα της διαλυμένης ουσίας.

Τονίζεται η σημασία της πυκνότητας ροής ως μέτρο του ‘fouling’ στην επιφάνεια της μεμβράνης. Ο ορισμός της πυκνότητας ροής ενέχει την παράμετρο της ενεργής επιφάνειας η οποία υποδηλώνει την έκταση ‘fouling’ στη μεμβράνη.

Το φαινόμενο πώσης είναι αναστρέψιμο, αλλά συχνά παρατηρείται συνεχής μείωση της πυκνότητας ροής, όπως δείχνεται στο σχήμα 2.11, λόγω γήρανσης που επέρχεται κατά τη λειτουργία της μεμβράνης.



Σχήμα 2.11: Πτώση πυκνότητας ροής εξαιτίας ‘fouling’.

Ο 1^{ος} νόμος Fick περιγράφει τη μεταφορά μάζας με διάχυση μέσα σε στερεό (μεμβράνη) και δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Flux} = (\text{Συντελεστής διαχυτότητας}) * \frac{(\text{Δρώσα Δύναμη})}{(\text{Αντίσταση})} = K \frac{\Delta P}{R} \quad (2.18)$$

Η εμπειρική σχέση Kozany-Carman μπορεί μόνο να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει την αύξηση της αντίστασης στη μεμβράνη λόγω σταδιακής ανάπτυξης κρούστας (build-up of scale) πάνω στην επιφάνεια της μεμβράνης. Επειδή έχουμε δύο στρώματα

αντίστασης, αυτή της καθαρής μεμβράνης και αυτή του ‘cake’ στον τύπο (2.18) χρησιμοποιούνται δύο αντιστάσεις ροής R_m και R_c αντίστοιχα, που βρίσκονται εν σειρά.

$$Flux = K \frac{\Delta P}{R_c + R_m} \quad (2.19)$$

Η εμπειρική σχέση Kozany-Carman που δίνει την αντίσταση του σχηματιζόμενου στρώματος στην επιφάνεια της μεμβράνης:

$$R_c = 180 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{[(d_s)^2 \varepsilon^3]} \left[\frac{m_s}{p_s (1 - \varepsilon) A} \right] \quad (2.20)$$

Όπου d_s - διάμετρος του σωματιδίου της διαλυμένης ύλης.

ε - πορώδες του στρώματος ‘cake’.

m_s - μάζα του ‘cake’.

p_s - πυκνότητα διαλυμένου συστατικού.

A - επιφάνεια της μεμβράνης.

Η σχέση (2.20) δείχνει ότι, όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια της μεμβράνης τόσο μικρότερη είναι η αντίσταση ροής, λόγω σχηματιζόμενης κρούστας στην επιφάνειά της. Επομένως η επιλογή μεμβράνης, όσο το δυνατό μεγαλύτερη επιφάνεια σε συνδυασμό με μικρότερο πάχος, περιορίζει σημαντικά τις αντιστάσεις R_c και R_m , αντίστοιχα. Το πάχος του σχηματιζόμενου στρώματος, εξαρτάται βέβαια και από το είδος και τη συγκέντρωση των διαλυμένων συστατικών, καθώς και τις συνθήκες (πίεσης και θερμοκρασίας) και το χρόνο λειτουργίας της μονάδας.

2.6.1. Δείκτες πρόβλεψης επικαθήσεων

2.6.1.1. Δείκτης LSI για τις επικαθήσεις αλάτων

Το CaCO_3 είναι η πιο κοινή μορφή ανόργανων επικαθήσεων⁵ στη μεμβράνη. Οι ανόργανες επικαθήσεις προβλέπονται από το δείκτη LSI (Langelier Saturation Index), (Langelier, 1936).

$$LSI = \text{pH}_{\text{(actual)}} - \text{pH}_s \quad (2.21)$$

όπου:

$$\text{pH}_s = \text{pCa} + \text{pAlk} + C_{\text{(T,TDS)}} \quad (2.22)$$

⁵ Ανόργανα ιζήματα CaSO_4 , BaSO_4 , CaCO_3 , Mg(OH)_2 .

όπου:

$p_{Ca} = \log$ συγκέντρωσης Ca^{++}

$pAlk = \log$ αλκαλικότητας HCO_3

$C_{(T,TDS)} =$ σταθερά εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία και το TDS

Για τροφοδοσίες όπου οι συγκεντρώσεις ανθρακικού ασβεστίου είναι υψηλότερες, (αυξημένη σκληρότητα π.χ. θαλάσσινο νερό), χρησιμοποιείται ο δείκτης SD (Stiff and Davis Index), ως πιο ακριβής δείκτης πρόβλεψης της τάσης σχηματισμού ανόργανων εναποθέσεων:

$$SD = pH \text{ (actual)} - pH_{SD} \quad (2.23)$$

όπου:

$$pH_{SD} = pCa + pAlk + K_{(T,TDS)} \quad (2.24)$$

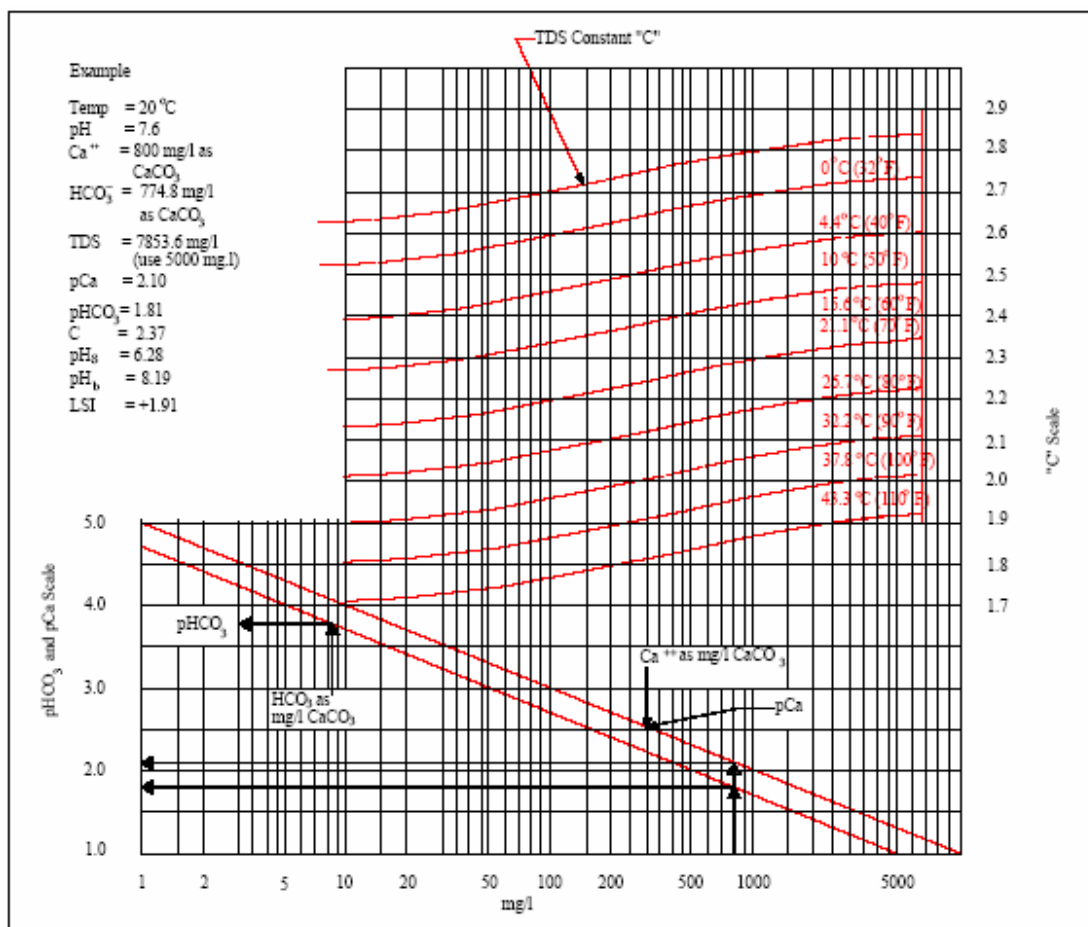
όπου:

$K =$ σταθερά εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση ιόντων.

Αν $pH > pH_s$, τότε το νερό είναι κορεσμένο με $CaCO_3$.

Αν $pH < pH_s$, τότε το νερό είναι ακόρεστο. Θετική τιμή δείχνει τάση προς εναπόθεση.

Οι ανθρακικές επικαθήσεις διαλύονται εύκολα με την προσθήκη διαλύματος HCl , ή χαμηλώνοντας το pH της τροφοδοσίας. Το σχήμα 2.12 παρουσιάζει το νομογράφημα του LSI.



Σχήμα 2.12: Νομογράφημα LSI, (Watson et al., 2003).

Το θαλασσινό νερό παρουσιάζει υψηλή συγκέντρωση σε ανθρακικό ασβέστιο που αντιμετωπίζεται με ρύθμιση του pH στο 6-6,5 (παρεμποδιστικός παράγοντας στην Αντίστροφη όσμωση).

2.6.1.2. Δείκτης SDI για τις επικαθήσεις κολλοειδών

Η πιθανότητα σχηματισμού 'fouling' στην επιφάνεια της μεμβράνης από τα κολλοειδή, μετράται με τη βοήθεια του δείκτη 'fouling', Silt Density Index (SDI). Ο δείκτης SDI υπολογίζεται βάσει του ρυθμού έμφραξης ενός ηθμού με διάκενα 0,45μm, υπό πίεση 2 bar. Ο χρόνος έμφραξης ποικίλλει από 15 min ως 2 h, συναρτώμενος της συγκέντρωσης των διαλυμένων κολλοειδών. Ο δείκτης SDI υπολογίζεται από τη σχέση (Metcalf & Eddy, 2003):

$$SDI = \frac{100 \left[1 - \left(\frac{t_i}{t_f} \right) \right]}{T} \quad (2.25)$$

Όπου:

t_i –αρχικός χρόνος συλλογής δείγματος των 500 ml,sec

t_f -χρόνος συλλογής δείγματος των 500 ml, μετά την παρέλευση του χρόνου T, sec.

T -συνολικός χρόνος εφαρμογής πίεσης, min.

Ο δείκτης SDI είναι στατική μέτρηση της αντίστασης του δείγματος κατά την εκκίνηση και το τέλος του τεστ. Η εκτίμηση λοιπόν του SDI, δεν περιλαμβάνει μετρήσεις ρυθμού μεταβολής της αντίστασης κατά τη διάρκεια του τεστ. Το όριο αποδοχής της περιεκτικότητας σε κolloειδή του υδατικού διαλύματος τροφοδοσίας, είναι συνήθως $SDI < 3$ (Μήτρακας, 2001). Μετρούμενες τιμές του SDI εντός των αναφερόμενων ορίων αποδοχής της περιεκτικότητας σε κolloειδή του νερού τροφοδοσίας, παρατείνουν τη διάρκεια ζωής της μεμβράνης. Το νερό τροφοδοσίας προερχόμενο από υπόγειους υδροφορείς, έχει χαμηλό δείκτη $SDI < 2$. Το επιφανειακό νερό χαρακτηρίζεται από υψηλό δείκτη SDI.

2.6.2. Πρόληψη και αντιμετώπιση επικαθήσεων στη μεμβράνη

Τυπικά, τρεις τακτικές χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την αντιμετώπιση του ‘fouling’ στη μεμβράνη:

1. Προεπεξεργασία του νερού τροφοδοσίας.
2. Υδροδυναμικός καθαρισμός.
3. Χημικός καθαρισμός μεμβράνης.

Η προεπεξεργασία της τροφοδοσίας ως μέτρο πρόληψης είναι απαραίτητη στην περίπτωση που η ποιότητα της τροφοδοσίας δεν ακολουθεί τις προδιαγραφές ποιότητας, όπως αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2, για τα διάφορα συστήματα μεμβρανών RO. Η διαδικασία προεπεξεργασίας έχει ως αποτέλεσμα να εμποδίζει/προλαμβάνει καθένα από τα παρακάτω φαινόμενα ‘fouling’, κατηγοριοποιημένα βάσει είδους εναποτιθέμενων στερεών στη μεμβράνη:

1. Επικαθήσεις αιωρούμενων στερεών,
2. Εναπόθεση ανόργανης ύλης (inorganic/mineral scaling),

3. Επικαθήσεις κολλοειδών,
4. Βιολογικές επικαθήσεις (Bio-fouling),
5. Επικαθήσεις υδροξειδίων των μετάλλων,
6. Εναπόθεση διοξειδίου του πυριτίου⁶,

μειώνοντας ταυτόχρονα και τη συχνότητα καθαρισμού/αντικατάστασης της μεμβράνης, (Watson et al., 2003).

Πίνακας 2.2: Απαιτήσεις ποιότητας υδατικού διαλύματος τροφοδοσίας για την Αντίστροφη Όσμωση, (Watson et al., 2003).

	Spiral CA	Spiral PA
Suspended matter		
a) Turbidity, NTU	<1.0	<1.0
b) SDI	<4.0	<4
Ionic content		
a) Iron, mg/l (ferrous)	<2.0	<2.0
b) Manganese, mg/l	<0.5	<0.5
c) Strontium, in conc percent saturation	2,000 percent	3,000 percent
d) Barium, in conc percent saturation	5,000 percent	5,000 percent
e) Silica, mg/l (w/o inhibitor) in concentrate	<160	<160
Chemical Additives		
a) Residual Chlorine, ppm	<1.0	ND
b) Scale Inhibitor, mg/l in concentrate	12-18	12-18
c) Acidification, pH	5.5-6.0	4-10
Temperature, saturation, solubility		
Maximum feed temperature °C	40	45
Maximum LSI with scale inhibitor	Note	+2.4-+2.8
Solubility product (CaSO ₄) with scale inhibitor, percent saturation	150 percent	150 percent

NA = Not applicable

ND = Nondetectable

SDI = Silt Density Index

NTU = Nephelometric turbidity units

Type of membrane:

PA = Polyamide

CA = Cellulose acetate

Note: CA membranes require acidification to pH 5.5 to 6.0 to reduce the rate of hydrolysis. Therefore, the Langelier Saturation Index of the exiting concentrate tends to be low enough that scale inhibitor for calcium carbonate is not necessary.

