



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ ΓΙΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ
ΝΕΡΟΥ

Διπλωματική Εργασία

ΜΙΧΑΛΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΗΣ

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Κορωνάκη Ειρήνη



Αθήνα 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η θεωρητική διερεύνηση συστημάτων αντίστροφης όσμωσης για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού. Η μελέτη αφορά στην ανάπτυξη ενός απλού μαθηματικού μοντέλου που βασίζεται στη θεωρία διάχυσης-διάλυσης και σε πολλαπλούς μηχανισμούς ρύπανσης. Πραγματοποιήθηκε θερμοδυναμική ανάλυση σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας με σκοπό την εξέταση της επίδρασης του βαθμού ανάκτησης και της διαπερνούσας ροής στην αποδοτικότητα του συστήματος αντίστροφης όσμωσης. Το μοντέλο επίσης εφαρμόστηκε για την επίτευξη βελτιστοποίησης στον σχεδιασμό συστημάτων αντίστροφης όσμωσης με τις ελάχιστες ενεργειακές απαιτήσεις και μέγιστες απορρίψεις βορίου.

Η εργασία επίσης καταγράφει το πρόβλημα της διαθεσιμότητας καθαρού πόσιμου νερού στον παγκόσμιο πληθυσμό και αναδεικνύει την αφαλάτωση ως μέθοδο επίλυσης του προβλήματος. Αναφέρονται τα παγκόσμια πρότυπα πόσιμου νερού και παρουσιάζονται στατιστικά στοιχεία σχετικά με τη παγκόσμια παραγωγική ικανότητα των μονάδων αφαλάτωσης. Η αντίστροφη όσμωση αποτελεί τη πιο ανερχόμενη τεχνολογία αφαλάτωσης. Περιγράφονται το φαινόμενο της αντίστροφης όσμωσης, οι τύποι μεμβρανών που χρησιμοποιούνται, οι βασικές αρχές που διέπουν την αφαλάτωση αντίστροφης όσμωσης καθώς και ο σχεδιασμός των συστημάτων αντίστροφης όσμωσης. Οι διαφορές ανάμεσα στο θαλασσινό και το υφάλμυρο νερό τροφοδοσίας, η επεξεργασία του πριν και μετά την αφαλάτωση, η ρύπανση και ο καθαρισμός των μεμβρανών καθώς και η διάθεση του συμπυκνώματος αποτελούν επίσης αντικείμενο μελέτης. Τέλος υπάρχει αναφορά στις εναλλακτικές πηγές ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιήσει η τεχνολογία αντίστροφης όσμωσης και περιλαμβάνεται μία ανάλυση του κόστους των μονάδων αντίστροφης όσμωσης.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is the theoretical investigation of reverse osmosis systems for seawater desalination. The study involves the development of a simple mathematical model based on the solution-diffusion theory and multiple fouling mechanisms. Performed thermodynamic analysis on a wide range of operating conditions in order to examine the effect of the recovery ratio and permeate flux on the efficiency of reverse osmosis system. The model was also applied to achieve optimization in the design of reverse osmosis systems with minimal energy requirements and maximum discharges of boron.

The work also captures the problem of availability of clean drinking water in the world population and signalizes desalination as a method of problem solving. Referred to the global drinking water standards and presented statistics on the global capacity of desalination plants. Reverse osmosis is the most upcoming desalination technology. Described the phenomenon of reverse osmosis, membrane types used, the basic principles governing the desalination reverse osmosis as well as design of reverse osmosis systems. The differences between seawater and brackish feed water, treatment before and after desalination, fouling and cleaning of the membranes and the disposal of the concentrate are also studied. Finally there is reference to alternative energy sources that can use reverse osmosis technology and included an analysis of the cost of reverse osmosis units.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κα. Κορωνάκη Ειρήνη για τη συνεργασία και τη στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Επίσης ευχαριστώ τον κ. Παπαευθυμίου Βασίλη για τις χρήσιμες συμβουλές του. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους που στήριξαν αυτή τη προσπάθεια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.Εισαγωγή.....	8
1.1. Έλλειψη γλυκού νερού και αντιμετώπιση.....	9
1.2. Αφαλάτωση και πρότυπα πόσιμου νερού.....	9
1.3. Είδη αφαλάτωσης.....	10
1.4. Διεργασίες μεμβρανών.....	12
2. Η ανάπτυξη της αφαλάτωσης – στατιστικά στοιχεία.....	13
2.1. Ιστορική αναδρομή.....	13
2.2. Ανάπτυξη αφαλάτωσης.....	13
2.3. Κατανομή μεθόδων αφαλάτωσης στη παγκόσμια παραγωγική ικανότητα....	15
2.4. Παγκόσμια παραγωγική ικανότητα ανά χώρα.....	17
3. Όσμωση και αφαλάτωση.....	19
3.1. Το φυσικό φαινόμενο της όσμωσης.....	19
3.2. Αντίστροφη όσμωση.....	20
3.3. Οσμωτική πίεση.....	20
3.4. Αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση.....	21
3.5. Στάδια αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση.....	22
4. Μεμβράνες RO.....	23
4.1. Χαρακτηριστικά μεμβρανών RO.....	24
4.2. Τύποι μεμβρανών RO.....	24
4.2.1. Σωληνωτός τύπος.....	25
4.2.2. Σπειροειδής τύπος.....	25
4.2.3. Τύπος κοίλων ινών ή τριχοειδών σωλήνων.....	26
4.2.4. Τύπος δίσκων – πλαισίου ή επίπεδος τύπος.....	27
4.2.5. Σύγκριση τύπων μεμβρανών.....	27
5. Αντίστροφη όσμωση: Βασικές αρχές.....	28
6. Αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση: ύδατα τροφοδοσίας.....	36
6.1. Θαλασσινό νερό αντίστροφης όσμωσης.....	36
6.2. Υφάλμυρο νερό αντίστροφης όσμωσης.....	37
7. Ρυπαντές νερού τροφοδοσίας.....	38
7.1. Αντίστροφη όσμωση θαλασσινού νερού.....	38
7.2. Αντίστροφη όσμωση υφάλμυρου νερού.....	39
8. Ρύπανση μεμβρανών.....	40
8.1. RO θαλασσινού νερού.....	43
8.2. RO υφάλμυρου νερού.....	43

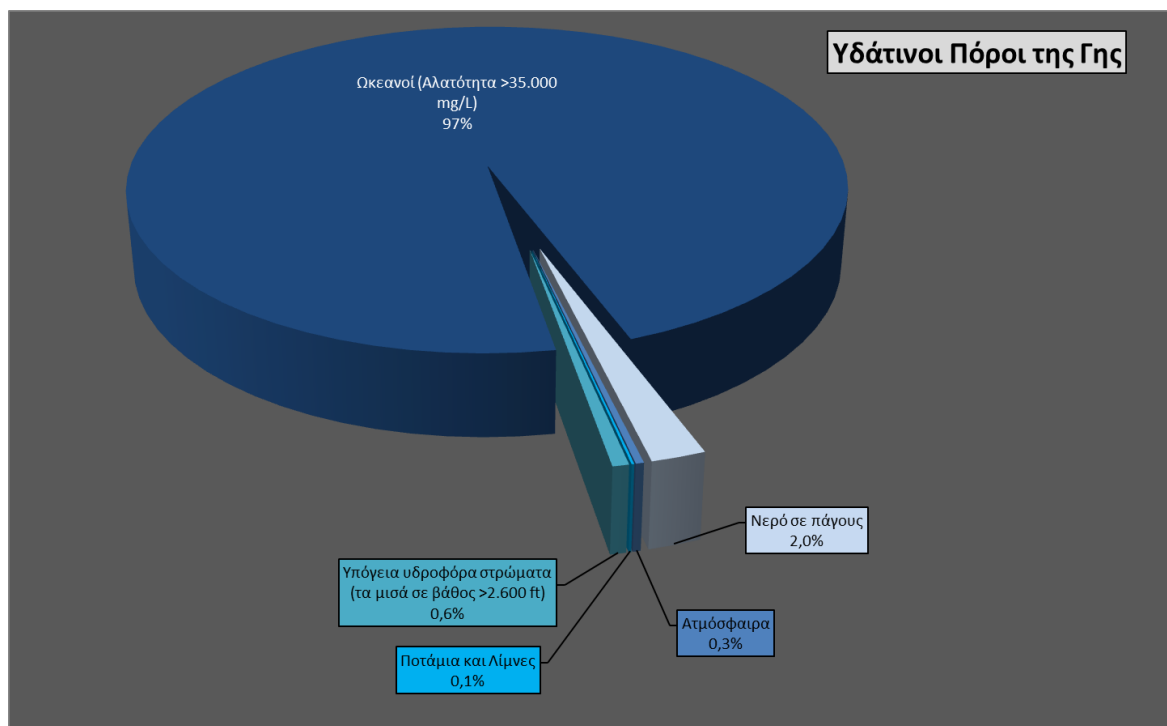
9. Καθαρισμός της μεμβράνης.....	46
10. Προεπεξεργασία για θαλασσινό και υφάλμυρο νερό αντίστροφης όσμωσης.....	47
10.1. Συμβατική προεπεξεργασία.....	47
10.2. Προεπεξεργασία μέσω μεμβρανών.....	50
11. Σχεδιασμός συστήματος αντίστροφης όσμωσης.....	52
11.1. Τυπικές περιοχές παραμέτρων λειτουργίας.....	52
11.2. Σχεδιασμός συστήματος αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού.....	52
11.3. Εναλλακτικός σχεδιασμός συστήματος αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού.....	58
11.4. Σχεδιασμός συστήματος αντίστροφης όσμωσης υφάλμυρου νερού.....	59
11.5. Εναλλακτικός σχεδιασμός συστήματος αντίστροφης όσμωσης υφάλμυρου νερού.....	60
12. Προσομοίωση μοντέλου συστημάτων αντίστροφης όσμωσης για αφαλάτωση θαλασσινού νερού.....	64
12.1. Ανάπτυξη μοντέλου.....	64
12.2. Αποτελέσματα και ανάλυση.....	69
12.2.1. Επίδραση της ανάκτησης (Rec) στην απόδοση της RO.....	69
12.2.2. Επίδραση της ροής (J) στην απόδοση της RO.....	71
12.2.3. Επίδραση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας (T) στην απόδοση της RO.....	74
12.2.4. Επίδραση της απόδοσης ανάκτησης ενέργειας (ϵ_{ERD}) στην απόδοση της RO.....	76
12.2.5. Επίδραση του μηχανισμού ρύπανσης στην απόδοση της RO.....	76
12.2.6. Βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας για την ειδική ενέργεια και την απόρριψη βορίου.....	79
12.3. Συμπεράσματα.....	81
13. Μετεπεξεργασία διαπερνούσας ροής RO.....	82
13.1. Αντίστροφη όσμωση θαλασσινού νερού.....	82
13.2. Αντίστροφη όσμωση υφάλμυρου νερού.....	82
14. Διάθεση συμπυκνώματος RO.....	83
14.1. RO θαλασσινού νερού.....	83
14.2. RO υφάλμυρου νερού.....	83