Η διεργασία διήθησης με φίλτρο μέγεθους πόρων 5-10 μm είναι απαραίτητη στο στάδιο της προεπεξεργασίας, αφού χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση των

⁶ Το διοξείδιο του πυριτίου βρίσκεται σε συγκεντρώσεις στα νερά από 5 έως 50 mg/l. Όταν επέλθει υπερκορεσμός πολυμερίζεται σε αδιάλυτο κολλοειδές πυρίτιο, το οποίο αποτίθεται στην επιφάνεια της μεμβράνης (Μήτρκας, 2001).

αιωρούμενων-κolloειδών στερεών. Στους πίνακες 2.3, 2.4, παρουσιάζονται χημικά πρόσθετα για την προεπεξεργασία της τροφοδοσίας, και δοσολογίες χημικών αντίστοιχα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά την προεπεξεργασία των υπόγειων νερών στη Σαουδική Αραβία, (Shahalam, et al., 2002).

Πίνακας 2.3: Χρήση χημικών στην προεπεξεργασία του ύδατος τροφοδοσίας (Shahalam, et al., 2002).

Chemicals in pretreatment	Uses
Chlorine gas	Disinfecting
Sodium bisulfite	Remove chlorine
Citric acid	Remove iron
DMCA-14	Remove Deposits
Tannic acid	Improve rejection
Lutonol M40	Improve Rejection
Ammonium hydroxide	pH adjustment
Caustic soda	pH adjustment

Πίνακας 2.4: Δόση χημικού για την προεπεξεργασία ύδατος τροφοδοσίας (Shahalam, et al., 2002).

Chemical	Dosages
Sodium carbonate, ppm	240–340
Calcium hydroxide, ppm	110–140
Sodium aluminate, ppm	12–45
Coagulation aid, ppm	0.02–0.2

Ο καθαρισμός της μεμβράνης, είναι ουσιαστικό βήμα στη διατήρηση της διαπερατότητας και εκλεκτικότητας της μεμβράνης, (Chen et al., 2003). Το κόστος καθαρισμού της μεμβράνης αντιστοιχεί στο 5-20% του λειτουργικού κόστους, πράγμα που υποδηλώνει και τη σημασία του καθαρισμού στη λειτουργία της μονάδας Αντίστροφης Όσμωσης (Madaenl et al., 2001). Ο καθαρισμός γίνεται είτε υδροδυναμικά, είτε χημικά. Ο υδροδυναμικός καθαρισμός ουσιαστικά ‘ξεπλένει’ τη μεμβράνη υπό χαμηλές πιέσεις λειτουργίας και μεγάλη εφαπτομενική ταχύτητα, για ορισμένη διάρκεια εφαρμογής. Ο χημικός καθαρισμός της μεμβράνης ορίζεται από τη συγκέντρωση του καθαριστικού διαλύματος, το χρόνο καθαρισμού, τη θερμοκρασία, και τις υδροδυναμικές συνθήκες κατά τη διάρκεια του καθαρισμού. Ένα τέτοιο καθαριστικό είναι το θειοθειικό νάτριο, (sodium metabisulfite, SMBS) το οποίο χρησιμοποιείται ως βιοστατικό σε

συγκέντρωση 1%, (Kahdim et al., 2003). Στον πίνακα 2.5, διαφαίνονται και άλλοι τύποι χρησιμοποιούμενων καθαριστικών με τις αντίστοιχες δόσεις τους.

Πίνακας 2.5 :Τεχνικές απολύμανσης για τον έλεγχο του Bio-fouling (Watson et al., 2003).

Biocide category	Examples	Concentration range	Membrane compatibility	Comments
Oxidizing	Chlorine	0.1-1.0 mg/l	CA, PS	The oxidizing biocides listed are used primarily as feed water additives. Because monochloramine exhibits reduced oxidizing activity compared to free chlorine, it does not harm performance of PA membranes. It is an excellent biocide, especially with respect to biofilms.
	Monochloramine	0.5-5.0 mg/l	All	
	Peracetic acid	0.1-1.0 mg/l	CA, PS	
	Hydrogen peroxide	0.1-1.0 mg/l	All	
	Iodine			
Nonoxidizing	Formaldehyde	0.5-5.0 percent	All	Sodium bisulfite is the only reducing agent currently used as a feed water additive. Sodium bisulfite acts to prevent growth.
	Glutaraldehyde	0.5-5.0 percent	All	
	Bisulfite	1.0-100 mg/l	All	
	2-methyl-4-isothiazolin-3-one	0.01-1.0 percent	All	All others listed are used primarily to preserve membranes from biodegradation/biodeterioration during plant inactivity.
	Quaternary amines	0.01-1.0 percent	CA, PS	
	Benzoate	0.1-1.0 percent	All	
	EDTA	0.01-1.0 percent	All	
Irradiation	Ultraviolet	1-2 MR ¹	All (conditional) ²	Disinfection by irradiation is very effective but leaves no biocide residual following exposure; thus, surviving bacteria may regrow on membrane surfaces. Gamma radiation is particularly suited for disinfection of new membrane modules (sealed in plastic wrap prior to long-term storage).
	Gamma		All (conditional) ²	

¹ MR = megarads

² Compatibility depends on radiation dosage, temperature, pH redox potential, and other factors.

Στις πολυαμιδικές μεμβράνες λεπτού πάχους (FilmTec polyamide FT30), χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα χημικά μέσα, βάσει βιβλιογραφικών δεδομένων, (Madaenl et al., 2001):

- Υδροχλωρικό οξύ (HCl), νιτρικό οξύ (H₂NO₃), θειϊκό οξύ (H₂SO₄), φωσφορικό οξύ (H₃PO₄), κιτρικό οξύ (C₆H₈O₇), sulphamic acid (HO-SO₂ NH₂) -Merck-.
- Υδροξείδιο του νατρίου (NaOH), υδροξείδιο του καλίου (KOH) -Panreac-, υδροξείδιο του αμμωνίου (NH₄OH) -Merck-.
- Υποχλωριώδες νάτριο (NaClO) -Fluka-.
- Ammonium chloride (NI-hCl) -Merck-.
- EDTA, δηλαδή ethylene diamine tetra acetic acid [CH₂N(CH₂COOH₂)] -Merck-.
- Sodium dodecyl sulphate (SDS) -Merck-.

2.6.2.1. Προστασία μεμβράνης όταν βρίσκεται εκτός λειτουργίας

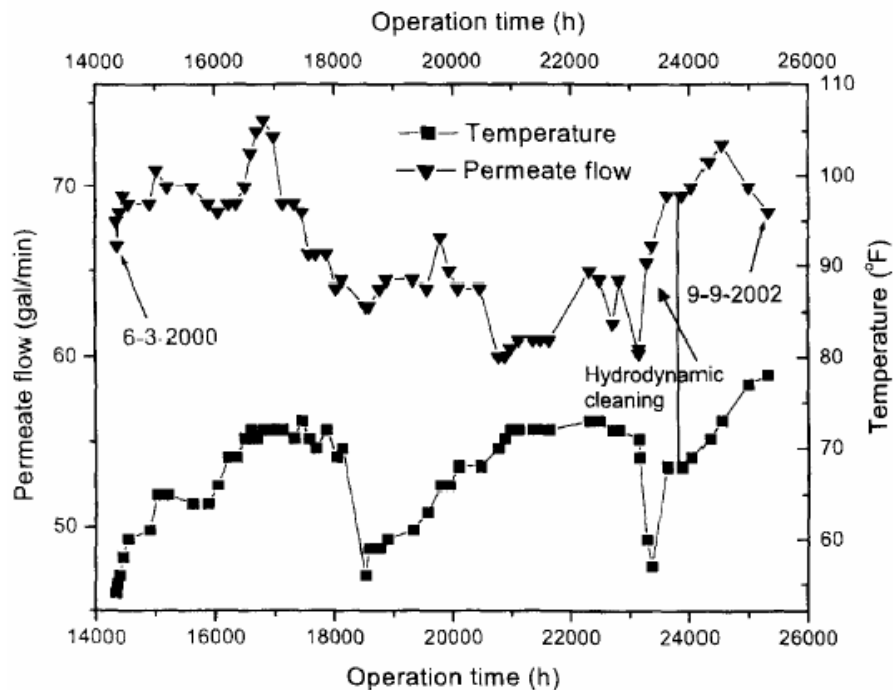
Η μονάδα μεμβράνης πρέπει να προστατεύεται όταν βρίσκεται εκτός λειτουργίας για περισσότερο από 24 ώρες. Η έλλειψη συντήρησης της μεμβράνης, μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη βιολογικών επικαθήσεων, οι οποίες προκαλούν προβλήματα στη λειτουργία της μονάδας RO, όπως είναι η πτώση πίεσης (ΔP) εκατέρωθεν της μεμβράνης με αποτέλεσμα τη μικρότερη παροχή νερού. Τα συντηρητικά διαλύματα προστασίας της μεμβράνης που χρησιμοποιούνται είναι το NaHSO_3 (sodium-bisulfite=SBS)⁷, (1%), και φορμαλδεΰδη, 0,5% - 3% (w/w), (για τη χρήση της φορμαλδεΰδης απαιτούνται μέτρα προφύλαξης λόγω της δυνητικής καρκινογένειάς της), (Best Practices, Reverse Osmosis Plant Operation, PermaCare). Σημειώνεται ότι, η εμβάπτιση της μεμβράνης σε νερό με ποιότητα νερού διηθήματος, μπορεί να διαλύσει υπάρχουσες επικαθήσεις, (Bates, IWC-98-08).

2.6.3. Αποτέλεσμα του 'fouling' στην απόδοση - Παράδειγμα μονάδας στην Οία

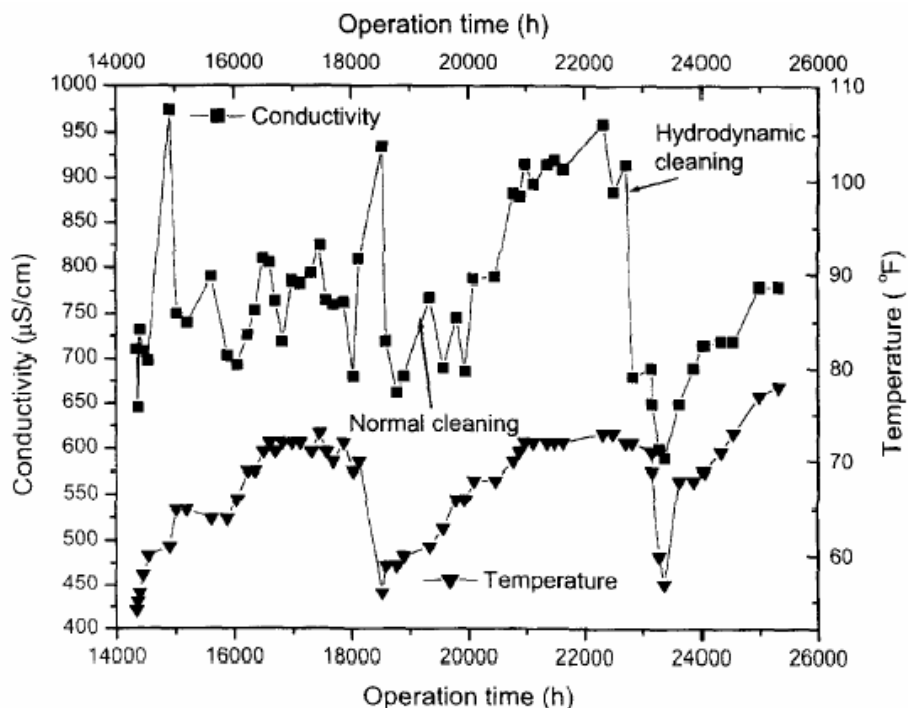
Οι επικαθήσεις στη μεμβράνη μπορούν να συμβάλουν στη μείωση της παροχής του παραγόμενου νερού, στην αύξηση της πτώσης πίεσης εκατέρωθεν της μεμβράνης, στην αύξηση της αγωγιμότητας του παραγόμενου ύδατος, και στην επόμενη αναγκαστική αύξηση της πίεσης τροφοδοσίας (λόγω αύξησης της οσμωτικής πίεσης τροφοδοσίας), προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η ποιότητα και ποσότητα της παραγωγής. Η απόδοση της εγκατάστασης Αντίστροφης Όσμωσης στη Σαντορίνη, με δυναμικότητα παραγωγής $400 \text{ m}^3/\text{d}$, παρακολουθήθηκε επί μακρά χρονική περίοδο. Μετά 10.000 h λειτουργίας, βρέθηκε ότι ο ρυθμός ροής παραμένει μικρότερος από το μέγιστο επιτρεπτό ρυθμό ροής $14 \text{ m}^3/\text{h}$ (62 gpm). Τα αποτελέσματα για το ρυθμό ροής και την ποιότητα διηθήματος, παρουσιάζονται αντίστοιχα στα σχήματα 2.13 και 2.14. Πρόσθετα στα σχ. 2.13, 2.14, παρουσιάζονται οι μεταβολές της θερμοκρασίας της τροφοδοσίας, οι οποίες επηρεάζουν το ρυθμό ροής του διηθήματος (αύξηση περατότητας της μεμβράνης με την αύξηση της θερμοκρασίας) και την ποιότητα παραγωγής. Από το σχήμα 2.13,

⁷ Τα Sodium Bisulfite, Sodium Meta-bisulfite ή Sodium Sulfite μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποχλωρίωση του νερού της τροφοδοσίας. Η απομάκρυνση του χλωρίου στην τροφοδοσία είναι απαραίτητη στις πολυαμιδικές μεμβράνες, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaHSO}_3$ (2 moles of Sodium Bi-sulfite).

διακρίνεται ότι η μονάδα, έπειτα από υδροδυναμικό καθαρισμό, επανέρχεται στην αρχική της απόδοση λειτουργίας. Το σχήμα 2.14 δείχνει ότι η ποιότητα του διηθήματος είναι σταθερή με μέση τιμή $600 \mu\text{S}/\text{m}^3$, στις πρώτες 6.000 ώρες λειτουργίας, στη συνέχεια όμως, λόγω παρατεταμένης λειτουργίας της μεμβράνης, η αγωγιμότητα αυξάνεται. Η αγωγιμότητα του διηθήματος περιορίζεται με τον υδροδυναμικό καθαρισμό, όμως λόγω βαθμιαίας γήρανσης της μεμβράνης, η συχνότητα αύξησης της αγωγιμότητας είναι μεγαλύτερη (Avlonitis et al., 2003).