15. Εναλλακτικές πηγές ενέργειας στην αντίστροφη όσμωση.....	87
15.1. Εναλλακτικές πηγές ενέργειας στην αντίστροφη όσμωση θαλασσινού νερού.....	88
15.2. Εναλλακτικές πηγές ενέργειας στην αντίστροφη όσμωση υφάλμυρου νερού.....	89
16. Κόστος αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης.....	90
16.1. Σύγκριση κόστους μονάδας RO θαλασσινού νερού με μονάδα RO υφάλμυρου νερού.....	90
16.2. Κόστος μονάδας αφαλάτωσης RO θαλασσινού νερού.....	91
16.3. Κόστος μονάδας αφαλάτωσης RO υφάλμυρου νερού.....	95
17. Τεχνολογικές προκλήσεις και το μέλλον της RO.....	97
18. Συμπεράσματα.....	99
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	100
ΣΥΜΒΟΛΑ.....	101
ΣΥΜΒΟΛΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	105

1.Εισαγωγή.

Σήμερα, δισεκατομμύρια άνθρωποι σε όλο τον κόσμο δεν έχουν πρόσβαση σε καθαρό, πόσιμο νερό. Σύμφωνα με το παγκόσμιο συμβούλιο ύδατος, μέχρι το 2020, ο πλανήτης θα προσφέρει περίπου 17% λιγότερο από το γλυκό νερό που απαιτείται για να εκθρέψει τον παγκόσμιο πληθυσμό. Επιπλέον, μεγάλο ποσοστό του παγκόσμιου πληθυσμού ζουν σε περιοχές που ήδη αντιμετωπίζουν το πρόβλημα έλλειψης νερού σε υψηλό βαθμό. Η ανάγκη για γλυκό νερό είναι στη κορυφή της διεθνούς ατζέντας των κρίσιμων προβλημάτων, τόσο σταθερά όσο και η κλιματική αλλαγή.

Σύμφωνα με τη παγκόσμια κατανομή των υδάτινων πόρων, το 97% του νερού της Γης βρίσκεται σε θάλασσες και ωκεανούς και 2% του νερού της Γης βρίσκεται στα παγόβουνα. Περίπου το 0,4% θεωρείται ότι είναι γλυκό νερό. Το υπόλοιπο ποσοστό αποτελείται από υφάλμυρο νερό, δηλ. ελαφρώς αλμυρό νερό που υπάρχει ως επιφανειακό νερό στις εκβολές των ποταμών και ως υπόγειο νερό σε αλμυρά υδροφόρα στρώματα. Η λειψυδρία μαστίζει πολλές κοινότητες και οι άνθρωποι αναζητούσαν για πολύ καιρό μια λύση στο πρόβλημα των πενιχρών αποθεμάτων γλυκού νερού που υπάρχουν στη Γη. Έτσι, η αφαλάτωση δεν είναι μια νέα ιδέα· η ιδέα να μετατραπεί το θαλασσίνο νερό σε γλυκό νερό έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιείται εδώ και αιώνες. Εξάλλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1 παρακάτω, οι διαθέσιμοι υδάτινοι πόροι αυτού του πλανήτη δεν επιτρέπουν πολλές εναλλακτικές λύσεις και με το 97% του διαθέσιμου νερού να αντιπροσωπεύεται από αλμυρό νερό με επίπεδο αλατότητας >35.000 mg/L, η αφαλάτωση θαλασσινού νερού αποτελεί τη μεγαλύτερη δυνατή εναλλακτική πηγή προμήθειας νερού.



Σχήμα 1. Κατανομή των υδάτινων πόρων της Γης [1]

1.1. Έλλειψη γλυκού νερού και αντιμετώπιση.

Η παραγωγή πόσιμου νερού έχει γίνει μια παγκόσμια ανησυχία. Για πολλές κοινωνίες, η προβλεπόμενη αύξηση του πληθυσμού και η ζήτηση υπερβαίνουν τους συμβατικούς διαθέσιμους υδάτινους πόρους. Πάνω από 1 δισεκατομμύριο άνθρωποι δεν έχουν καθαρό πόσιμο νερό και περίπου 2,3 δισεκατομμύρια άνθρωποι (το 41% του παγκόσμιου πληθυσμού) ζουν σε περιοχές με έλλειψη νερού. Για τους περισσότερους, λύσεις όπως η εξοικονόμηση νερού και η μεταφορά νερού ή η κατασκευή φραγμάτων δεν είναι επαρκείς μέθοδοι για να αντιμετωπίσουν την αύξηση της ζήτησης και, σε πολλές περιπτώσεις, τη μείωση της παροχής γλυκού νερού. Στους παραδοσιακούς πόρους γλυκού νερού, όπως οι λίμνες, τα ποτάμια, και τα υπόγεια ύδατα γίνεται υπερκατανάλωση ή κατάχρηση τους, με αποτέλεσμα, οι πόροι αυτοί είτε να μειώνονται ή να γίνονται αλμυροί. Καθώς οι χώρες συνεχίζουν να αναπτύσσονται και οι πόλεις να επεκτείνονται, λίγοι νέοι υδάτινοι πόροι είναι διαθέσιμοι για τη στήριξη των καθημερινών αναγκών σε γλυκό νερό. Ως αποτέλεσμα, λύσεις όπως η επαναχρησιμοποίηση του νερού και η αφαλάτωση νερού έχουν αναδειχθεί ως τα κλειδιά για τη διατήρηση των μελλοντικών γενεών σε όλη την υδρόγειο.

Τόσο η επαναχρησιμοποίηση του νερού όσο και η αφαλάτωση έχουν ενσωματωθεί επιτυχώς στο να παρέχουν πρόσθετη παραγωγή γλυκού νερού για κοινότητες που κάνουν χρήση συμβατικών μεθόδων επεξεργασίας νερού και πόρων γλυκού νερού. Η επαναχρησιμοποίηση του νερού έχει εφαρμοστεί για την παροχή νερού σε τομείς όπως η άρδευση, ψυκτικό νερό σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, βιομηχανικές διεργασίες νερού, και επαναπλήρωση των υπόγειων υδάτων, και έχει γίνει αποδεκτή ως μέθοδος για την έμμεση παραγωγή πόσιμου νερού. Η Αφαλάτωση έχει καταστεί μια σημαντική πηγή παραγωγής πόσιμου νερού, με τις θερμικές μεθόδους αφαλάτωσης να αναπτύσσονται κατά τα τελευταία 60 χρόνια και τις διεργασίες μέσω μεμβρανών να αναπτύσσονται κατά τα τελευταία 40 χρόνια.

1.2. Αφαλάτωση και πρότυπα πόσιμου νερού.

Αφαλάτωση είναι ο γενικός όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διαδικασία της αφαίρεσης άλατος από το νερό για να παραχθεί γλυκό νερό. Γλυκό νερό ορίζεται ως το νερό που περιέχει λιγότερο από 1000 mg/L αλάτων ή συνολικών διαλυμένων στερεών (Total Dissolved Solids, TDS). Πάνω από 1000 mg/L, ιδιότητες όπως γεύση, το χρώμα, η τάση διάβρωσης και η μυρωδιά μπορεί να επηρεαστούν αρνητικά. Πολλές χώρες έχουν υιοθετήσει εθνικά πρότυπα πόσιμου νερού για συγκεκριμένες συστατικά του νερού καθώς και για το TDS, αλλά τα τυπικά όρια διαφέρουν από χώρα σε χώρα ή από περιοχή σε περιοχή μέσα στην ίδια χώρα. Για παράδειγμα, η Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας (Water Health Organization, WHO, 1970) έχει όριο γεύσης πόσιμου νερού στα 250 mg/L και η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. (Environmental Protection Agency, EPA) έχει

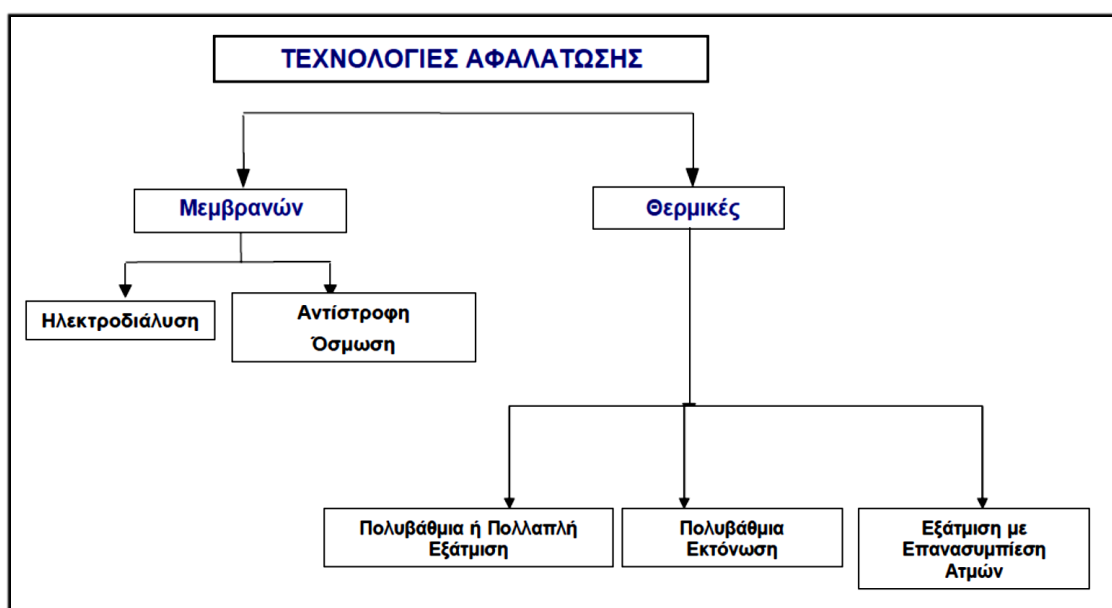
δευτερεύουσα πρότυπα 250 mg/L χλωριούχων και 500 mg/L TDS. Κάθε πολιτεία των Η.Π.Α. μπορεί να ορίσει ένα πρωταρχικό, εκτελεστό πρότυπο. Η πολιτεία της Γιούτα έχει σήμερα όριο των 2000 mg/L TDS, ενώ η Καλιφόρνια έχει ένα πρότυπο των 1000 mg/L TDS και η Φλόριντα των 500 mg/L TDS. Η Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας συνιστά ως πρότυπο πόσιμου νερού τα 1000 mg/L TDS. Η Αυστραλία έχει πρότυπο πόσιμου νερού τα 1000 mg/L TDS. Η Ευρωπαϊκή Ένωση δεν έχει ένα πρότυπο πόσιμου νερού για TDS, αν και οι προδιαγραφές για άλλους ρυπαντές του πόσιμου νερού είναι καθορισμένοι. Σε σύγκριση με τις κυβερνητικές προδιαγραφές, οι περισσότερες εγκαταστάσεις αφαλάτωσης έχουν σχεδιαστεί για να επιτευχθεί TDS από 500 mg/L ή λιγότερο. Το αφαλατωμένο νερό που χρησιμοποιείται για άλλους σκοπούς, όπως η άρδευση των καλλιεργειών, μπορεί να έχει υψηλότερη συγκέντρωση TDS τα πρότυπα νερού άρδευσης περιλαμβάνουν συχνά τα όρια συγκέντρωσης για TDS, χλώριο, νάτριο και βόριο. Ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας, το πρότυπο χλωρίου μπορεί να κυμαίνεται από 350 mg/L έως και περισσότερο από 2000 mg/L.

Η αλατότητα του νερού τροφοδοσίας για τις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης κυμαίνεται από 1000 mg/L TDS έως 60.000 mg/L TDS, αν και τα ύδατα τροφοδοσίας συνήθως κατατάσσονται σε ένα από τους δύο τύπους: θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό. Αν και οι περισσότερες πηγές θαλασσινού νερού περιέχουν 30.000-45.000 mg/L TDS, οι μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού που χρησιμοποιούνται μπορούν να επεξεργαστούν επιτυχώς ύδατα εντός του φάσματος των 10.000 - 60.000 mg/L TDS. Οι μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης υφάλμυρου νερού χρησιμοποιούνται για τη θεραπεία νερού που προέρχονται από τις πηγές (συνήα υπόγεια ύδατα) με εύρος TDS 1000-10.000 mg/L. Ο τύπος του νερού τροφοδοσίας μπορεί να υπαγορεύσει πολλές επιλογές σχεδιασμού για μια μονάδα επεξεργασίας, συμπεριλαμβανομένης της μεθόδου αφαλάτωσης, τα βήματα προεπεξεργασίας, τη μέθοδο διάθεσης των αποβλήτων και την ανάκτηση του προϊόντος (το ποσοστό της εισροής νερού που γίνεται προϊόν).

1.3. Είδη αφαλάτωσης.

Οι διεργασίες αφαλάτωσης εμπίπτουν σε δύο κύριες κατηγορίες, τις θερμικές διεργασίες και τις διεργασίες μεμβρανών (Σχήμα 2). Η θερμική αφαλάτωση (απόσταξη) έχει χρησιμοποιηθεί για εκατοντάδες χρόνια για την παραγωγή πόσιμου νερού, αλλά μεγάλης κλίμακας δημοτικές εγκαταστάσεις απόσταξης πόσιμου νερού άρχισαν να λειτουργούν κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1950. Οι χώρες της Μέσης Ανατολής υπήρξαν πρωτοπόρες στο σχεδιασμό και την υλοποίηση θερμικής αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού, χρησιμοποιώντας πρώτα μια διαδικασία που ονομάζεται πολυβάθμια εξάτμιση (Multi-Effect Distillation, MED) και αργότερα μια διαδικασία που ονομάζεται πολυβάθμια εκρηκτική (Multi-Stage Flash, MSF) απόσταξη. Σήμερα, η Μέση Ανατολή κατέχει συνολικά το 50% της παραγωγικής ικανότητας αφαλάτωσης στον κόσμο και χρησιμοποιεί κυρίως την τεχνολογία MSF.

Ενώ η θερμική αφαλάτωση παρέμεινε η κύρια επιλογή τεχνολογίας στη Μέση Ανατολή, οι διεργασίες μεμβρανών έχουν αναπτυχθεί με ταχύ ρυθμό από το 1960 και τώρα ξεπερνούν τις θερμικές διεργασίες σε νέες εγκαταστημένες μονάδες. Έξω από τη Μέση Ανατολή, οι νέες εγκαταστάσεις αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης (Reverse Osmosis, RO) έχουν αυξηθεί σταθερά: το 2001, το 51% των νέας εγκατεστημένης παραγωγικής ικανότητας αφαλάτωσης χρησιμοποιούσε αφαλάτωση RO, και το 2003, η αφαλάτωση RO αντιπροσώπευε το 75% της νέας παραγωγικής ικανότητας. Οι χώρες της Μέσης Ανατολής συνεχίζουν να χρησιμοποιούν θερμική αφαλάτωση λόγω της εύκολης πρόσβασης σε πόρους ορυκτών καυσίμων και την κακή ποιότητα των υδάτων του τοπικού νερού τροφοδοσίας. Τα υδατικά συστήματα, όπως ο Περσικός Κόλπος και ο Κόλπος του Ομάν έχουν εξαιρετικά υψηλές αλμυρότητες, υψηλές θερμοκρασίες, και δυνατότητες υψηλής ρύπανσης για τα συστήματα μεμβρανών. Σε υψηλές αλατότητες και υψηλές ανακτήσεις (55.000 mg/L TDS και πάνω από 35% ανάκτηση), η πίεση που απαιτείται για την αφαλάτωση μέσω μεμβρανών μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση των μονάδων μεμβρανών και πρέπει να χρησιμοποιείται θερμική αφαλάτωση. Οι υψηλές θερμοκρασίες του νερού τροφοδοσίας και οι ρυπαντές μπορεί επίσης να προκαλέσουν προβλήματα στην αφαλάτωση μέσω μεμβρανών που μπορούν να αποφευχθούν με τη χρήση θερμικής αφαλάτωσης.



Σχήμα 2. Κατηγοριοποίηση τεχνολογιών αφαλάτωσης [2].

1.4. Διεργασίες μεμβρανών.

Η αντίστροφη όσμωση (RO), η νανοδιήθηση (Nanofiltration, NF) και η ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis, ED) είναι οι τρεις μέθοδοι μεμβρανών που διατίθενται για αφαλάτωση. Οι μεμβράνες ED λειτουργούν κάτω από την επίδραση ηλεκτρικού ρεύματος που προκαλεί τα ιόντα να κινηθούν μέσω παράλληλων μεμβρανών και είναι συνήθως μόνο για αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού. Οι μεμβράνες NF αποτελούν μια νεότερη τεχνολογία που αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1980 και έχουν δοκιμαστεί σε μια σειρά συγκεντρώσεων άλατος. Η έρευνα έχει δείξει ότι η NF, ως μια διαδικασία που λειτουργεί από μόνη της, δεν μπορεί να μειώσει την αλατότητα του θαλασσινού νερού στα πρότυπα πόσιμο νερού, αλλά η NF έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για τη θεραπεία ήπιου υφάλμυρου νερού τροφοδοσίας. Σε συνδυασμό με την RO, η NF μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θεραπεία θαλασσινού νερού. Ειδικότερα, οι μεμβράνες NF χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση δισθενών ιόντων, όπως το ασβέστιο και το μαγνήσιο που συμβάλλουν στη σκληρότητα του νερού, καθώς και των διαλυμένων οργανικών υλών.

Οι μεμβράνες RO, ωστόσο, είναι σε θέση να απορρίπτουν μονοσθενή ιόντα, όπως νατρίου και χλωρίου. Σήμερα, οι μεμβράνες RO θαλασσινού νερού έχουν απορρίψεις άλατος μεγαλύτερες από 99%· κάποιες μεμβράνες, όταν λειτουργούν σε τυπικές συνθήκες δοκιμών (32.000 mg/L NaCl, 5,5 MPa, 25 °C, pH 8, 8% ανάκτηση), μπορούν να επιτύχουν τόσο υψηλές απορρίψεις αλάτων όπως 99,7 έως 99,8%. Η τεχνολογία μεμβρανών RO έχει αναπτυχθεί τόσο για υφάλμυρο όσο και για θαλασσινού νερού εφαρμογές. Οι μεμβράνες RO υφάλμυρου νερού έχουν συνήθως υψηλότερη ροή παραγόμενου νερού (διαπερνούσα ροή), μικρότερη απόρριψη αλάτων και απαιτούν χαμηλότερες πιέσεις λειτουργίας (λόγω των χαμηλής οσμωτικής πίεσης που προκύπτει από τη μικρότερη αλατότητα του νερού), ενώ οι μεμβράνες RO θαλασσινού νερού απαιτούν μέγιστη απόρριψη αλάτων. Οι μεμβράνες που έχουν σχεδιαστεί για μεγαλύτερη απόρριψη αλάτων, έχουν χαμηλότερες διαπερνούσες ροές, λόγω της αντιστάθμισης μεταξύ της επιλεκτικότητας της μεμβράνης (απόρριψη άλατος) και της διαπερατότητας της μεμβράνης (παραγόμενη ροή). Επιπλέον, οι μεμβράνες RO θαλασσινού νερού πρέπει να λειτουργούν σε υψηλότερες πιέσεις για να αντισταθμίσουν την υψηλότερη οσμωτική πίεση του θαλασσινού νερού.