Σχήμα 2.13: Πυκνότητα ροής παραγωγής, (Avlonitis et al., 2003).



Σχήμα 2.14: Ποιότητα παραγωγής, (Avlonitis et al., 2003).

2.7. Παράγοντες σχεδιασμού και λειτουργίας RO

Οι παράγοντες που πρέπει να συνυπολογίζονται κατά το σχεδιασμό και τη λειτουργία ενός συστήματος Αντίστροφης Όσμωσης (Bates, IWC-98-08) είναι:

1. Η ποιότητα του υδατικού διαλύματος τροφοδοσίας: Με την πλήρη χημική ανάλυση του νερού τροφοδοσίας αναγνωρίζονται οι δυσμενείς παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία ή/και τη διάρκεια ζωής της μεμβράνης. Πρόσθετα, με την ποιοτική ανάλυση του εισαγόμενου υδατικού διαλύματος, δύναται να παρακολουθείται η απόδοση της μονάδας. Οι προτεινόμενοι παράμετροι ανάλυσης ποιότητας νερού δίνονται στον πίνακα 2.6.

Πίνακας 2.6: Προτεινόμενοι παράμετροι ανάλυσης ποιότητας νερού τροφοδοσίας, (Watson et al., 2003).

Constituent		
Cations(+)	Anions (-)	Other constituents
Calcium	Carbonate	TDS
Magnesium	Bicarbonate	pH
Sodium	Sulfate	Silica
Potassium	Chloride	SDI
Ammonium	Nitrate	Alkalinity
Barium	Fluoride	Color
Strontium	Total phosphate	Total organic carbon
Iron	Orthophosphate	Dissolved organic carbon
Manganese	Bromide	Conductivity
Aluminum		Turbidity
Copper		Temperature
Lead		Boron
Zinc		Standard plate count
Chromium		Yeast and mold count
		Total coliform
		Sulfide generating bacteria
		Total suspended solids

2. Προεπεξεργασία: Η απαιτούμενη προεπεξεργασία του νερού τροφοδοσίας ορίζεται από τη χημική ανάλυση της τροφοδοσίας. Η προεπεξεργασία (αποσκλήρυνση, απολύμανση, αποχλωρίωση κ.λπ.) έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους καθαρισμού ή/και ανικατάστασης της μεμβράνης.
3. Επιλογή του τύπου και του υλικού κατασκευής της μεμβράνης: Η επιλογή μεγαλύτερης δυνατής επιφάνειας με μικρότερο δυνατό πάχος, συνεπάγεται τον περιορισμό φαινομένων επικαθήσεων, οι οποίες μειώνουν την αποδοτικότητα της μονάδας. Επίσης σημειώνεται ότι πρέπει να δίνεται προσοχή στη συμβατότητα της μεμβράνης με το νερό τροφοδοσίας και τα χημικά προεπεξεργασίας.
4. Πυκνότητα ροής (Q/A_{active}): Η έκταση ‘fouling’ στην επιφάνεια της μεμβράνης είναι συνάρτηση της πυκνότητας ροής του διηθήματος. Χαμηλότερη πυκνότητα ροής, σημαίνει μικρότερο ‘fouling’ στην επιφάνεια της μεμβράνης. Το ‘fouling’ ενισχύεται με την αύξηση της πυκνότητας ροής, (μείωση της επιφάνειας της μεμβράνης), με αποτέλεσμα την πυκνότερη συγκέντρωση διαλυμένων στερεών στην επιφάνεια της μεμβράνης, και την αναγκαιότητα εφαρμογής μεγαλύτερης πίεσης στη μεμβράνη.
5. Εφαπτομενική ταχύτητα ροής (cross flow velocity): Όσο μεγαλύτερη είναι η εφαπτομενική ταχύτητα ροής, τόσο μικρότερος είναι ο βαθμός ‘fouling’. Οι αποθέσεις απομακρύνονται με ξέπλυμα (flushing) τις επιφάνειας της μεμβράνης, δηλαδή, εφαρμογή χαμηλών πιέσεων και υψηλότερων παροχών συμπυκνώματος.
6. ‘Ξέπλυμα’ και κλείσιμο συστήματος: Οι βιολογικές επικαθήσεις μπορεί να αυξηθούν σημαντικά, όταν το σύστημα βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Η μεμβράνη θα πρέπει να

ξεπλένεται στο κλείσιμο της συσκευής, στο ξεκίνημα, καθώς και περιοδικά, όσο βρίσκεται σε 'standby' για να απομακρύνονται υπάρχουσες αποθέσεις. Οι καλύτερες χαμηλές πιέσεις ,για το ξέπλυμα της μεμβράνης (flushing), εμφανίζονται σε υψηλές εφαιπτομενικές ταχύτητες, με χρήση νερού που αντιστοιχεί στην ποιότητα του διηθημένου νερού.

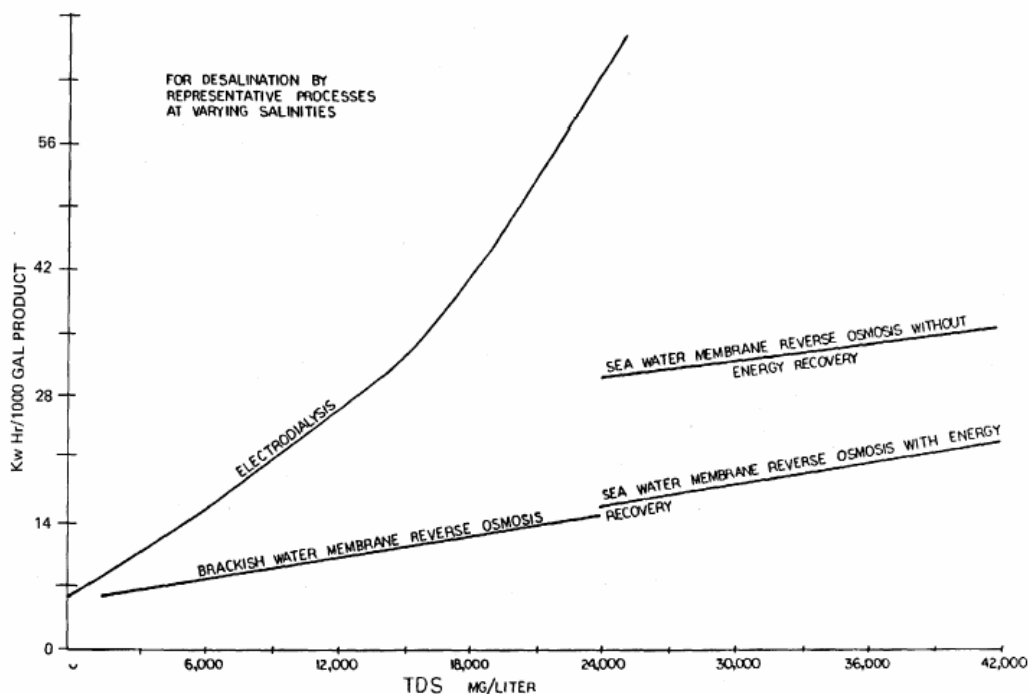
7. Αναγωγή μετρήσεων στην πίεση και θερμοκρασία σχεδιασμού: Το αρχείο πειραματικών μετρήσεων πρέπει να ανάγεται στις συνθήκες πίεσης/θερμοκρασίας σχεδιασμού μέσω συντελεστών διόρθωσης πίεσης-θερμοκρασίας, αντίστοιχα. Η αναγωγή των παραμέτρων (παροχή διηθήματος, λόγος απομάκρυνσης), επιτρέπει τον υπολογισμό της πραγματικής απόδοσης του συστήματος καθώς και την εκτίμηση του βαθμού 'fouling', με τη σύγκριση των υφιστάμενων συνθηκών λειτουργίας με εκείνες της πρώτης μέρας λειτουργίας.
8. Ορθή στρατηγική καθαρισμού: Κατάλληλες υδροδυναμικές συνθήκες, κατάλληλο καθαριστικό διάλυμα και χρόνο καθαρισμού. Η μονάδα καθαρίζεται όταν, η ανηγμένη πτώση πίεσης εκατέρωθεν της μεμβράνης, έχει αυξηθεί κατά 15%, ο ανηγμένος ρυθμός ροής διηθήματος έχει μειωθεί κατά 15%, και το ανηγμένο ποσοστό απομάκρυνσης έχει μειωθεί κατά 15%.

2.8.Κατανάλωση ενέργειας RO

Το κόστος λειτουργίας μιας μονάδας Αντίστροφης Όσμωσης περιλαμβάνει το κόστος ενέργειας, το κόστος καθαρισμού/αντικατάστασης μεμβράνης, το κόστος προεπεξεργασίας της τροφοδοσίας, το κόστος άντλησης του νερού τροφοδοσίας καθώς και το κόστος διάθεσης του απόβλητου νερού.

Η κατανάλωση ενέργειας σε μια εγκατάσταση RO, είναι συνάρτηση των ολικών διαλυμένων στερεών στην τροφοδοσία (TDS). Η συγκέντρωση των ολικών διαλυμένων στερεών ορίζει την οσμωτική πίεση του υδατικού διαλύματος προς επεξεργασία, άρα και την επιλογή της πίεσης εφαρμογής από την αντλία λειτουργίας (Technical manual 5-813-8, 1986). Η συνολική κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται σε kWh/m³ αφαλατωμένου ύδατος. Η θεωρητική κατανάλωση ενέργειας, ανά κυβικό μέτρο αφαλατωμένου ύδατος από θαλασσινό νερό, υπολογίζεται μικρότερη από 1 kWh/m³, εκτίμηση ανεξάρτητη της μεθόδου αφαλάτωσης (Spiegler, 1977; Spiegler et al., 2001). Ο Wade έχει καταλήξει ότι,

στις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης με δυναμικότητα παραγωγής 31,822 m³/d, η κατανάλωση ενέργειας για διάφορες διεργασίες αφαλάτωσης είναι: 51,7 kWh/m³ για την πολυβάθμια απόσταξη (Multistage Flush Distillation, MSF), 45 kWh/m³ για την Multi Effect Distillation (MED) και 8-6,7 kWh/m³ για την Αντίστροφη Όσμωση (RO), (Wade, 2001). Στην περίπτωση που η αντίστροφη όσμωση χρησιμοποιείται με σύστημα ενεργειακής ανάκτησης, η συγκεκριμένη κατανάλωση ενέργειας περιορίζεται στις 5,09 kWh/m³, (Darwish et al., 2002). Περισσότερα δεδομένα για την κατανάλωση ενέργειας στις μονάδες RO, έχουν παρουσιαστεί από G.F. Leitner (Leitner, 1998), όπου η κατανάλωση ενέργειας για τις εγκαταστάσεις SWRO, είναι μεταξύ 3,7-5,3 kWh/m³. Αναφέρεται ότι στην περίπτωση της Δανίας, όπου το θαλασσινό νερό πρέπει να προθερμαίνεται, η κατανάλωση ενέργειας είναι υψηλότερη και ίση με 8,3 kWh/m³, (Hinge et al., 1996). Στις ελληνικές εγκαταστάσεις SWRO, η κατανάλωση ενέργειας έχει υπολογιστεί περίπου ίση με 5 kWh/m³, (Avlonitis, 2003). Στο σχήμα 2.15 φαίνεται, η κατανάλωση ενέργειας συναρτήσει της συγκέντρωσης ολικών διαλυμένων στερεών (TDS (mg/l)) στο νερό τροφοδοσίας, (Technical manual 5-813-8, 1986).



Σχήμα 2.15: Κατανάλωση ενέργειας⁸ συναρτήσει της ποιότητας του νερού τροφοδοσίας, (TDS (mg/l)), (Technical manual 5-813-8, 1986).

⁸ 1000 GAL=3,79 m³

Το κόστος αντικατάστασης μεμβρανών, όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 2.7, σχετίζεται με τη δυναμικότητα παραγωγής και τον πραγματικό χρόνο λειτουργίας των εγκαταστάσεων. Όσο υψηλότερη είναι η δυναμικότητα παραγωγής και ο χρόνος λειτουργίας, τόσο μικρότερο το κόστος της μεμβράνης. Το μέσο κόστος αντικατάστασης για 8-inch μεμβράνη, θεωρείται περίπου ίσο με 1500€/μονάδα μεμβράνης σπειροειδούς διαμόρφωσης και ~6000€/μονάδα μεμβράνης κοίλων ινών.

Πίνακας 2.7: Κόστος αντικατάστασης μονάδας μεμβράνης SWRO (Avlonitis, 2003).

Location	Membrane life, years	Operation time, h	Water production, m ³	Replacement cost, €	Specific membrane cost, €/m ³
Oia	4	11,303	188,383	54,000	0.29
Oia	5	21,900	164,250	21,000	0.13
Oia	5	21,900	273,750	36,000	0.13
Ios	5	21,900	456,250	54,000	0.12
Ithaki	5	39,420	985,500	108,000	0.11
Syros	5	39,420	952,650	36,000	0.04
Mykonos	5	39,420	821,250	108,000	0.13

2.9.Εναλλακτικό σύστημα RO - Υποβρύχιο σύστημα

Η βασική λειτουργική διαφορά ανάμεσα στη συμβατική (επίγεια) και στην υποβρύχια μονάδα αντίστροφης όσμωσης (RODSS, Reverse Osmosis Deep Sea System), είναι η εκμετάλλευση της υδροστατικής πίεσης του θαλασσινού νερού στο σύστημα RODSS, η οποία λειτουργεί ως δρώσα δύναμη στη διεργασία RO. Το αφαλατωμένο νερό που παράγεται σε πίεση περίπου ατμοσφαιρική, συλλέγεται σε υποβρύχια δεξαμενή, σε ένα βάθος 500 m, και αντλείται μέσω αντλίας υψηλής πίεσης στην επιφάνεια της θαλάσσης. Η παραγόμενη άλμη, μέσω αντλίας χαμηλής πίεσης, απόμακρύνεται από τη μονάδα σε απόσταση περίπου 5-10 m μακριά, εμποδίζοντας τη συμπύκνωση της τροφοδοσίας. Το εναλλακτικό αυτό σύστημα μειώνει στο 50% την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των επίγειων εγκαταστάσεων RO (περίπου 2-2,5 kWh/m³), αφού χρησιμοποιείται αντλία μόνο για τη μεταφορά και συλλογή του αφαλατωμένου ύδατος, κατά συνέπεια να μειώνεται το ποσοστό άντλησης κατά 55-80%.