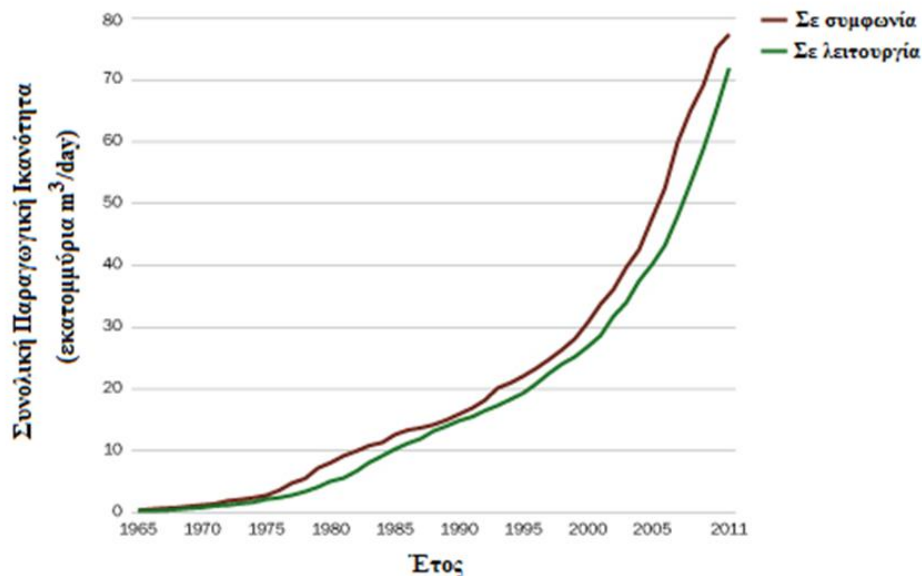
2. Η ανάπτυξη της αφαλάτωσης – στατιστικά στοιχεία.

2.1. Ιστορική αναδρομή.

Η τεχνικές της αφαλάτωσης ξεκίνησαν πριν από χιλιάδες χρόνια όταν Έλληνες ναυτικοί έβραζαν το αλμυρό νερό ώστε να εξατμιστεί το γλυκό νερό μακριά από το αλάτι και Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν φίλτρα αργίλου για τη δέσμευση του άλατος. Στο σύγχρονο κόσμο, η αφαλάτωση άρχισε να αναπτύσσεται για εμπορική χρήση πάνω στα πλοία. Η απόσταξη, η διαδικασία όπου χρησιμοποιείται μια πηγή θερμότητας για το διαχωρισμό του νερού από το αλάτι, χρησιμοποιήθηκε για την παροχή πόσιμου νερού σε υπερωκεάνια πλοία ώστε να αποφευχθεί το ενδεχόμενο της εξάντλησης των αποθεμάτων γλυκού νερού πάνω σε αυτά. Η θερμική αφαλάτωση έδωσε στα πλοία τη δυνατότητα να ταξιδέψουν πιο μακριά και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, επειδή δεν ήταν πλέον αναγκαία η μεταφορά όλου του φρέσκου νερού που ήταν απαραίτητο για το ταξίδι. Τον 17ο αιώνα, Ιάπωνες ναυτικοί χρησιμοποίησαν μια απλή τεχνική απόσταξης όπου το νερό έβραζε σε δοχεία και για τη συλλογή του νερού που εξατμιζόταν χρησιμοποιούσαν σωλήνες από μπαμπού. Τελικά οι μονάδες απόσταξης αναπτύχθηκαν για να παρέχουν νερό για τους λέβητες ατμού των πλοίων. Χώρες άρχισαν να αναπτύσσουν την προηγμένη τεχνολογία απόσταξης στα τέλη του 18ου αιώνα, συμπεριλαμβανομένων των ερευνών στην προσθήκη χημικών. Μερικές από τις πρώτες προσπάθειες εγκατάστασης εμπορικών μονάδων αφαλάτωσης περιλαμβάνουν τις μονάδες που εγκαταστάθηκαν στο Tigne της Μάλτας το 1881 και στην Τζέντα της Σαουδικής Αραβίας το 1907. Αν και η πρώτη μονάδα αφαλάτωσης στη Τζέντα, με το προσωνύμιο «al Kindasah» (η τοπική εκφώνηση του "συμπυκνωτή") δεν παρήγαγε πολύ νερό, η προσπάθεια άνοιξε το δρόμο για τις σύγχρονες εγκαταστάσεις που λειτουργήσαν για πρώτη φορά στην Τζέντα στη δεκαετία του 1970. Σήμερα, η εταιρία Kindasa Water Services λειτουργεί δύο εγκαταστάσεις RO θαλασσινού νερού στην Τζέντα, με συνολική παραγωγική δυναμικότητα 40.500 m³/day.

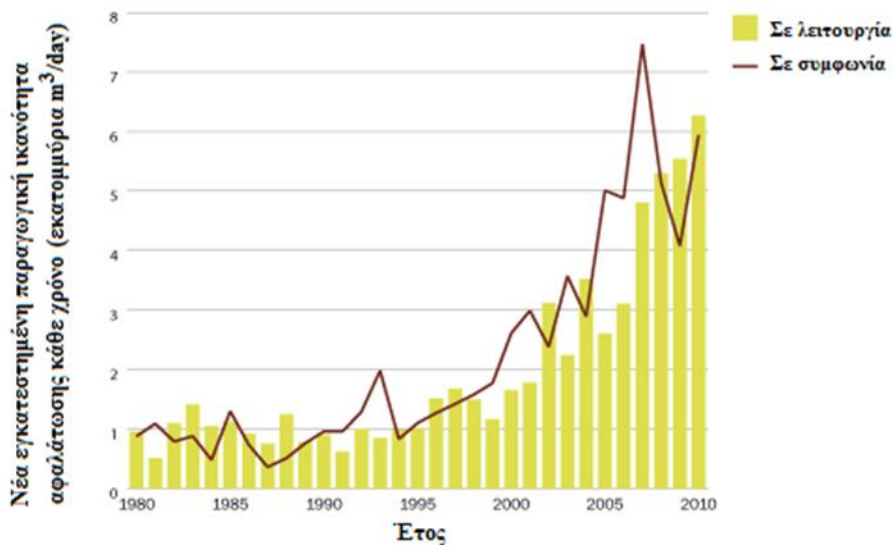
2.2. Ανάπτυξη αφαλάτωσης.

Στη Μέση Ανατολή υπήρξαν οι πρώτες χώρες που χρησιμοποίησαν αφαλάτωση σε μεγάλη κλίμακα για δημοτική παραγωγή πόσιμου νερού. Μονάδες απόσταξης θαλασσινού νερού αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά στη δεκαετία του 1950, ενώ στη δεκαετία του 1960 άνοιξε στο Κουβέιτ η πρώτη βιομηχανική μονάδα αφαλάτωσης. Στη συνέχεια οι μεμβράνες άρχισαν να εισέρχονται στην αγορά αφαλάτωσης, και στα τέλη του 1960 αναπτύχθηκαν οι πρώτες επιτυχημένες μονάδες RO που χρησιμοποίησαν υφάλμυρο νερό ως νερό τροφοδοσίας. Κατά την επόμενη δεκαετία, οι βελτιώσεις στα υλικά των μεμβρανών αύξησαν τη διαπερατότητα του προϊόντος και τότε οι μεμβράνες RO εφαρμόστηκαν σε αφαλάτωση θαλασσινού νερού. Κατά τα τελευταία 40 χρόνια, οι δραματικές βελτιώσεις στην τεχνολογία μεμβρανών RO ανέδειξαν την RO να είναι η κύρια επιλογή για νέες εγκαταστάσεις αφαλάτωσης. Η παγκόσμια δυναμικότητα αφαλάτωσης (συνδυασμός απόσταξης και τεχνικές μεμβρανών) σε συνάρτηση με το χρόνο κατά τα τελευταία 50 χρόνια φαίνεται στο Σχήμα 3. Από τα τέλη της δεκαετίας του 1960 και του 1970, οι εξελίξεις τόσο στην απόσταξη όσο και στη τεχνολογία μεμβρανών οδήγησε σε εκθετική αύξηση της δυναμικότητας αφαλάτωσης στον κόσμο.



Σχήμα 3. Συνολική εγκατεστημένη παραγωγική ικανότητα από το 1965 για μονάδες που λειτούργησαν και συνολικές μονάδες που εγκαταστάθηκαν [3].

Σήμερα, πάνω από 15.000 μονάδες αφαλάτωσης είναι σε λειτουργία σε όλο τον κόσμο και περίπου το 50% από αυτές είναι μονάδες RO. Η Μέση Ανατολή κατέχει περίπου το 50% της παραγωγικής ικανότητας στον κόσμο (και 2,9% του παγκόσμιου πληθυσμού) και έχει καθιερωθεί ως επικεφαλής στην αφαλάτωση θαλασσινού νερού σε μεγάλη κλίμακα. Το 2005, το Ισραήλ άνοιξε τη μεγαλύτερη στον κόσμο μονάδα αφαλάτωσης RO θαλασσινού νερού, με δυναμικότητα παραγωγής 330.000 m³/day ή 100 εκατομμύρια m³/year. Τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα (ΗΑΕ), άνοιξαν τη δική τους μονάδα αφαλάτωσης Fujairah το 2005. Η μονάδα αυτή συνδυάζει τεχνολογία MSF (Multi Stage Flash, πολυβάθμια εκρηκτική εκτόνωση) και τεχνολογία RO για την παραγωγή 454.000 m³/day γλυκού νερού. Η ετήσια παγκόσμια νέα παραγωγική ικανότητα αφαλάτωσης (διεργασίες απόσταξης και μεμβρανών) φαίνεται στο Σχήμα 4. Η ετήσια αύξηση των νέων εγκαταστάσεων αντιστοιχεί στην πρόοδο της τεχνολογίας στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και του 1970. Μεγάλα άλματα στη νέα παραγωγική ικανότητα κατά τα τελευταία χρόνια, σηματοδοτεί μια νέα τάση σε μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με παραγωγές των 100.000 m³/day ή περισσότερο.



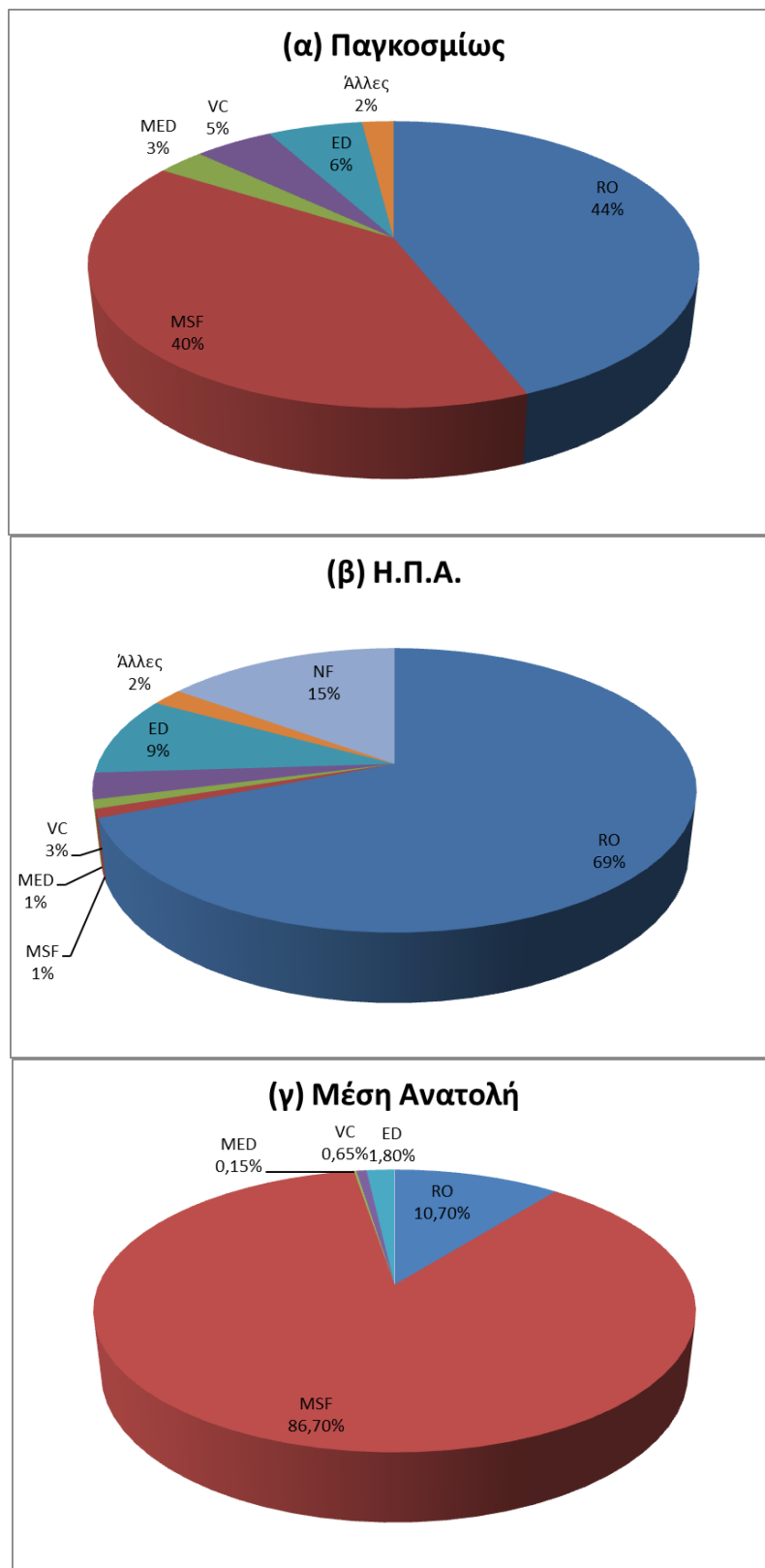
Σχήμα 4. Νέα παγκόσμια εγκατεστημένη παραγωγική ικανότητα αφαλάτωσης κάθε χρόνο από το 1980 έως το 2010 [3].

2.3. Κατανομή μεθόδων αφαλάτωσης στη παγκόσμια παραγωγική ικανότητα.

Η Σαουδική Αραβία είναι σήμερα στη πρώτη θέση παγκοσμίως με περίπου 26% της παγκόσμιας παραγωγικής ικανότητας και οι Ηνωμένες Πολιτείες βρίσκονται στη δεύτερη θέση με 17% της παραγωγής αφαλάτωσης στον κόσμο. Επιπλέον, 6 από τις 11 χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγική ικανότητα αφαλάτωσης βρίσκονται στη Μέση Ανατολή. Ωστόσο, αυτά τα στατιστικά σχετικά με την παραγωγή αναφέρονται επιδερμικά στη χρήση αφαλάτωσης. Ενδεικτικά, στη Σαουδική Αραβία, η θερμική αφαλάτωση είναι η τυπική επιλογή αφαλάτωσης και οι περισσότερες μονάδες είναι παράκτιες εγκαταστάσεις αφαλάτωσης θαλασσινού νερού. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, το 69% των μονάδων χρησιμοποιούν αντίστροφη όσμωση και μόνο το 7% των μονάδων αφαλάτωσης χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό. Επιπλέον, οι ΗΠΑ αντιπροσωπεύουν το 4,5% του παγκόσμιου πληθυσμού, ενώ η Σαουδική Αραβία αντιπροσωπεύει μόλις το 0,4%. Ενώ μόνο το 20% του συνολικού αριθμού των μονάδων αφαλάτωσης σε όλο τον κόσμο χρησιμοποιούν θερμικές τεχνολογίες, το 50% της παραγωγικής ικανότητας αφαλάτωσης μπορεί να αποδοθεί σε θερμικές διεργασίες. Οι διαφορές αυτές καταδεικνύουν την ευρεία εφαρμογή της αφαλάτωσης σε χώρες με πολύ διαφορετικούς πόρους και ανάγκες σε νερό.

Η κατανομή της παραγωγικής ικανότητας αφαλάτωσης για διαφορετικές τεχνολογίες διαχωρισμού φαίνεται στο Σχήμα 5: για ολόκληρο τον κόσμο, τις Ηνωμένες Πολιτείες και τη Μέση Ανατολή. Οι διεργασίες μεμβρανών περιλαμβάνουν την αντίστροφη όσμωση (RO), την ηλεκτροδιάλυση (ED) και τη νανοδιήθηση (NF) και οι διεργασίες απόσταξης περιλαμβάνουν τη συμπίεση ατμών (VC), τη πολυβάθμια εκρηκτική εκτόνωση (MSF) και τη πολυβάθμια εξάτμιση (MED). Οι στατιστικές για τον κόσμο (Σχήμα 5(α)) δείχνουν ισότιμη κατανομή παραγωγικής ικανότητας για τις διεργασίες μεμβρανών και τις διεργασίες απόσταξης, με τη RO να κυριαρχεί στις διεργασίες μεμβρανών και τη MSF να κυριαρχεί στις διεργασίες απόσταξης. Ωστόσο, οι στατιστικές αλλάζουν δραματικά όταν εξετάζεται ο αριθμός των μονάδων: οι μονάδες μεμβρανών RO αντιπροσωπεύουν το 80% του αριθμού των μονάδων αφαλάτωσης σε όλο τον κόσμο, με τις θερμικές διεργασίες να αντιπροσωπεύουν μόλις το 20%. Εξάλλου, στη Μέση Ανατολή (Σχήμα 5(γ)), περισσότερο από το 86% της παραγωγής επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τεχνολογία

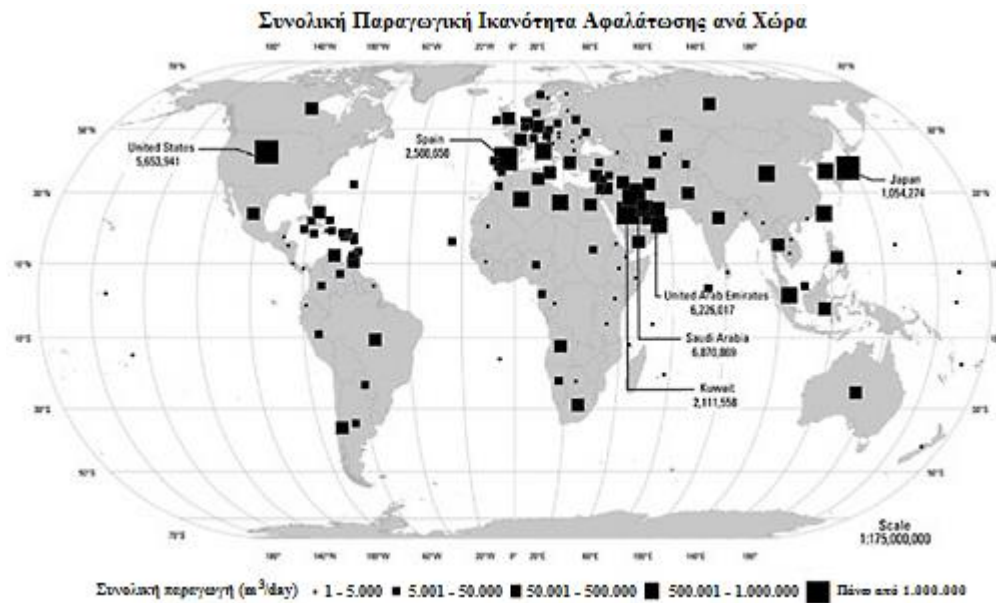
MSF, ενώ στις Ηνωμένες Πολιτείες η RO είναι η κυρίαρχη τεχνολογία αφαλάτωσης, με τις διεργασίες μεμβρανών (RO και NF) να αντιπροσωπεύουν το 84% της παραγωγικής ικανότητας αφαλάτωσης της χώρας (Σχήμα 5(β)).