Ο βασικός εξοπλισμός μιας RODSS είναι: η μονάδα αφαλάτωσης RO, μονάδα προφίλτρων, αντλία τροφοδοσίας, καλώδιο σύνδεσης για την παροχή ηλεκτρικής

ενέργειας από την ακτή στη βυθισμένη εγκατάσταση, αντλία για το αφαλατωμένο νερό, αγωγός άντλησης αφαλατωμένου νερού, αγωγός τροφοδοσίας και αγωγός απομάκρυνσης άλμης. Σχέδιο μιας μονάδας RODSS παρουσιάζεται στο σχήμα 2.16.

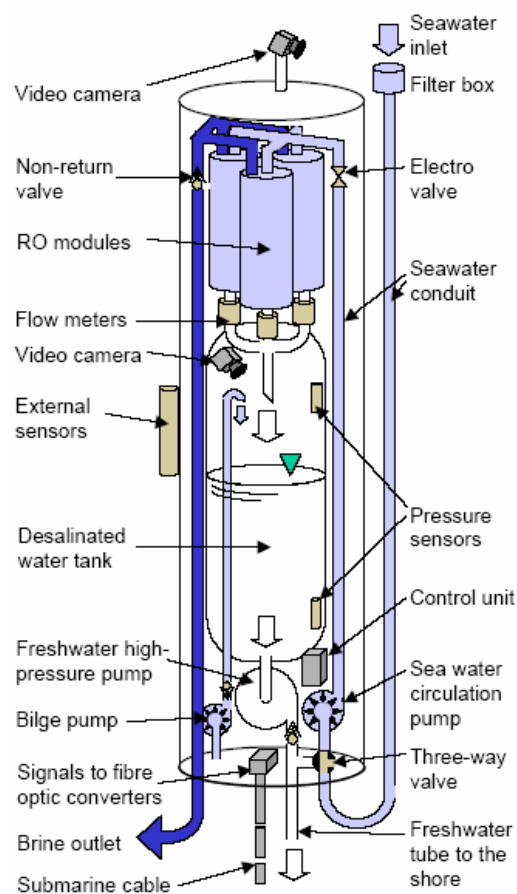
Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας RODSS είναι (Pacentia et al., 1999):

1. Οι μονάδες λειτουργούν κατά προσέγγιση με τη μισή ηλεκτρική ενέργεια απ' αυτή που απαιτείται στις συμβατικές εγκαταστάσεις για ισοδύναμες ποσότητες αφαλατωμένου ύδατος ($\sim 2 \text{ kWh/m}^3$ αντί $\sim 4 - 5 \text{ kWh/m}^3$), αφού η υδροστατική πίεση της θαλάσσης στο δεδομένο βάθος, εξουδετερώνει την ανάγκη χρήσης αντλίας υψηλής πίεσης στο ρεύμα τροφοδοσίας.
2. Οι οσμωτικές μεμβράνες λειτουργούν καλύτερα και έχουν αυξημένη διάρκεια ζωής αφού ο συντελεστής μετατροπής είναι μειωμένος (0,10-0,30 αντ' αυτού στις συμβατικές 0,35-0,45).
3. Δεν απαιτείται καμία χημική προεπεξεργασία του νερού τροφοδοσίας, αφού το θαλάσσιο ύδωρ είναι απαλλαγμένο από οργανική και ανόργανη ύλη, η οποία οδηγεί σε βιολογική επικάλυψη στη μεμβράνη.
4. Ο θόρυβος περιορίζεται σημαντικά σε σχέση με αυτό των συμβατικών εγκαταστάσεων.

Τα ακόλουθα χαρακτηριστικά γνωρίσματα είναι επίσης αξιοσημείωτα:

5. Αποτρέπονται φαινόμενα διακύμανσης πίεσης, αφού χρησιμοποιείται αντλία χαμηλής πίεσης για την κυκλοφορία τροφοδοσίας/άλμης.
6. Το παραγόμενο ύδωρ της υποβρύχιας μονάδας, είναι καλύτερης ή ανάλογης ποιότητας, για ισοδύναμα επίπεδα πίεσης, με το ύδωρ που παράγεται στις συμβατικές εγκαταστάσεις.

Γίνεται λοιπόν σαφές από τα παραπάνω ότι, το μεγαλύτερο μέρος της απαιτούμενης ηλεκτρικής στην RODSS καταναλώνεται για την άντληση του παραγόμενου αφαλατωμένου νερού από το βάθος της θάλασσας μέχρι την επιφάνειά της, ενώ σχετικά μικρή είναι η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την κυκλοφορία της τροφοδοσίας και της άλμης στο σύστημα. Στο παράρτημα της εργασίας, παρατίθεται παράδειγμα σχεδιασμού υποβρύχιας μονάδας RO.



Σχήμα 2.16: Υποβρύχια μονάδα Αντίστροφης Όσμωσης (Pacentia et al., 1999).

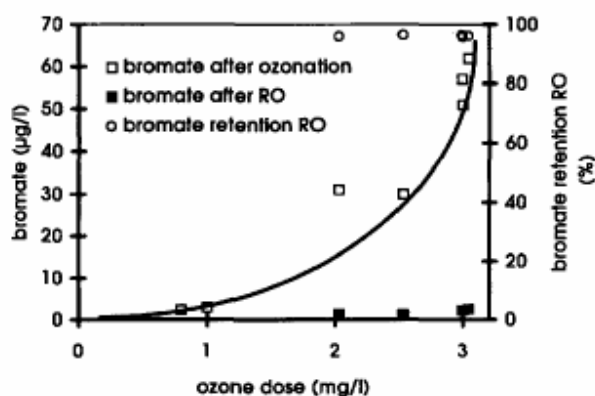
2.10. Εναλλακτική εφαρμογή RO - Έλεγχος παραπροϊόντων απολύμανσης με όζον

Από πειράματα που διεξήχθησαν, (Van der Hoek et al., 1998) διαπιστώθηκε βαθμός συγκράτησης βρωμικών ιόντων, $r = (1 - \frac{C_p}{C_r})$, των μεμβρανών RO (Toray membranes, type SU710L), ίσος με 96%. Λαμβάνοντας υπόψη όριο αποδεκτής συγκέντρωσης βρωμικών 5 $\mu\text{g/l}$, συνεπάγεται ότι η τροφοδοσία της μονάδας RO, μπορεί να έχει μια συγκέντρωση βρωμικών ιόντων, ακόμα και 125 mg/l , επιτρέποντας επομένως εφαρμογή δόσης όζοντος πάνω από 3 mg/l (βλ. πίν. 2.8).

Πίνακας 2.8: Απολύμανση με οζόνωση (Van der Hoek et al., 1998).

Ozone dose, mg/l	CT, mg.min/l	Bromate formation, μg/l
1.1	3.5	9.9
2.1	15	50
2.8	22	75

Το σχήμα 2.17 παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ της δόσης όζοντος με τα σχηματιζόμενα βρωμικά ιόντα (BrO_3^-) και τη συγκράτηση βρωμικών από τη μεμβράνη RO, (Van der Hoek et al., 1998).



Σχήμα 2.17: Σχηματισμός βρωμικών συναρτήσει δόσης όζοντος και βαθμός συγκράτησης βρωμικών από μεμβράνη RO (Van der Hoek et al., 1998).

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Η πειραματική διάταξη Αντίστροφης Όσμωσης, (μοντέλο RO-E2-0375-DLX5 της εταιρείας GE OSMONICS), παρουσιάζεται στη φωτογραφία 3.1, στην οποία διαφαίνεται η μπροστινή και πίσω όψη της εγκατάστασης. Η μονάδα λειτουργεί με σταθερή μέγιστη παραγωγή 1,4 l/min ($\sim 2 \text{ m}^3/\text{d}$) και αποτελείται από τα εξαρτήματα, όπως καταγράφονται στον πίνακα 3.1.



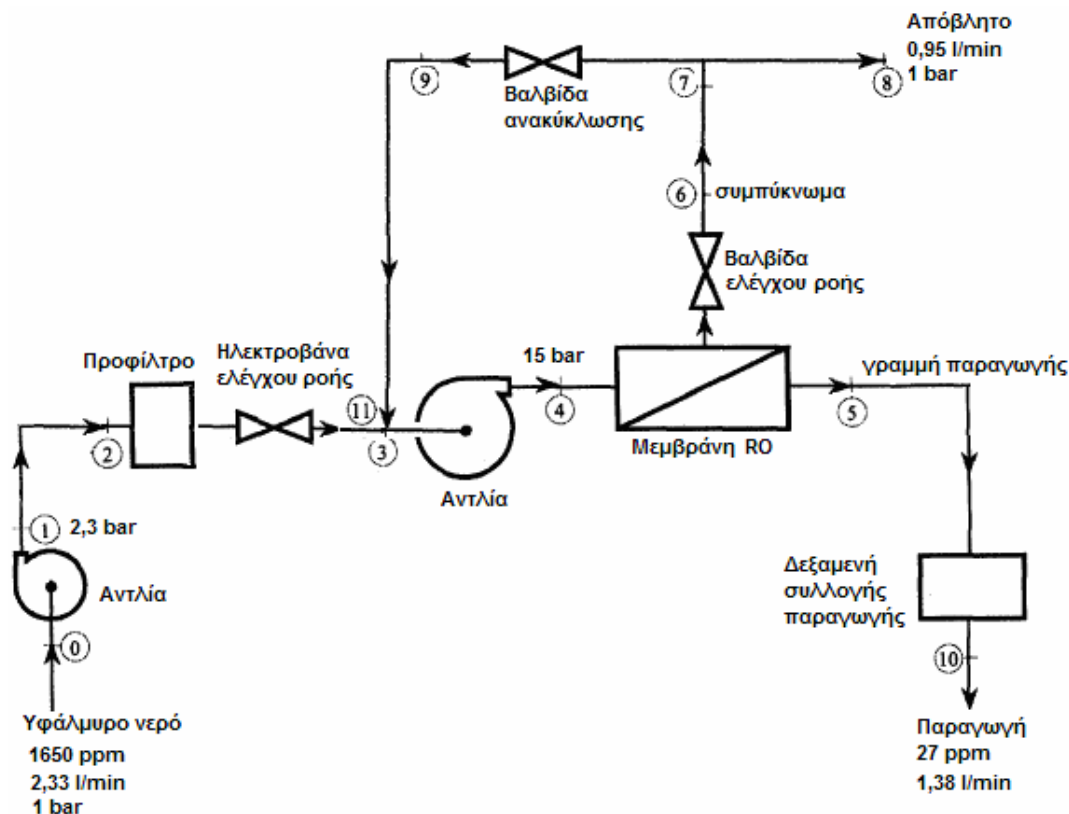
Φωτογραφία 3.1: Η μπροστινή και η πίσω όψη της εργαστηριακής εγκατάστασης RO.

Πίνακας 3.1: Μέρη συστήματος RO δυναμικότητας 1,4 l/min ($\sim 2 \text{ m}^3/\text{d}$).

-
1. Τροφοδοτική αντλία 2,3 bar (= 30psi)
 2. Μανόμετρο χαμηλής πίεσης.
 3. Προφίλτρο (HYTREX, 5 μm , spun polypropylene).
 4. Αντλία υψηλής πίεσης 15bar (= 220psi).
 5. Μανόμετρο υψηλής πίεσης.
 6. Μονάδα Μεμβράνης αντίστροφης όσμωσης.
 7. Βαλβίδα ελέγχου ροής συμπυκνώματος.
 8. Βαλβίδα ρύθμισης ανακύκλωσης συμπυκνώματος.
 9. Αγωγιμόμετρο ελέγχου ποιότητας παραγόμενου νερού.
 10. Μετρητής παροχής παραγόμενου νερού.
 11. Μετρητής παροχής απόβλητου νερού.
 12. Ηλεκτροβάννα ελέγχου ροής στο σύστημα.
-

3.1.Περιγραφή διαγράμματος ροής

Το διάγραμμα ροής της εργαστηριακής μονάδας παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής διεργασίας Αντίστροφης Όσμωσης.

Η τροφοδοσία (υφάλμυρο νερό) αντλείται με πίεση περίπου ίση με 2,3 atm, μέσω ενός πιεστικού (1), από τη δεξαμενή τροφοδοσίας (0) στο προφίλτρο (2). Το προφίλτρο, με διάμετρο πόρων 5 μm , απομακρύνει τα αιωρούμενα στερεά του υδατικού διαλύματος τροφοδοσίας. Ακολούθως, το προεπεξεργασμένο νερό με την πίεση που έχει, οδηγείται στο σημείο εισόδου της αντλίας υψηλής πίεσης (3). Η αντλία υψηλής πίεσης, εξασφαλίζει την αναγκαία πίεση για την εφαρμογή της αντίστροφης όσμωσης. Κατόπιν, το προεπεξεργασμένο, συμπιεσμένο ρεύμα τροφοδοσίας (4), διέρχεται από τη μεμβράνη, από την οποία προκύπτουν δύο ρεύματα, το ρεύμα του διηθήματος (5) και το ρεύμα του συμπυκνώματος (6). Το διήθημα περνάει στη γραμμή παραγωγής και συλλέγεται σε μια δεξαμενή (10). Η ποσότητα του συμπυκνώματος (6), ρυθμίζεται με την βαλβίδα ελέγχου ροής συμπυκνώματος. Αυτή η ποσότητα του συμπυκνώματος (6), μέσω της βαλβίδας ανακύκλωσης συμπυκνώματος, διαχωρίζεται σε δύο ρεύματα (7), το ρεύμα των

αποβλήτων (8), και το ρεύμα ανακυκλοφορίας (9). Στο ρεύμα ανακυκλοφορίας, μέρος του συμπυκνώματος ανακυκλοφορεί στο σύστημα και οδηγείται στο σημείο εισόδου της αντλίας υψηλής πίεσης (11), όπου ενώνεται μαζί με το ρεύμα τροφοδοσίας.

Οι βαλβίδες ελέγχου ροής και ανακύκλωσης συμπυκνώματος, ουσιαστικά ελέγχουν και διανέμουν την ποσότητα του συμπυκνώματος. Πιο συγκεκριμένα:

1. Βαλβίδα ελέγχου ροής συμπυκνώματος: Η βαλβίδα ελέγχου ροής συμπυκνώματος, ρυθμίζει την ποσότητα του απόβλητου νερού. Κλείνοντας τη βαλβίδα, αυξάνεται η πίεση εφαρμογής στη μεμβράνη και μειώνεται η παροχή συμπυκνώματος. Από την άλλη μεριά, ανοίγοντας τη βαλβίδα, μειώνεται η υψηλή πίεση εφαρμογής στην μεμβράνη, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η εφαπτομενική ταχύτητα του νερού κατά μήκος της μεμβράνης. Το υδροδυναμικό καθαρίσμα της μεμβράνης, δηλαδή, το ξέπλυμα μεμβράνης για την απομάκρυνση των επιφανειακών επικαθίσεων, πετυχαίνεται με το άνοιγμα της συγκεκριμένης βαλβίδας.
2. Βαλβίδα ανακύκλωσης συμπυκνώματος: Η συγκεκριμένη βαλβίδα ρυθμίζει τη ποσότητα του απόβλητου νερού, που επιστρέφει στο σημείο εισόδου της αντλίας υψηλής πίεσης (11), όπου συνενώνεται με την τροφοδοσία και οδηγείται στη μεμβράνη.

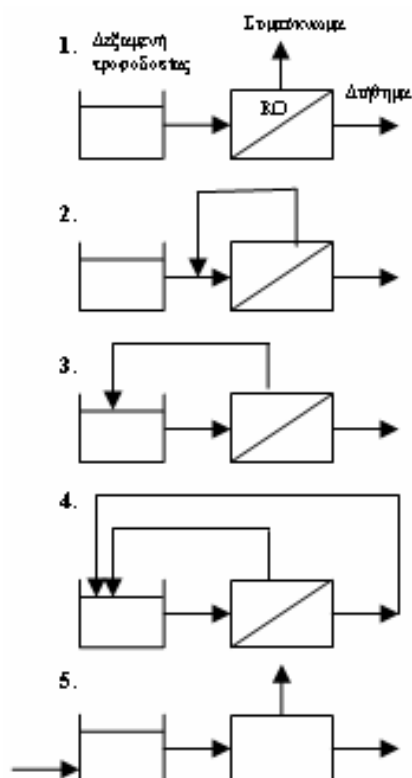
Τονίζεται ότι το πιεστικό, παρέχει πίεση στην τροφοδοσία ίση με 2,3 bar ενώ, η αντλία υψηλής πίεσης, πίεση ίση με 15,3 bar. Η διήθηση είναι εφαπτομενική, δηλαδή η τροφοδοσία μεταφέρεται παράλληλα προς τη μεμβράνη.

Υπάρχουν πέντε τρόποι λειτουργίας της εργαστηριακής μονάδας RO, (βλ. σχήμα 3.2):

1. Μη συνεχής λειτουργία (batch), χωρίς συμπύκνωση της τροφοδοσίας: το διήθημα (ή πέρασμα) συλλέγεται, ενώ το υπόλειμμα οδηγείται στη γραμμή αποβλήτων, όπου απορρίπτεται. Κατά τη λειτουργία, η βαλβίδα ανακυκλοφορίας είναι κλειστή.
2. Μη συνεχής λειτουργία, και συμπύκνωση της τροφοδοσίας στο σημείο εισόδου της αντλίας υψηλής πίεσης: Αυτό επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση της βαλβίδας ανακυκλοφορίας, η οποία επιστρέφει σταθερή ποσότητα συμπυκνώματος στο σημείο εισόδου της αντλίας υψηλής πίεσης.
3. Μη συνεχής λειτουργία, και συμπύκνωση της τροφοδοσίας στη δεξαμενή τροφοδοσίας: Το διήθημα συλλέγεται, ενώ το υπόλειμμα επιστρέφει στη δεξαμενή τροφοδοσίας (μηδενικά απόβλητα), με αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης

του διαλύματος στη δεξαμενή τροφοδοσίας. Στην περίπτωση αυτή όπου το νερό τροφοδοσίας δεν έχει σταθερή ποιότητα, λαμβάνεται δείγμα τροφοδοσίας καθώς και δείγμα διηθήματος κάθε λεπτό, και μελετάται η μεταβολή της απόδοσης της μονάδας συναρτήσει της χρονικά μεταβαλλόμενης ποιότητας τροφοδοσίας. Κατά τη λειτουργία, συνίσταται η χρήση αναδευτήρα, προκειμένου η συγκέντρωση του νερού τροφοδοσίας στη δεξαμενή, να είναι ομοιόμορφη. Κατά τη λειτουργία, η βαλβίδα ανακυκλοφορίας είναι κλειστή.

4. Σταθερή κατάσταση λειτουργίας, (steady state): Όταν το διήθημα δεν καλύπτει τις δεδομένες προδιαγραφές ποιότητας, απορρίπτεται στη γραμμή αποβλήτων ή επιστρέφει στη δεξαμενή τροφοδοσίας. Στην περίπτωση που το διήθημα και το υπόλειμμα επιστρέφουν στη δεξαμενή τροφοδοσίας και επανακυκλοφορούν στο σύστημα, ο όγκος της δεξαμενής τροφοδοσίας διατηρείται σταθερός.
5. Συνεχής λειτουργία: Η τροφοδοσία είναι συνεχής. Χρησιμοποιείται στην περίπτωση καθαρισμού της μεμβράνης.



Σχήμα 3.2: Τέσσερις τρόποι λειτουργίας της εργαστηριακής μονάδας RO.

Τα τεχνικά στοιχεία σχεδιασμού και οι προδιαγραφές ποιότητας της τροφοδοσίας δίνονται στους πίνακες 3.2 και 3.3, αντίστοιχα.

Πίνακας 3.2: Τεχνικά στοιχεία σχεδιασμού.

-
- Παροχή παραγωγής: 22 gph (=83 l/h).
 - Πίεση λειτουργίας: 15,2 bar (=220 psi).
 - Συντελεστής ανάκτησης: 50%.
 - Ονομαστική απομάκρυνση άλατος: 95-98%.
 - Παροχή τροφοδοσίας: 37gph (=140 l/h).
 - Πίεση τροφοδοσίας: 2,3 bar (= 30psi).
 - Θερμοκρασία λειτουργίας: 13° C-29° C.
 - Μемβράνη: Desal AG2521TF/AG2540TF, A=0,06284 m².
 - Αντλία: 0,37 KW (=0,5 HP).
 - Ρεύμα: 220V / 50Hz.
-

Πίνακας 3.3: Προδιαγραφές ποιότητας τροφοδοσίας.

-
- Θερμοκρασία σχεδιασμού: 25° C.
 - pH λειτουργίας: 5,5-8,5.
 - Langlier Saturation Index (LSI): 0,1.
 - Έκθεση σε ελεύθερο χλώριο: 0,2 mg/l.
 - Silt Density Index (SDI): 3.
 - Συγκέντρωση σιδήρου: 0,1 mg/l.
-

3.2.Εκκίνηση - παύση μονάδας

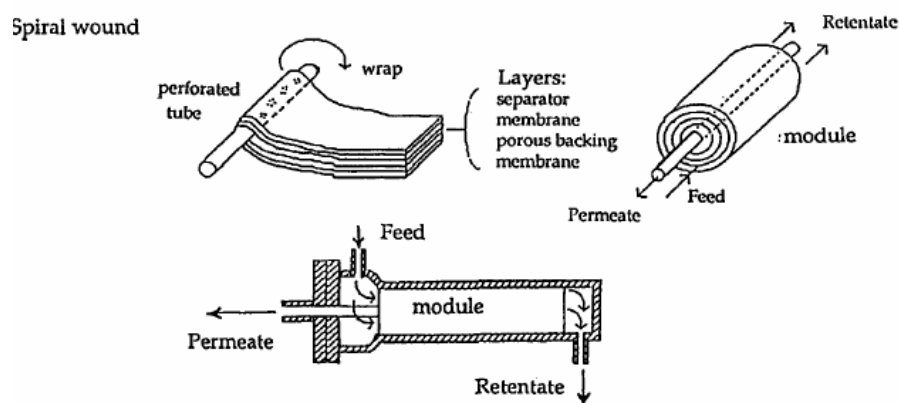
Για να τεθεί σε λειτουργία η μονάδα πρέπει να γίνουν τα εξής:

1. Άνοιγμα, κατά δύο πλήρεις στροφές, της βαλβίδας ελέγχου ροής συμπτκνώματος (7), και της βαλβίδας ανακυκλώσης συμπτκνώματος (8). Οι βαλβίδες συμπτκνώματος και ανακυκλοφορίας, πρέπει να είναι ανοιχτές, κατά την εκκίνηση λειτουργίας, ώστε η μονάδα της μεμβράνης να γεμίσει με νερό χαμηλής πίεσης (< 100 psi) πριν την εφαρμογή της υψηλής πίεσης. Αυτή η αυξανόμενη σταδιακά πίεση (soft start), αποτρέπει ενδεχόμενο υδραυλικό σοκ, το οποίο καταστρέφει τη μεμβράνη.

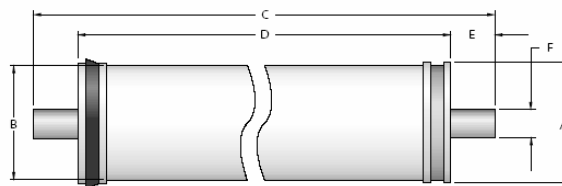
2. Δίνεται κίνηση μέσω του ηλεκτρικού πίνακα, στο πιεστικό τροφοδοσίας και στην αντλία υψηλής πίεσης (4).
3. Άνοιγμα ηλεκτροβάνας ελέγχου ροής.
4. Βαθμιαία προσαρμογή της πίεσης λειτουργίας στην πίεση σχεδιασμού 15,2 bar, μέσω της βαλβίδας ελέγχου ροής συμπυκνώματος και της βαλβίδας ανακύκλωσης, (οπτικός έλεγχος πίεσης από το μανόμετρο υψηλής πίεσης (5)).
5. Για την πάυση της μονάδας, ανοίγεται η βαλβίδα ελέγχου ροής συμπυκνώματος, για την επίτευξη βαθμιαίας μείωσης της πίεσης στη μεμβράνη και ακολούθως, κλείνεται η ηλεκτροβάνα ελέγχου ροής, η οποία διακόπτει τη λειτουργία της μονάδας.

3.3.Στοιχεία μεμβράνης

Η μεμβράνη (Desal AG2521TF ή AG2540TF) της εργαστηριακής διάταξης Αντίστροφης Όσμωσης είναι σπειροειδούς διαμόρφωσης (spiral wound), κατασκευασμένη από λεπτό φιλμ πολυαμιδικού υλικού. Ο τύπος καθώς και ο τρόπος λειτουργίας της μεμβράνης σπειροειδούς διαμόρφωσης διακρίνεται στο σχήμα 3.3. Οι διαστάσεις της μονάδας μεμβράνης παρουσιάζονται στο σχήμα 3.4. Η επιφάνεια της μεμβράνης υπολογίστηκε ίση με $A = 0,06284 \text{ m}^2 (= 628,4 \text{ cm}^2)$.



Σχήμα 3.3: Μεμβράνη σπειροειδούς διαμόρφωσης, (IUPAC, 1996).



A: 6,096	B: 5,842	C: 53,34	D: 47,752	E: 2,794	F: 1,905
----------	----------	----------	-----------	----------	----------

Σχήμα 3.4: Διαστάσεις (cm) εργαστηριακής μεμβράνης Αντίστροφης Όσμωσης (AG2521TF), (Osmonics).

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.1 Συλλογή δείγματος

Χρησιμοποιήθηκαν τροφοδοσίες διαφορετικής συγκέντρωσης άλατος, από 350 mg/l μέχρι 1650 mg/l για να εκτιμηθεί η επίδραση της αλατότητας στην απόδοση του συστήματος σε δεδομένες συνθήκες λειτουργίας όπως είναι η πίεση, ο ρυθμός ροής, η ανάκτηση κ.λπ. Συγκεκριμένα συλλέχθηκαν δύο δείγματα, το πρώτο δείγμα, θαλασσινό νερό που συλλέχθηκε στις 9-9-2004 από το Σταυρό Ακρωτηρίου, Χανίων, το οποίο υφίσταντο αραιώση 1/25 προκειμένου να επιτευχθεί μια αλατότητα 1650 mg/l, και το δεύτερο, στις 11-11-2004 το οποίο συλλέχθηκε από το αντλιοστάσιο της λίμνης του Κουρνά που βρέθηκε σχετικά υφάλμυρο νερό⁹.

4.2 Μέθοδοι ανάλυσης

Για τις μετρήσεις των χαρακτηριστικών των νερών εφαρμόστηκαν οι πρότυπες αναλυτικές μέθοδοι (Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Edition).

4.2.1. Αγωγιμότητα

Η αγωγιμότητα είναι μια σημαντική παράμετρος στην αφαλάτωση, αφού σχετίζεται με τα ολικά διαλυμένα στερεά. Όσο υψηλότερη η συγκέντρωση των αλάτων στο νερό (θαλασσινό/υφάλμυρο), τόσο μεγαλύτερη η ικανότητα του νερού να άγει το ρεύμα. Η μέτρηση της αγωγιμότητας έγινε με αγωγιμόμετρο της εταιρείας Cricon.

⁹ Η μειωμένη αλατότητα την ημερομηνία της δειγματοληψίας 11-11-2004 στο αντλιοστάσιο της λίμνης Κουρνά, που υδρεύει την πόλη του Ρεθύμνου, οφείλεται στην αραιώσή του με βρόχινο νερό.