Σχήμα 5. Κατανομή της παραγωγικής ικανότητας αφαλάτωσης για διαφορετικές τεχνολογίες διαχωρισμού: (α) σε όλο τον κόσμο, (β) στις Η.Π.Α. και (γ) στη Μέση Ανατολή (περιλαμβάνονται οι χώρες Σαουδική Αραβία, Κουβέιτ, Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, Κατάρ, Μπαχρέιν και Ομάν) [4].

2.4. Παγκόσμια παραγωγική ικανότητα ανά χώρα.

Πολλές άλλες χώρες έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούν αφαλάτωση για την παραγωγή πόσιμου νερού, αλλά καμία άλλη περιοχή του κόσμου δε έχει θέσει σε εφαρμογή διεργασίες αφαλάτωσης σε τόσο μεγάλη κλίμακα όπως η Μέση Ανατολή. Η Ισπανία έχει χρησιμοποιήσει αφαλάτωση από το 1964 για την παροχή πόσιμου νερού στις Καναρίους Νήσους, τις Βαλεαρίδες Νήσους και κατά μήκος της νότιας και ανατολικής ακτής. Η Ισπανία και η Ιταλία κατέχουν το μεγαλύτερο μέρος της ευρωπαϊκής παραγωγικής ικανότητας αφαλάτωσης, με κάθε χώρα να κατέχει το 2,6% της παγκόσμιας παραγωγικής ικανότητας κόσμο. Το 69% των μονάδων αφαλάτωσης στην Ισπανία χρησιμοποιούν την τεχνολογία RO, ενώ μόνο το 20% των μονάδων στην Ιταλία κάνουν χρήση RO. Η Ιαπωνία κατέχει το 3,7% της παγκόσμιας παραγωγής και κάνει χρήση τεχνολογίας αφαλάτωσης RO θαλασσινού νερού από το 1974. Η Κίνα έχει σημειώσει μία εκρηκτική αύξηση πληθυσμού σε συνδυασμό με σύγχρονη ανάπτυξη και εκβιομηχάνιση αλλά με ελάχιστο έλεγχο και προστασία των υδάτινων πόρων. Ως εκ τούτου, η τρέχουσα στρατηγική μεταφοράς νερού (από τους νότιους υδάτινους πόρους στη φτώχη σε νερό Βόρεια Κίνα) δεν είναι πλέον επαρκής και η χώρα έχει αρχίσει να διερευνά τεχνολογίες αφαλάτωσης. Ειδικότερα, μια μελέτη για αυτό το σκοπό βρίσκεται σε εξέλιξη για μια μονάδα θερμικής αφαλάτωσης (MED) των σε συνδυασμό με ένα εργοστάσιο πυρηνικής ενέργειας στην περιοχή Γιαντάι. Χώρες της Βόρειας Αφρικής και της Μέσης Ανατολής, όπως η Αλγερία, η Τυνησία και η Ιορδανία, έχουν περιορισμένους πόρους γλυκού νερού και έχουν διερευνήσει τη χρήση αφαλάτωσης τόσο υφάλμυρου όσο και θαλασσινού νερού. Η μεγαλύτερη μονάδα αφαλάτωσης RO υφάλμυρου νερού στον κόσμο ολοκληρώθηκε το 2006 στο Wadi Ma'in της Ιορδανίας, που λειτουργεί σε 129.000 m³/day, με μέγιστη χωρητικότητα άνω των 150.000 m³/day. Η Αλγερία σχεδιάζει να αυξήσει τον αριθμό των μονάδων της από 10 σε 43 μέχρι το έτος 2019, με στόχο την παραγωγή 2 εκατομμυρίων m³/day το 2007 άρχισε στην πρωτεύουσα της Αλγερίας, τη πόλη Algiers, η μεγαλύτερη σε παραγωγή μονάδα αφαλάτωσης RO στην Αφρική με 200.000 m³/day. Χώρες της Νότιας Αμερικής, όπως η Χιλή, έχουν εφαρμόσει πρόσφατα μεγάλες εγκαταστάσεις αφαλάτωσης και η Αυστραλία έχει μάχεται κατά της κρίσης του νερού με νέες εγκαταστάσεις RO από τη Μελβούρνη έως τη Χρυσή Ακτή. Η Αγγλία κατασκεύασε το πρώτο εργοστάσιο αφαλάτωσης στο ανατολικό Λονδίνο, χρησιμοποιώντας τις εκβολές του Τάμεση ως πηγή υφάλμυρου νερού η παραγωγή πόσιμου νερού ξεκίνησε το 2010 και ανέρχεται στα 150.000 m³/day. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται ο παγκόσμιος χάρτης κατανομής της παγκόσμιας παραγωγικής ικανότητας αφαλάτωσης.



Σχήμα 6. Κατανομή Παγκόσμιας Παραγωγικής Ικανότητας Αφαλάτωσης (2006) [5].

Παρά το γεγονός ότι οι διεργασίες αφαλάτωσης μεμβρανών και απόσταξης μοιράζονται εξίσου τη τρέχουσα παγκόσμια ικανότητα παραγωγής, η RO αναδεικνύεται ως ο ηγέτης στις μελλοντικές εγκαταστάσεις αφαλάτωσης. Η RO θα είναι το κλειδί για την αύξηση των προμηθειών νερού και την παραγωγή πόσιμου νερού σε όλο τον κόσμο. Αν και οι πλούσιες χώρες της Μέσης Ανατολής είναι σε θέση να αντέξουν οικονομικά τις διεργασίες απόσταξης, η RO τεχνολογία μπορεί να παράγει πλέον φρέσκο νερό (από το θαλασσινό νερό) στο μισό ή στο ένα τρίτο του κόστους της απόσταξης. Η αφαλάτωση υφάλμυρου νερού είναι ακόμη λιγότερο δαπανηρή από την αφαλάτωση θαλασσινού νερού.

3. Όσμωση και αφαλάτωση.

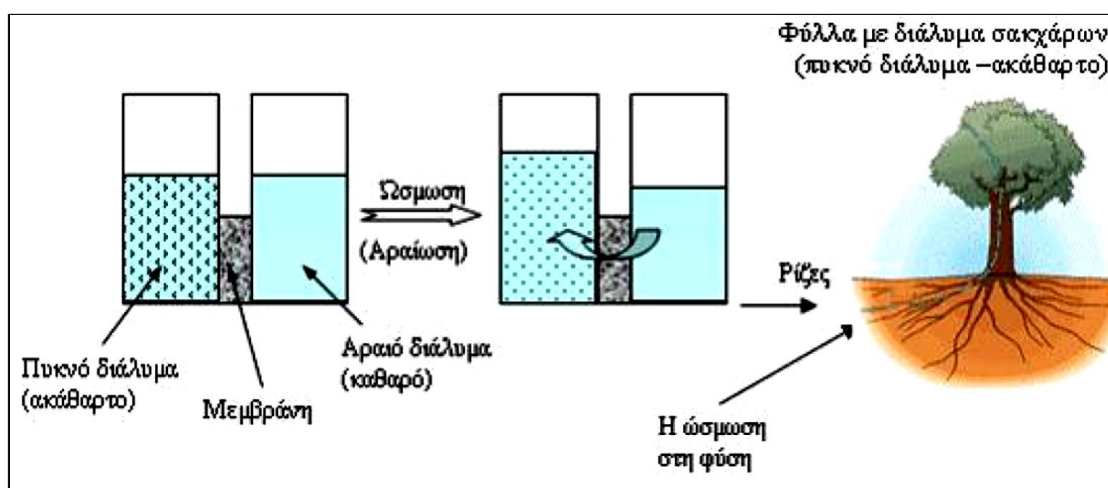
3.1. Το φυσικό φαινόμενο της όσμωσης.

Η όσμωση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο δύο διαλύματα, όταν χωρίζονται από μία ημιπερατή μεμβράνη, το νερό θα περάσει και θα κινηθεί από το αραιότερο προς το πυκνότερο διάλυμα, ώστε το τελευταίο να αραιωθεί και τελικά να γίνει και αυτό το ίδιο καθαρό.

Η διαδικασία αυτή είναι φυσικό φαινόμενο και με αυτόν τον τρόπο ανταλλάσσονται υγρά στα κύτταρα του ανθρώπινου οργανισμού, καθώς επίσης στα ζώα και τα φυτά.

Η όσμωση, σε συνδυασμό με τα τριχοειδή φαινόμενα, είναι υπεύθυνη για την ανύψωση του νερού από τις ρίζες στα φύλλα των δέντρων καθώς τα διαλύματα των κυττάρων των φύλλων είναι πιο πυκνά με αποτέλεσμα νερό να κινείται προς αυτά για να αραιωθούν.