4.2.2. Αλκαλικότητα

Αναλυτικά, η αλκαλικότητα πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο 2320 B “Titration Method”. Η μέθοδος στηρίζεται στην ποτενσιομετρική τιτλοδότηση του νερού με πρότυπο διάλυμα οξέος (H_2SO_4 ή HCl) μέχρι το pH να φτάσει την τιμή 4,5.

4.2.3. Σκληρότητα

Η σκληρότητα μετρήθηκε σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο 2340 C “EDTA Titrimetric Method”.

4.2.4. Διαλυμένος Οργανικός Άνθρακας

Η μέτρηση του διαλυμένου οργανικού άνθρακα πραγματοποιήθηκε με αυτόματο αναλυτή οργανικού άνθρακα (Shimadzu 5000A TOC Analyser). Η συσκευή ουσιαστικά μετράει DOC γιατί το δείγμα εισάγεται στον αναλυτή διηθημένο -με φίλτρο με μέγεθος πόρων 0,45 μm για την απομάκρυνση του σωματιδιακού C-. Η μέτρηση στηρίζεται στην καταλυτική οξείδωση -με παροχή υπερκάθαρου αέρα- σε υψηλές θερμοκρασίες των οργανικών μη πτητικών ενώσεων του νερού σε CO_2 και στη μέτρηση του τελευταίου φασματοφωτομετρικά στην περιοχή του υπέρυφρου (Η απορρόφηση είναι ανάλογη της συγκέντρωσης, νόμος Bier). Ο αναλυτής TOC χρησιμοποιεί δύο μεθόδους υπολογισμού του TC (Total carbon) και του IC (Inorganic carbon) η 1^η μέθοδος μέτρησης χρησιμοποιεί την εξίσωση $TOC+IC=TC \rightarrow TOC=TC-IC$, η οποία εφαρμόζεται στην περίπτωση των λυμάτων με την παραδοχή $TOC \gg IC$ και η 2^η μέθοδος υπολογισμού που χρησιμοποιεί την εξίσωση $TOC=NPOC+POC$ με τη θεώρηση ότι $POC=0$ (εφαρμογή ‘sparging’) για το πόσιμο, θαλασσινό και υπόγειο ύδωρ όπως και για την εκροή Ε.Ε.Λ.

4.2.5. Ιοντική χρωματογραφία

Οι συγκεντρώσεις των ιόντων χλωρίου, βρωμίου, φθορίου, νιτρικών και θεικών μετρήθηκαν με τη χρήση της ιοντικής χρωματογραφίας (Dionex DX-500). Η ιοντική χρωματογραφία αποτελείται από τα εξής μέρη: Δοχείο υγρού

έκλουσης¹⁰→Αντλία→Βαλβίδα εισαγωγής δείγματος→Προστήλη→Στήλη→Μεμβράνη Καταστολής→Αγωγιμομετρικός ανιχνευτής→Υπολογιστής. Η ανάλυση των ιόντων Cl^- , SO_4^{2-} του νερού της τροφοδοσίας στην αντίστροφη όσμωση πραγματοποιήθηκε με βρόγχο (loop) περιεκτικότητας 25 μl , επειδή οι συγκεντρώσεις των ιόντων στα νερά είναι μεγάλες. Η ευαισθησία του οργάνου με αυτή τη μέθοδο κυμαινόταν από 10 έως 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ανάλογα με τη συγκέντρωση του προς ανάλυση δείγματος. Τα ιόντα χλωρίου του νερού του διηθήματος μετρήθηκαν με τον ίδιο βρόγχο αλλά με άλλη μέθοδο στην οποία η ευαισθησία ήταν πιο μικρή. Η ανάλυση των ιόντων βρωμίου του διηθήματος πάλι μετρήθηκαν με τον ίδιο βρόγχο αλλά με ακόμα μικρότερη ευαισθησία αγωγιμότητας.

¹⁰ Na_2CO_3 , 9 mM παρασκευαζόταν καθημερινά, με αραιώση από μητρικό διάλυμα μεγαλύτερης συγκέντρωσης.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ

5.1.Ανάλυση ποιότητας Τροφοδοσίας-Διηθήματος

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των υδάτων, τα οποία μετρήθηκαν, αμέσως μετά τις δειγματοληψία και την επεξεργασία με RO, παρουσιάζονται στους πίνακες 5.1 και 5.2. Για τις μετρήσεις των χαρακτηριστικών των νερών, εφαρμόστηκαν πρότυπες αναλυτικές μέθοδοι (Standards Methods for the Examination of Water, 20th Edition). Ο ποιοτικός χαρακτηρισμός των υφάλμυρων υδάτων, καθώς και των διηθημάτων τους, αναφέρεται στη μέτρηση ιόντων Cl^- , Br^- , F^- , SO_4^{2-} , αλατότητας, pH, αγωγιμότητας, σκληρότητας, θολερότητας, αλκαλικότητας και διαλυμένου οργανικού άνθρακα (DOC), (Πίν. 5.1, 5.2).

Πίνακας 5.1: Ανάλυση ποιότητας υπόγειου υφάλμυρου νερού τροφοδοσίας και διηθήματος.

Δείγμα: Συνθετικό υφάλμυρο νερό, από θαλασσινό νερό με αραιώση 1/25. Ημερομηνία δειγματοληψίας: 9-9-2004, Σταυρό Ακρωτηρίου.		
Τρόπος λειτουργίας μονάδας	‘Batch’, χωρίς συμπύκνωση της τροφοδοσίας.	
Πίεση λειτουργίας, psi	220	
Παροχές: Q_c & Q_p , gph	15 & 19	
Ανάκτηση, %	55,9	
Μετρούμενη παράμετρος:	Τροφοδοσία	Διήθημα
Αλατότητα (mg/l)	1756	48,74
pH, 20°C	8	8
Αγωγιμότητα (μS/cm), 25 °C	3020	115,53
Σκληρότητα (mg CaCO_3 /l)	268	-
DOC (mg/l)	1,92	-
Cl^- (ppm)	975,48	27,08
Br^- (ppb)	2502	< 300
F^- (ppb)	-	-
SO_4^{2-} (ppb)	-	-

Πίνακας 5.2: Ανάλυση ποιότητας υπόγειου υφάλμυρου νερού τροφοδοσίας και διηθήματος.

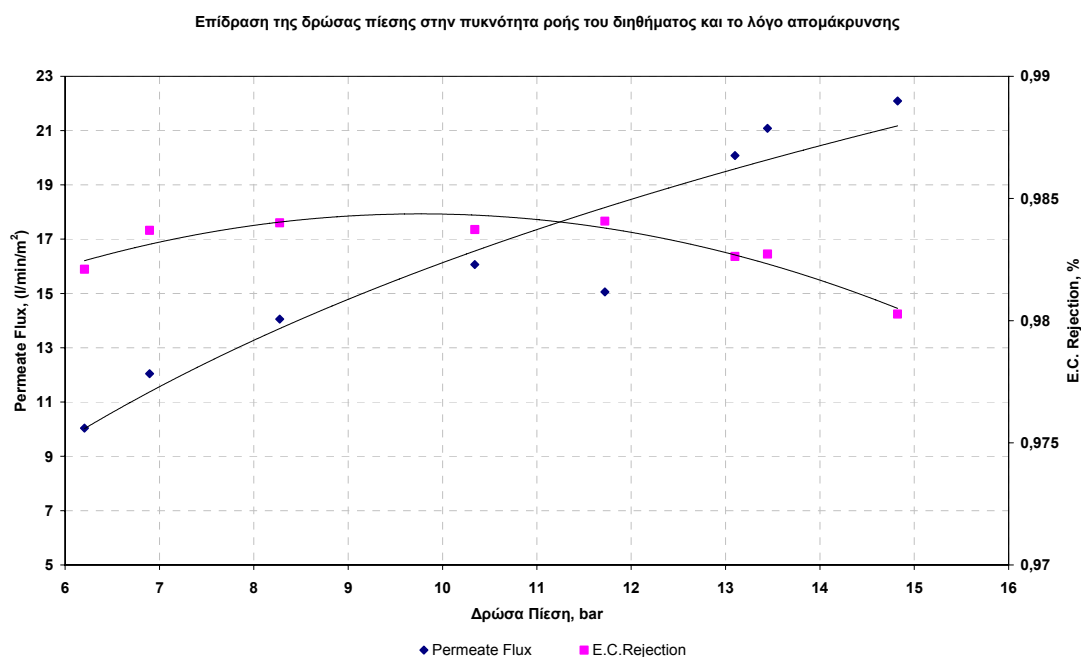
<p>Δείγμα: Υπόγειο υφάλμυρο νερό. Ημερομηνία δειγματοληψίας: 11-11-2004, Αντλιοστάσιο λίμνης Κουρνά.</p>				
Τρόπος λειτουργίας μονάδας		‘Batch’, χωρίς συμπύκνωση τροφοδοσίας.	‘Batch’, χωρίς συμπύκνωση της τροφοδοσίας.	‘Batch’, με συμπύκνωση της τροφοδοσίας στη δεξαμενή.
Πίεση λειτουργίας, psi		220	180	220
Παροχές: Q_c & Q_p , gph		16 & 22	14 & 20	15 & 22
Ανάκτηση, %		57,9	58,8	59,5
Μετρούμενη παράμετρος	Τροφοδοσ.	Διήθημα		
Αλατότητα (mg/l)	374,2	9,3	10,87	13
pH, 20°C	8,15	8	8	8
Αγωγιμότητα (μS/cm), 25°C	1162	19,6	23,6	27
Θολερότητα (NTU)	0,3	-	-	-
Αλκαλικότητα (mgCaCO ₃ /l)	114	-	-	-
Σκληρότητα (mg CaCO ₃ /l)	428	8	12	16
DOC (mg/l)	1,6	-	-	-
Cl ⁻ (ppm)	207,9	5,18	6,038	7,22
Br ⁻ (ppb)	917,66	<100	<100	<100
F ⁻ (ppb)	995,3	<100	131,74	93,51
SO ₄ ²⁻ (ppm)	270,95	473,95 (ppb)	590,96 (ppb)	890,87 (ppb)
NO ₃ ⁻ (ppm)	1,156	-	-	-

5.2. Επίδραση παραμέτρων λειτουργίας στην απόδοση της μονάδας

Όλα τα πειράματα Αντίστροφης Όσμωσης πραγματοποιήθηκαν υπό σταθερό, δεδομένο ρυθμό τροφοδοσίας και δεδομένη πίεση τροφοδοσίας.

5.2.1. Επίδραση της δρώσας πίεσης στην πυκνότητα ροής και στο λόγο απομάκρυνσης

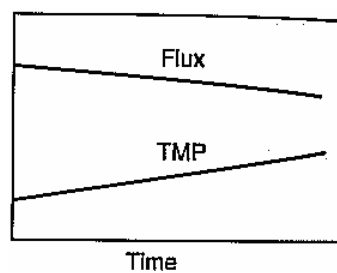
Το σχήμα 5.1 παρουσιάζει την επίδραση της δρώσας πίεσης, στην ποσότητα (πυκνότητα ροής), και την ποιότητα (λόγος απομάκρυνσης) του παραγόμενου διηθήματος, κατά τη 'batch' λειτουργία του συστήματος, χωρίς συμπίκνωση της τροφοδοσίας.



Σχήμα 5.1: Επίδραση της δρώσας πίεσης στο ρυθμό ροής του διηθήματος και στο συντελεστή απομάκρυνσης.

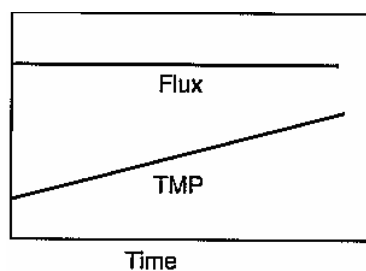
Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, η αύξηση της δρώσας πίεσης (ΔP), οδηγεί στην αύξηση της πυκνότητας ροής του διηθήματος (Q/A_{active}), ή ορθότερα στην αύξηση της παροχής παραγωγής, αφού η ενεργή επιφάνεια της μεμβράνης είναι σταθερή κατά τη 'batch' λειτουργία. Αν είχαμε συνεχή τροφοδοσία στη μονάδα -η οποία δεν ήταν εφικτή, λόγω περιορισμένης ποσότητας τροφοδοσίας- θα οδηγούμαστε σε πιο ολοκληρωμένα

συμπεράσματα, αφού θα συνυπολογιζόταν η μείωση της ενεργής επιφάνειας της μεμβράνης με το χρόνο λειτουργίας. Η μεταβολή της πυκνότητας ροής με τη δρώσα πίεση, συναρτήσει του χρόνου, για συνεχόμενη λειτουργία της μονάδας, παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2. Σύμφωνα με το σχήμα 5.2, η σταδιακή αύξηση της πίεσης, οδηγεί στη βαθμιαία μείωση της πυκνότητας ροής, λόγω βαθμιαίας ανάπτυξης φιλμ στη μεμβράνη, που έχει ως αποτέλεσμα, τη μείωση της ενεργής επιφάνειας της μεμβράνης, και συνεπώς την ελάττωση της παροχής παραγωγής.



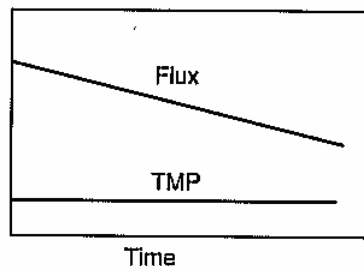
Σχήμα 5.2: Η πυκνότητα ροής και η δρώσα πίεση, συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας, σε μονάδα συνεχής λειτουργίας, (Metcalf & Eddy, 2003).

Στην περίπτωση που επιθυμείται συνεχή λειτουργία της μονάδας με σταθερή πυκνότητα ροής, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3, απλά ρυθμίζεται περιοδικά η δρώσα πίεση. Η ανάγκη αύξησης της δρώσας πίεσης, οφείλεται στη βαθμιαία αύξηση της αντίστασης ροής στη μεμβράνη, λόγω επικαθήσεων σε αυτή.



Σχήμα 5.3: Σταθερή πυκνότητα ροής με ρύθμιση της δρώσας πίεσης, σε μονάδα συνεχής λειτουργίας, (Metcalf & Eddy, 2003).