Το φαινόμενο της όσμωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 7:

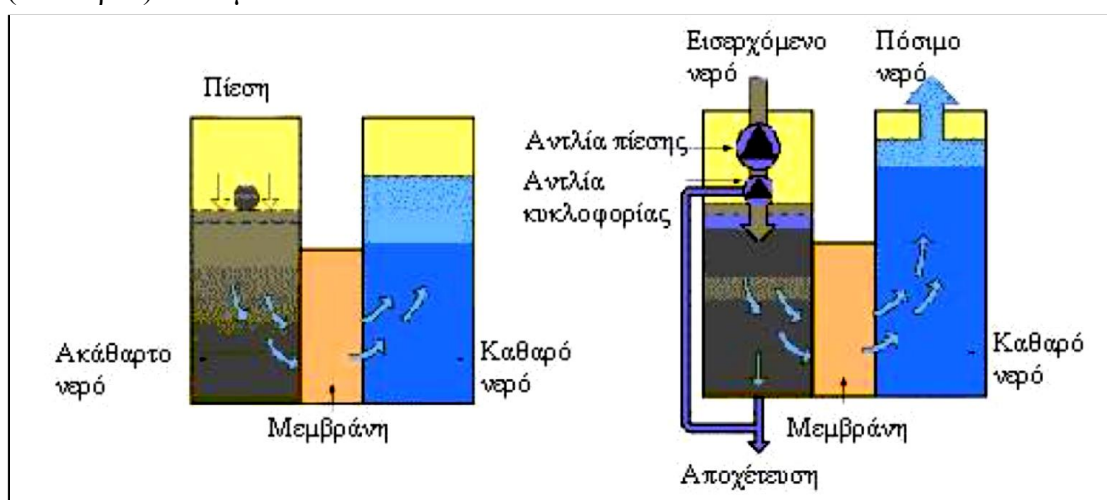


Σχήμα 7. Το φαινόμενο της ώσμωσης [6].

3.2. Αντίστροφη όσμωση.

Το αντίθετο της όσμωσης είναι η αντίστροφη όσμωση, όπου το προς καθαρισμό νερό πιέζεται να περάσει μέσα από μία μεμβράνη η οποία επιτρέπει επιλεκτικά μόνο τα μόρια του νερού να περάσουν μέσα από αυτήν. Το εξερχόμενο νερό είναι ελεύθερο από κάθε είδους ακαθαρσίες, από σκουριές, άλατα, οργανικές ουσίες λιπάσματα, παρασιτοκτόνα, μέχρι και κάθε είδους επικίνδυνους μικροοργανισμούς, βακτήρια και ιούς. Οι παραπάνω προσμίξεις απορρίπτονται στην αποχέτευση μαζί με ένα ποσοστό νερού.

Η διαδικασία παρουσιάζεται στο Σχήμα 8. Εφαρμόζοντας πίεση στο ακάθαρτο (πυκνό) διάλυμα, η μεμβράνη θα αφήσει να περάσει μόνο το καθαρό νερό από το πυκνό στο καθαρότερο διάλυμα. Οι ακαθαρσίες θα παραμείνουν στο πυκνό (ακάθαρτο) διάλυμα.



Σχήμα 8. Αντίστροφη όσμωση [6].

3.3. Οσμωτική πίεση.

Οσμωτική πίεση ονομάζεται η πίεση που πρέπει να ασκηθεί εξωτερικά σε διάλυμα, που διαχωρίζεται με ημιπερατή μεμβράνη από τον καθαρό διαλύτη του, ώστε να εμποδιστεί το φαινόμενο της όσμωσης, χωρίς να μεταβληθεί ο όγκος του διαλύματος.

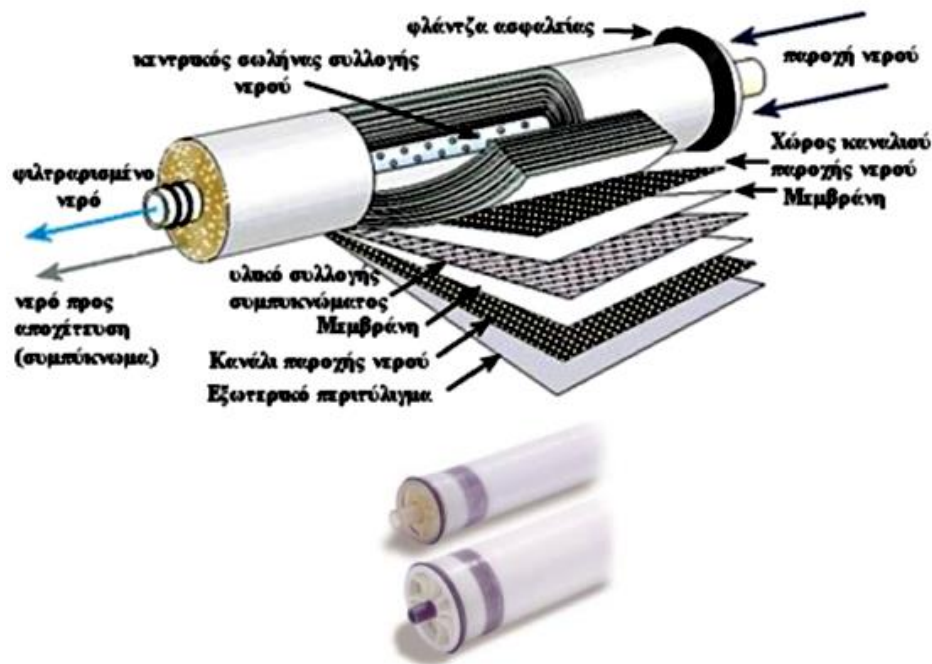
Η αριθμητική τιμή της οσμωτικής πίεσης είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης του νερού σε άλατα και της θερμοκρασίας του, ανεξάρτητη δε από τη μεμβράνη.

Το κανονικό θαλασσινό νερό αλμυρότητας 35.000 mg/L έχει οσμωτική πίεση 26 bar, ενώ σε νερό με αλμυρότητα 50.000 mg/L η οσμωτική πίεση ανέρχεται σε 38 bar.

3.4. Αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση.

Αφαλάτωση είναι η διεργασία διαχωρισμού αλάτων και νερού από υδατικά, αλατούχα διαλύματα και εφαρμόζεται σε μεγάλη κλίμακα για την παραγωγή καθαρού νερού για κάθε χρήση (οικιακή, βιομηχανική, αγροτική).

Κατά την αφαλάτωση με τη μέθοδο της αντίστροφης όσμωσης το αλμυρό νερό εισέρχεται σε στοιχεία μεμβρανών με πίεση, που εφαρμόζεται μέσω αντλιών, μεγαλύτερη από την οσμωτική πίεση του αλμυρού νερού. Όταν η πίεση του αλμυρού νερού ξεπερνά τη φυσική οσμωτική πίεση, το φρέσκο νερό περνάει διαμέσου της ημιπερατής μεμβράνης και συλλέγεται από τον διάτρητο κεντρικό σωλήνα, γύρω από τον οποίο περιτυλίγεται η μεμβράνη, που διέρχεται από τον άξονα του κυλινδρικού στοιχείου μεμβρανών (Σχήμα 9)

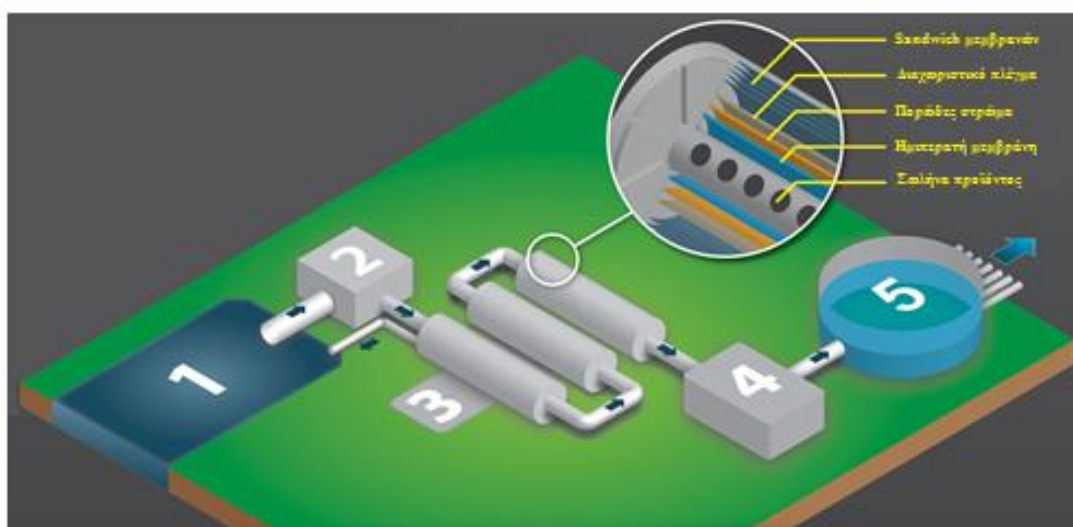


Σχήμα 9. Στοιχείο μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης (RO) [7].

3.5. Στάδια αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση.

Τα στάδια επεξεργασίας αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση παρουσιάζονται στο Σχήμα 10 και είναι τα εξής:

1. Το αλμυρό νερό τροφοδοσίας αντλείται από τη θάλασσα ή από υπόγεια ύδατα.
2. Το νερό προεπεξεργάζεται για την απομάκρυνση των στερεών και τη ρύθμιση του pH για την προστασία του εξοπλισμού.
3. Το νερό οδηγείται μέσω μεμβρανών οι οποίες παρεμποδίζουν την διέλευση του αλατιού.
4. Το προϊόν μετεπεξεργάζεται με σταθεροποίηση του pH (ρύθμιση οξύτητας / αλκαλικότητας)
5. Το νερό αποθηκεύεται και διανέμεται σε κοινότητες όταν είναι απαραίτητο.



Σχήμα 10. Στάδια επεξεργασίας αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση [8].

4. Μεμβράνες RO.

Οι μεμβράνες διαχωρισμού RO είναι πολύ λεπτά φύλλα τα οποία αποτελούν ένα φράγμα στην ελεύθερη ροή του διαλύματος τροφοδότησης. Αποτελούνται από δύο διακεκριμένες στοιβάδες:

- α) μία λεπτότατη, τον υμένα (skin) που είναι το δραστικό τμήμα της μεμβράνης για το διαχωρισμό του νερού από τα διαλυμένα ή αιωρούμενα συστατικά και
- β) ένα λεπτό στρώμα αποτελούμενο από πορώδες υλικό το οποίο είναι περατό τόσο από το νερό όσο και από τα υπόλοιπα συστατικά που περιέχονται σε αυτό.