Από την άλλη, στην περίπτωση που επιθυμείται συνεχή λειτουργία της μονάδας RO, με σταθερή δρώσα πίεση, η καμπύλη πυκνότητας ροής θα έχει πτωτική τάση, όπως διακρίνεται στο σχήμα 5.4.

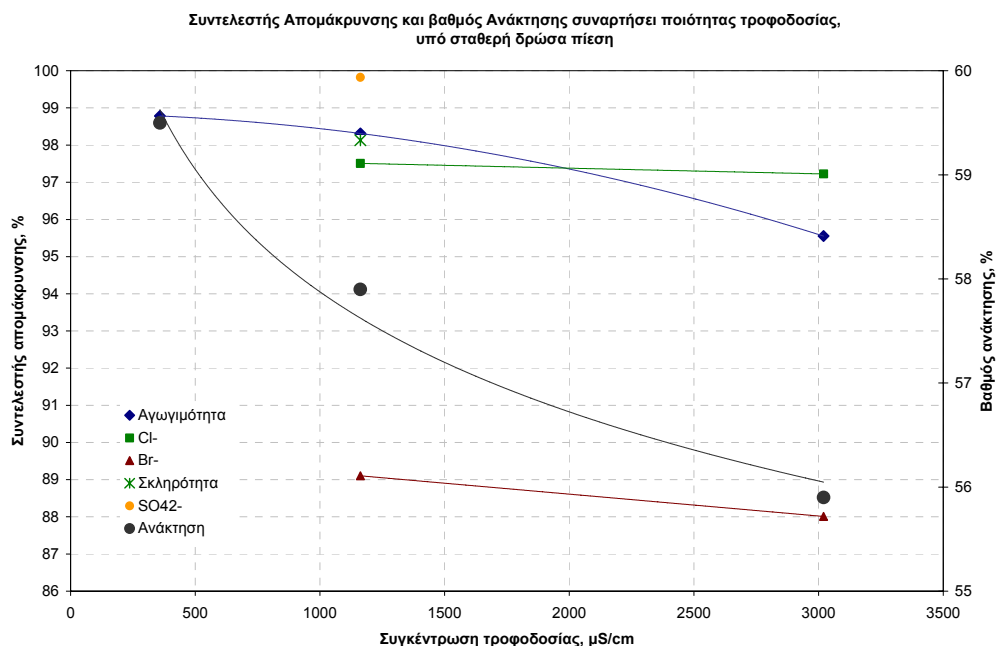


Σχήμα 5.4: Επίδραση της σταθερά ρυθμισμένης δρώσας πίεσης στην πυκνότητα ροής, σε μονάδα συνεχής λειτουργίας, (Metcalf & Eddy, 2003).

Ο λόγος απομάκρυνσης, εκφρασμένος ως προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1, είναι σχεδόν σταθερός, και ανεξάρτητος της δρώσας πίεσης, με τιμή ~ 98,4%. Ωστόσο, στις υψηλές πιέσεις λειτουργίας, ο συντελεστής απομάκρυνσης παρουσιάζει μια μικρή πτώση, η οποία δικαιολογείται με τη μικρή αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας (από 25 σε 27,6 °C). Η αύξηση της θερμοκρασίας, οφείλεται στην θέρμανση του μηχανικού συστήματος (αντλίες λειτουργίας), το οποίο προσδίδει θερμότητα στο νερό τροφοδοσίας, με αποτέλεσμα τη μείωση του ιξώδους του και την αύξηση του πορώδους της μεμβράνης. Οι παραπάνω δύο επιδράσεις της αύξησης της θερμοκρασίας, επιτρέπουν τη μεταφορά, προς στην πλευρά του διηθήματος, μεγαλύτερης ποσότητας ιόντων άλατος.

5.2.2. Επίδραση της ποιότητας τροφοδοσίας στο συντελεστή απομάκρυνσης και στο βαθμό ανάκτησης

Το σχήμα 5.5 παρουσιάζει το συντελεστή απομάκρυνσης -ως προς τις διάφορες παραμέτρους ποιότητας-, και το βαθμό ανάκτησης, συναρτήσει της ποιότητας τροφοδοσίας, υπό σταθερή πίεση, 220 psi, 'batch', και χωρίς συμπύκνωση της τροφοδοσίας λειτουργία.



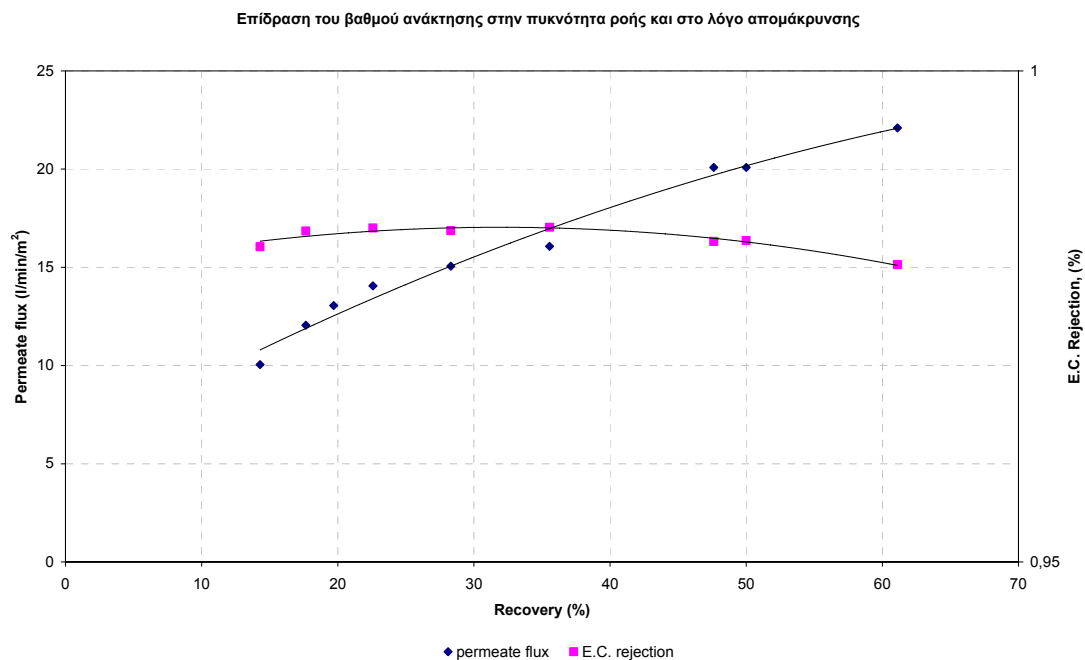
Σχήμα 5.5: Επίδραση της ποιότητας τροφοδοσίας στο συντελεστή απομάκρυνσης, εκφρασμένος ως προς διάφορες παραμέτρους ποιότητας, και στο βαθμό ανάκτησης.

Το σχήμα 5.5, δείχνει ότι ο συντελεστής απομάκρυνσης μειώνεται με την υποβάθμιση της ποιότητας τροφοδοσίας (νερό βρύσης $\sim 300 \mu\text{S/cm}$, υπόγειο υφάλμυρο νερό λίμνης Κουρνά $\sim 1 \text{ mS/cm}$, συνθετικό υφάλμυρο νερό $\sim 3 \text{ mS/cm}$). Πρόσθετα φαίνεται ότι, όσο μεγαλύτερο είναι το ατομικό βάρος του ιόντος προς απομάκρυνση, τόσο αποτελεσματικότερη είναι η απομάκρυνση. Για παράδειγμα η απομάκρυνση των θειϊκών ($\text{MB}=96$) είναι σχεδόν πλήρης, σε σχέση με την απομάκρυνση του χλωρίου ($\text{AB}=35$) και του βρωμίου ($\text{AB}=80$). Επίσης, η απομάκρυνση του χλωρίου είναι καλύτερη από την απομάκρυνση του βρωμίου. Από την άλλη, ο βαθμός ανάκτησης μειώνεται με την υποβάθμιση της ποιότητας τροφοδοσίας, γιατί περιορίζεται η παροχή διηθήματος, λόγω ενίσχυσης των επικαθήσεων στη μεμβράνη.

5.2.3. Επίδραση του βαθμού ανάκτησης στην πυκνότητα ροής και στο λόγο απομάκρυνσης

Η σταδιακή αύξηση του βαθμού ανάκτησης πετυχαίνεται με τη σταδιακή αύξηση της δρώσας πίεσης, (σταδιακό κλείσιμο της βαλβίδας συμπυκνώματος), για 'batch'

λειτουργία του συστήματος, χωρίς συμπύκνωση της τροφοδοσίας. Το σχήμα 5.6 δείχνει ότι, η αύξηση του βαθμού ανάκτησης, οδηγεί στη βαθμιαία αύξηση της παροχής της παραγωγής (ή της πυκνότητας ροής), όσο η τιμή της ενεργής επιφάνειας της μεμβράνης είναι σταθερή.



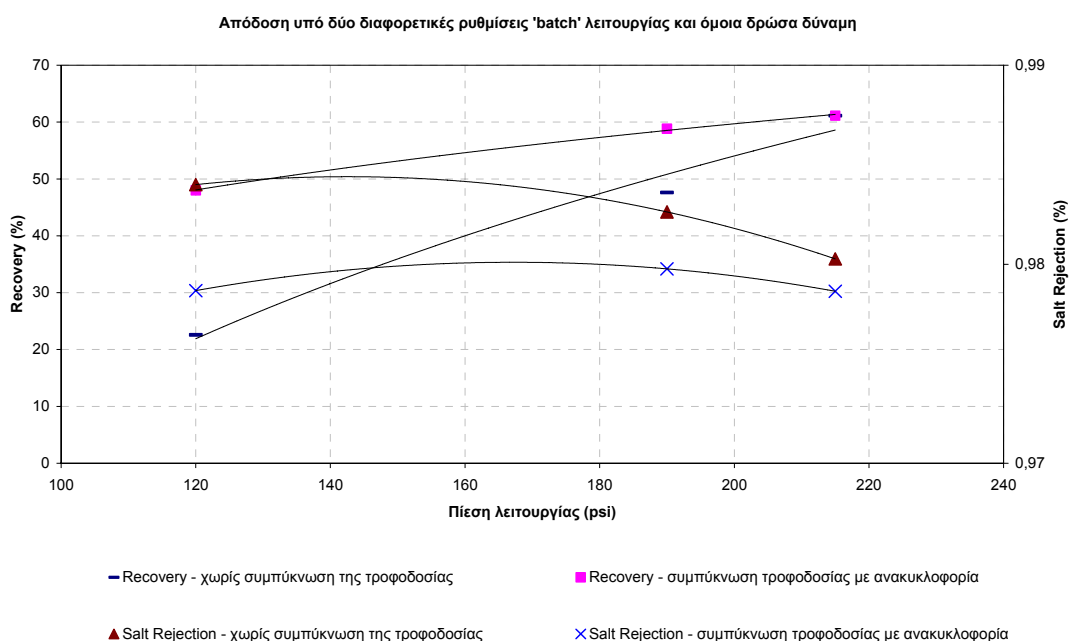
Σχήμα 5.6: Πυκνότητα ροής παραγωγής και λόγος απομάκρυνσης συναρτήσει βαθμού ανάκτησης, (τροφοδοσία: νερό βρύσης).

Αν το σύστημα είχε συνεχή τροφοδοσία, ή η τροφοδοσία είχε μεγαλύτερη αλατότητα (άμεση προσβολή της μεμβράνης), η μείωση της ενεργής επιφάνειας της μεμβράνης θα συνυπολογιζότανε. Τότε, η αύξηση του βαθμού ανάκτησης, με την πάροδο λειτουργίας, θα ενίσχυε το ‘fouling’, με αποτέλεσμα τη μείωση της πυκνότητας ροής. Σημειώνεται, ότι η εργαστηριακή μονάδα έχει οριακή πίεση λειτουργίας, 220 psi ($\approx 15,3$ bar), που αντιστοιχεί στη μέγιστη ανάκτηση $\sim 60\%$.

Ο συντελεστής απομάκρυνσης είναι σχετικά σταθερός και ανεξάρτητος του βαθμού ανάκτησης. Η σχετική μείωση του συντελεστή απομάκρυνσης, η οποία παρατηρείται με την πάροδο του χρόνου λειτουργίας, μπορεί να αποδοθεί στην επίδραση της θερμοκρασίας της τροφοδοσίας, καθώς και στην πόλωση της συγκέντρωσης, η οποία συμβάλλει στην αύξηση της οσμωτικής πίεσης της τροφοδοσίας (υποβάθμιση ποιότητας τροφοδοσίας).

5.2.4. Απόδοση υπό δύο διαφορετικές ρυθμίσεις λειτουργίας και όμοια δρώσα δύναμη

Στο σχήμα 5.7 παρουσιάζονται δύο διαφορετικοί τρόποι λειτουργίας της μονάδας, υπό σταθερή, όμοια δρώσα πίεση. Ο πρώτος τρόπος λειτουργίας, στη δεδομένη δρώσα πίεση, αναφέρεται στη 'batch' λειτουργία, χωρίς συμπύκνωση της τροφοδοσίας, ενώ ο δεύτερος, στη 'batch' λειτουργία, με συμπύκνωση της τροφοδοσίας στο σημείο εισόδου της αντλίας υψηλής πίεσης.



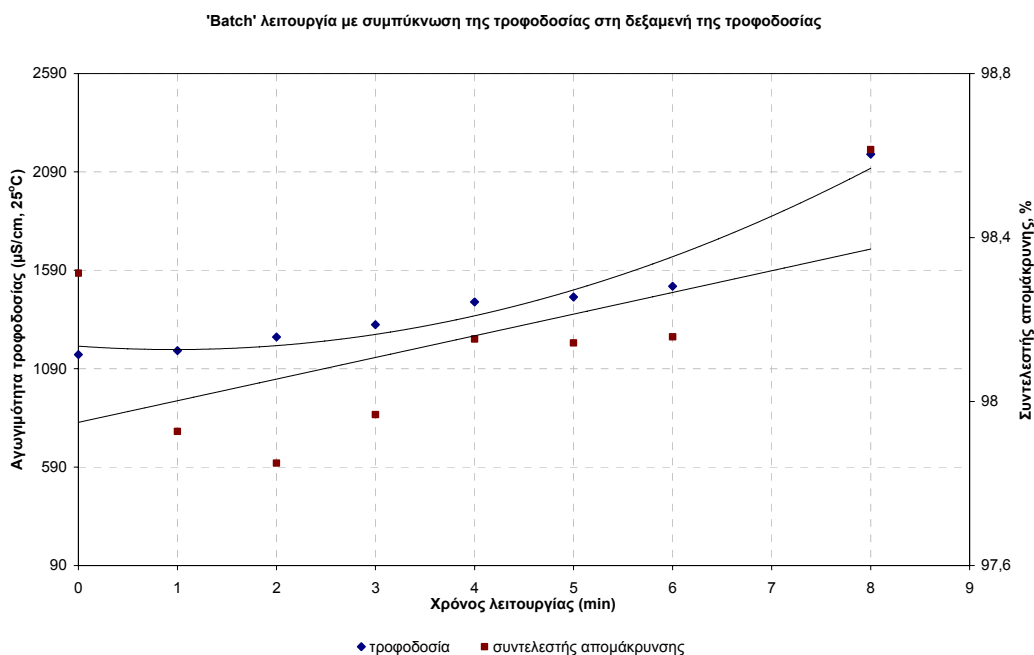
Σχήμα 5.7: Απόδοση υπό δύο διαφορετικές ρυθμίσεις λειτουργίας και όμοια δρώσα δύναμη.

Από τη σύγκριση των δύο διαφορετικών τρόπων λειτουργίας της μονάδας, ως προς την ποσοτική (βαθμός ανάκτησης) και ποιοτική (λόγος απομάκρυνσης) απόδοσή τους, διακρίνεται ότι, μεγαλύτερη ανάκτηση πετυχαίνεται στην περίπτωση λειτουργίας με συμπύκνωση της τροφοδοσίας. Το παραπάνω οφείλεται στην αύξηση της παροχής διηθήματος, ως αποτέλεσμα της αύξησης της παροχής της τροφοδοσίας. Ωστόσο, η καμπύλη ανάκτησης, με το πέρας του χρόνου λειτουργίας, στην περίπτωση συμπύκνωσης της τροφοδοσίας, θα αρχίσει να φθίνει, λόγω μείωσης της παροχής του διηθήματος η οποία αποδίδεται στην επιφόρτιση της μεμβράνης. Όσο αφορά στην

ποιοτική απόδοση, διαφαίνεται ότι, η ποιότητα παραγωγής είναι καλύτερη στην περίπτωση λειτουργίας της μονάδας χωρίς συμπίκνωση της τροφοδοσίας.

5.2.5. 'Batch' λειτουργία με συμπίκνωση της τροφοδοσίας στη δεξαμενή τροφοδοσίας

Το σχήμα 5.8, δείχνει ότι ο συντελεστής απομάκρυνσης, εκφρασμένος ως προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα, υπό πίεση σχεδιασμού, αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, χωρίς να επηρεάζεται από τη βαθμιαία υποβάθμιση της ποιότητας τροφοδοσίας (αγωγιμότητα τροφοδοσίας). Ωστόσο, ο συγκεκριμένος τρόπος λειτουργίας της μονάδας, οδηγεί πολύ γρήγορα στην κούραση της μεμβράνης, με αποτέλεσμα την ελάττωση της παροχής παραγωγής, καθώς και της ποιότητας παραγωγής.



Σχήμα 5.8: 'Batch' λειτουργία με συμπίκνωση στη δεξαμενή της τροφοδοσίας.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο προηγούμενο κεφάλαιο εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

1. Οι αγωγιμότητες παραγωγής των επεξεργασμένων υφάλμυρων νερών, του συνθετικού υφάλμυρου και του υφάλμυρου από το αντλιοστάσιο της λίμνης Κουρνά, με τιμές $A=115,53 \mu\text{S/cm}$ & $A=19,6 \mu\text{S/cm}$, αντίστοιχα, είναι πολύ καλύτερες της αγωγιμότητας του νερού βρύσης, ίση με $A= 300 \mu\text{S/cm}$. Μάλιστα, η ποιότητα του διηθήματος, υφάλμυρου νερού μικρής αλατότητας, προσεγγίζει την ποιότητα του απιονισμένου νερού.
2. Η μη συνεχής τροφοδοσία και λειτουργία της μονάδας RO, δεν επιτρέπει την παρακολούθηση της βαθμιαίας μείωσης της ενεργής επιφάνειας της μεμβράνης, μέσω της πυκνότητας ροής, συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων λειτουργίας, όπως είναι η δρώσα δύναμη και η ποιότητα της τροφοδοσίας.
3. Παρατηρείται μικρή πτώση της ποσοτικής και ποιοτικής απόδοσης της μονάδας, από μέρα σε μέρα λειτουργίας, πράγμα που υποδηλώνει τη μείωση της ενεργής επιφάνειας της μεμβράνης. Η μικρή πτώση απόδοσης του συστήματος διορθώνεται, και επαναφέρεται στα αρχικά επίπεδα σχεδιασμού, με υδροδυναμικό καθαρισμό της μεμβράνης.
4. Κατά την ασυνεχή λειτουργία της μονάδας, η αύξηση της δρώσας δύναμης, οδηγεί στην αύξηση του βαθμού ανάκτησης της μονάδας, και κατά συνέπεια στην αύξηση της παροχής παραγωγής, όσο βέβαια δεν παρατηρείται γήρανση της μεμβράνης από επικαθήσεις.
5. Η υποβάθμιση της ποιότητας τροφοδοσίας, οδηγεί στη μείωση του λόγου απομάκρυνσης, ενώ συμβάλλει στην ενίσχυση φαινομένων 'fouling' στη μεμβράνη.
6. Η ανακυκλοφορία του συμπυκνώματος, η οποία συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση του απόβλητου νερού ή αλλιώς στη μεγαλύτερη αξιοποίηση του νερού τροφοδοσίας, δε μειώνει το λόγο απομάκρυνσης, δηλαδή την ποιότητα της παραγωγής, όσο δεν παρατηρείται κούραση της μεμβράνης από επικαθήσεις.
7. Στις υψηλές πιέσεις λειτουργίας, ο συντελεστής απομάκρυνσης παρουσιάζει μια μικρή πτώση, η οποία δικαιολογείται με τη μικρή αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας (από 25 σε 27,6 °C), ενώ ταυτόχρονα η παροχή παραγωγής αυξάνεται. Η

αύξηση της θερμοκρασίας, οφείλεται στην θέρμανση του μηχανικού συστήματος (αντλίες λειτουργίας), το οποίο προσδίδει θερμότητα στο νερό τροφοδοσίας, με αποτέλεσμα τη μείωση του ιξώδους του και την αύξηση του πορώδους της μεμβράνης. Οι παραπάνω δύο επιδράσεις της αύξησης της θερμοκρασίας, επιτρέπουν τη μεταφορά, προς στην πλευρά του διηθήματος, μεγαλύτερης ποσότητας ιόντων άλατος.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. E2 and EZ2 Series Water Purification Machines, 375-2535 GPD, Operation and Maintenance Manual.
2. IUPAC, "International Union of pure and applied chemistry, Macromolecular Division, Commission on Functional Polymers, Terminology for Membranes and Membrane Processes, IUPAC Recommendations 1996", *Pure & Appl. Chem.*, Vol. 68, No. 7, pp. 1479-1489, 1996.
3. Reverse Osmosis and Nanofiltration, Manual of water supply practices, American Water Association, AWWA M46, ISBN 0-89867-978-8, 1999.
4. Reverse Osmosis Technology, Application for High-Purity-Water- Production, Bipin S. Parekh, ISBN 0-8247-7985-1, 1988.
5. Osmonics, Housewold water Group, Autorol Brand, Membrane Elements.
6. Laboratory set-up for education and research on automation of reverse osmosis plants employing a sustainable energy source, E. Badreddin, A. Gambier, F. Aboul-Fotouh, *Desalination* 166 (2004) 307-314.
7. Watson Ian C., PE.; O.J. Morin, Jr., PE.; Lisa Henthorne, PE, "Desalting Handbook for Planners", Third Edition, July 2003.
8. Avlonitis, K. Kouroumbas, N. Vlachakis, *Desalination*, 157 (2003) I51-1 58, "Energy consumption and membrane replacement cost for seawater RO desalination plants", S.A.
9. Colombo D., M. de Gedoni, M. Reali, *Desalination* 122 (1999) 171-176, "An energy-efficient submarine desalination plant".
10. Καρατζάς Γ., 2002, Ροή Υπόγειων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων, Σημειώσεις , Αναπληρωτής Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης.
11. Yunus Cerci, *Desalination* 142 (2002) 257-266, "Exergy analysis of a reverse osmosis desalination plant in California".
12. IUPAC, 1996, Terminology for membranes and membrane processes, *Pure & Appl. Chem.*, Vol. 68, No. 7, pp. 1479-1489, 1996.
13. CO-OPET - WP No. 7: Water and Power co-generation implementation in the Mediterranean islands and coastal areas, 2004.

14. Lianfa Song, J.Y. Hu, S.L. Ong, W.J. Ng, Menachem Elimelech, Mark Wilf, *Journal of Membrane Science* 214 (2003) 239-244, "Performance limitation of the full-scale reverse osmosis process".
15. Abulbasher M. Shahalam, Ali Al-Harthy, Alaa Al-Zawhry, *Desalination* 150 (2002) 235-245, "Feed water pretreatment in RO systems: unit processes in the Middle East".
16. Van der Hoek J.P., D.O. Rijnbende, C.J.A. Lokin, P.A.C. Bonne, M.T. Loonen, J.A.M.H. Hofman, *Desalination* 117 (1998) 159-172, "Electrodialysis as an alternative for reverse osmosis in an integrated membrane system".
17. Safar M., M. Jafar, M. Abdel-Jawad, S. Bou-Hamad, *Desalination* 118 (1998) 13-21, "Standardization of RO membrane performance".
18. Bruschke Hartmut, *Pure & Appl.Chem.*, Vol. 67, No. 6, pp. 993-1002, 1995, "Industrial application of membrane separation processes".
19. Redondoa J.A., A. Casapas, *Desalination* 134 (2001) 83-92, "Designing seawater RO for clean and fouling RO feed. Desalination experiences with the FilmTec SW30HR-380 and SW30HR-320 elements -Technical-economic review".
20. Xiaohua Zhu, Menachem Elimelech, *Environ. Sci. Technol.* 1997, 31, 3654-3662, "Colloidal Fouling of Reverse Osmosis Membranes: Measurements and Fouling Mechanisms".
21. Metcalf & Eddy, 2003, *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*, Mc Grow Hill, Fourth Edition.
22. Spiegler K.S., *Salt-Water Purification*. 2nd ed., Plenum Press, New York, 1977.
23. Spiegler K.S., Y.M. El-Sayed, *Desalination*, 134 (2001) 109-128, "The energetics of desalination processes".
24. Wade N.M., *Desalination*, 136 (2001) 3-12., "Distillation plant development and cost update".
25. Darwish M.A. and F. Al-Asfour, *Desalination*, 152 (2002) 83-92, "Energy consumption in equivalent work by different desalting methods: case study for Kuwait".
26. Leitner G.F., *Desalination and Water Reuse*, 8(I), (1998) 15-20, "Breaking the cost barrier for seawater desalting".
27. Hinge S. and M. Salemsen, *Desalination and Water Reuse*, 6(2) (1996) 52-54,

- “Seawater desalination wins in Denmark”.
28. Pacentia Paolo, Mario de Gerlonib, Mario Realib, David Chiaramontic, Sven O. Görtnerc, Peter Helmd, Michael Støhrd, Desalination 126 (1999) 213-218, “Submarine seawater reverse osmosis desalination system”
 29. Khayet M., J.I. Mengual, “Effect of salt type on mass transfer in reverse osmosis thin film composite membranes”, Desalination 168 (2004) 383-390.
 30. Designing seawater RO for clean and fouling RO feed. Desalination experiences with the FilmTec SW30HR-380 and SW30HR-320 elements - Technical-economic review, J.A. Redondoa, A. Casapas, Desalination 134 (2001) 83-92.
 31. Kahdim Abdul Sattar, Alaa Abdulrazaq Jassim, Saleh Ismail, “Effect of different operation pressures for various membranes on the performance of RO plants”, Desalination 155 (2003)287-291.
 32. Scheffer S.L., H.D. Holloway, and E.F. Miller (R.M. Parsons Co.), “The Economics of Desalting Brackish Waters for Regional, Municipal and Industrial Water Supply in West Texas,” Office of Saline Water, R&D Progress Report 337, 1967.
 33. Bates Wayne T., Hydranautics, Rockton, IL. USA, IWC-98-08, “Reducing the Fouling Rate of Surface and Waste Water RO Systems”.
 34. Kahdim Abdul Sattar, Saleh Ismail, Alaa Abdulrazaq Jassim, “Modelling of RO systems”, Desalination 158 (2003) 323-329.
 35. Loon Chen Kai, Lianfa Song, Say Leong Ong, Wun Jern Ng, “The development of membrane fouling in full-scale RO processes”, Journal of Membrane Science 232 (2004) 63–72.
 36. Pilat Boris, “Practice of water desalination by electrodialysis”, Desalination 139 (2001) 385-392
 37. Chen J. Paul, S.L. Kim, Y.P. Ting, “Optimization of membrane physical and chemical cleaning by a statistically designed approach”, Journal of Membrane Science 219 (2003) 27–45.
 38. Madaenl Sayed Siavash, Toraj Mohamamdi, Mansour Kazemi Moghadam, “Chemical cleaning of reverse osmosis membranes”, Desalination 134 (2001) 77-82.
 39. Μήτακας, Ποιοτικά χαρακτηριστικά και επεξεργασία νερού, 2^η έκδοση, 2001.
 40. Technical manual 5-813-8, Water Desalination, Headquarters, Department of the

Army, 1986.

8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1. Στοιχεία σχεδιασμού υποβρύχιας μονάδας RO – Ενεργειακή αποδοτικότητα.
2. Μετρήσεις Ιοντικής Χρωματογραφίας & DOC.