Οι μεμβράνες RO κατασκευάζονται κυρίως από συνθετικά υλικά (λεπτό συνθετικό στρώμα), γνωστά ως TFC, όπως είναι τα πολυμερή πολυαμιδίου (PA).

Οι παλαιότερες μεμβράνες είναι κατασκευασμένες από οξική κυτταρίνη (Cellulose acetate, CA).



Εικόνα 1. Χρησιμοποιημένη μεμβράνη RO [9].

4.1. Χαρακτηριστικά μεμβρανών RO.

Τα χαρακτηριστικά των μεμβρανών RO είναι τα εξής:

- Εύκολη κατασκευή
- Χαμηλό κόστος
- Ικανοποιητική διάρκεια ζωής
- Ικανοποιητική μηχανική αντοχή κατά τη συναρμολόγηση της
- Χημική, φυσική και θερμική σταθερότητα στο θαλασσινό νερό αλλά και στο υφάλμυρο
- Μεγάλη περατότητα στο νερό και συγχρόνως η μεγαλύτερη δυνατή απόρριψη αλάτων
- Το μικρότερο δυνατό πάχος

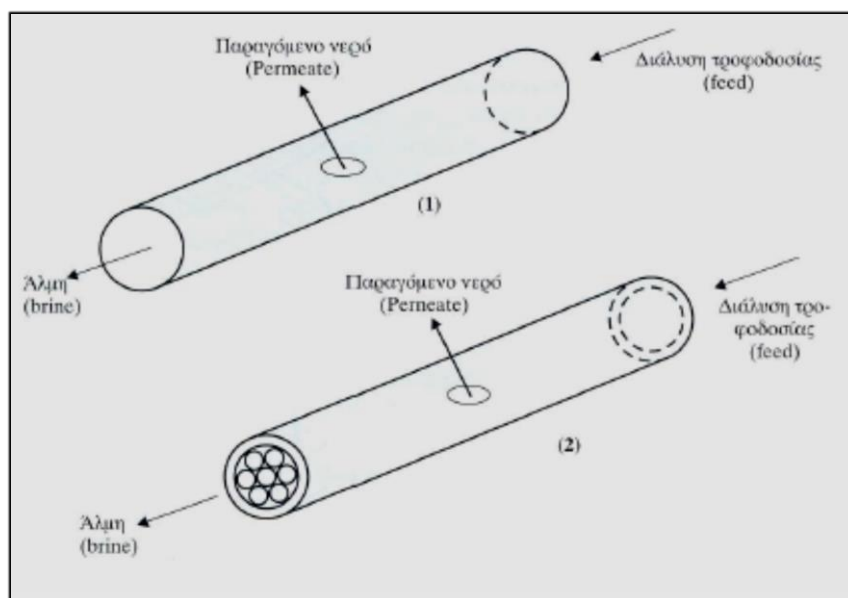
4.2. Τύποι μεμβρανών RO.

Υπάρχουν τέσσερις τύποι μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης:

- Σωληνωτός τύπος
- Σπειροειδής τύπος
- Τύπος κοίλων ινών ή τριχοειδών σωλήνων
- Τύπος δίσκων – πλαισίου ή επίπεδος τύπος

4.2.1. Σωληνωτός τύπος

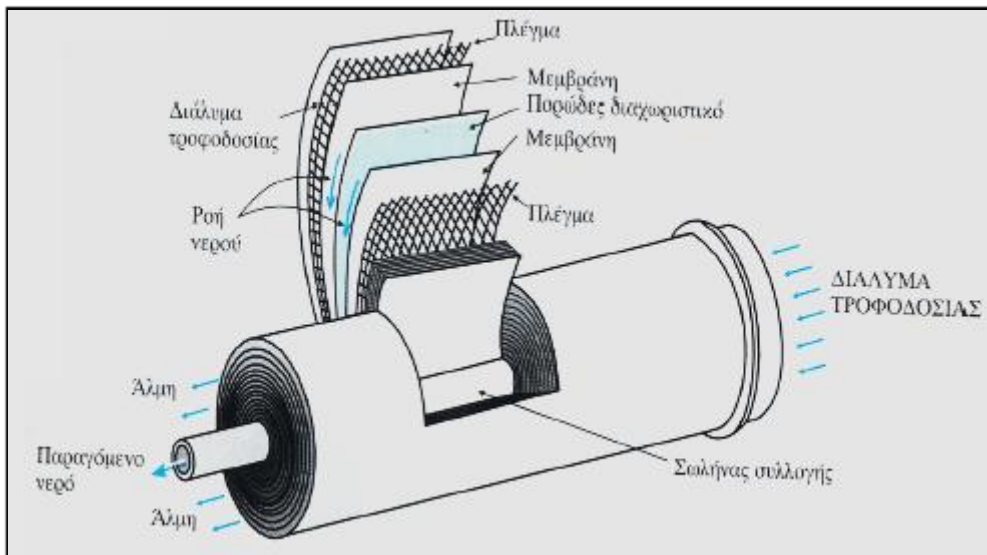
Οι μεμβράνες τοποθετούνται μέσα σε διάτρητους μεταλλικούς ή σε πορώδεις σωλήνες στήριξης από fiberglass. Το νερό προς καθαρισμό τροφοδοτείται υπό πίεση στο ένα άκρο του σωλήνα, η διάμετρος του οποίου είναι 0,5 – 1 ίντσες. Το καθαρό νερό περνάει από τη μεμβράνη και συλλέγεται στο εξωτερικό μέρος του σωλήνα. Το απορριπτό συμπύκνωμα βγαίνει από το άλλο μέρος του σωλήνα. Τα υλικά κατασκευής αυτού του τύπου μεμβρανών είναι η οξική κυτταρίνη και στα πλεονεκτήματά του συγκαταλέγονται η μεγάλη αντοχή στη ρύπανση και ο εύκολος καθαρισμός και μάλιστα με μηχανικά μέσα. Τα μειονεκτήματά του είναι ότι πρόκειται για λιγότερο συμπαγή διάταξη και έχει μικρότερες ανοχές θερμοκρασίας και pH (pH 2-8 μέχρι 15 °C και pH 3-6 μέχρι 30 °C).



Σχήμα 11. Σωληνωτός τύπος μεμβρανών [10].

4.2.2. Σπειροειδής τύπος

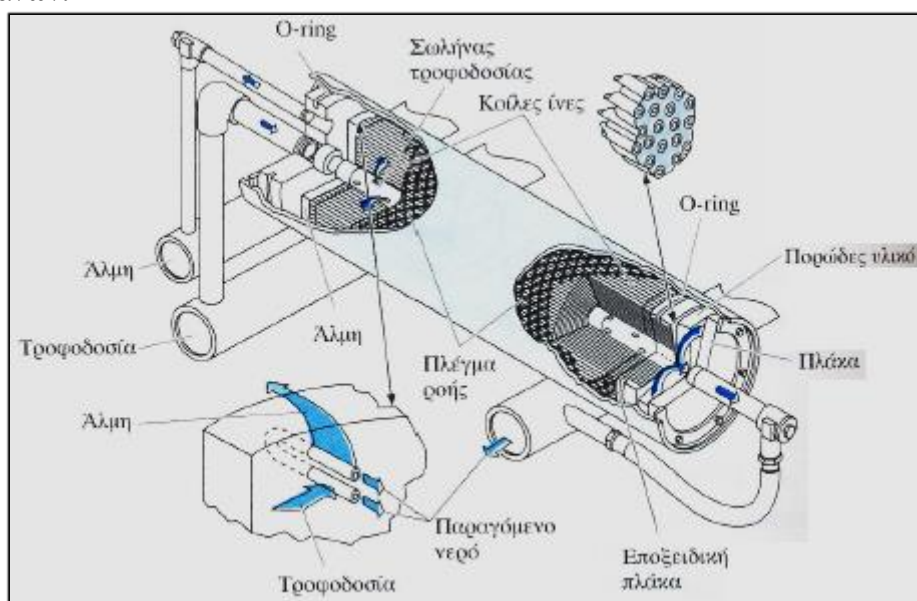
Δύο μεμβράνες τοποθετούνται σε επαφή με ένα πορώδες εύκαμπτο υλικό στήριξης, ώστε να δημιουργείται η διάταξη, μεμβράνη – υλικό στήριξης – μεμβράνη. Τα τρία αυτά στρώματα στερεώνονται μαζί στην άκρη. Ένας διάτρητος σωλήνας παρεμβάλλεται μεταξύ των μεμβρανών, το συγκρότημα των μεμβρανών τυλίγεται πάνω σε αυτόν τον σωλήνα μαζί με ένα κατάλληλο υλικό που χρησιμεύει στο να διαχωρίζει τις επιφάνειες των μεμβρανών και δημιουργείται έτσι ένας κύλινδρος. Ο κύλινδρος αυτός τροφοδοτείται μέσω της διόδου που έχει προβλεφθεί στο διαχωριστικό υλικό, ενώ το προϊόν ρέει σπειροειδώς προς τον κεντρικό σωλήνα, ο οποίος είναι προσκολλημένος στο τοίχωμα του δοχείου πίεσης. Ο τύπος αυτός αποτελεί ένα βήμα βελτίωσης του προηγούμενου τύπου, όσον αφορά την επίτευξη μεγαλύτερων επιφανειών μεμβράνης σε ένα ορισμένο όγκο συσκευής. Παρουσιάζει ενδιάμεσα χαρακτηριστικά γνωρίσματα μεταξύ του σωληνωτού τύπου και του τύπου κοίλων ινών.



Σχήμα 12. Σπειροειδής τύπος μεμβρανών [10].

4.2.3. Τύπος κοίλων ινών ή τριχοειδών σωλήνων.

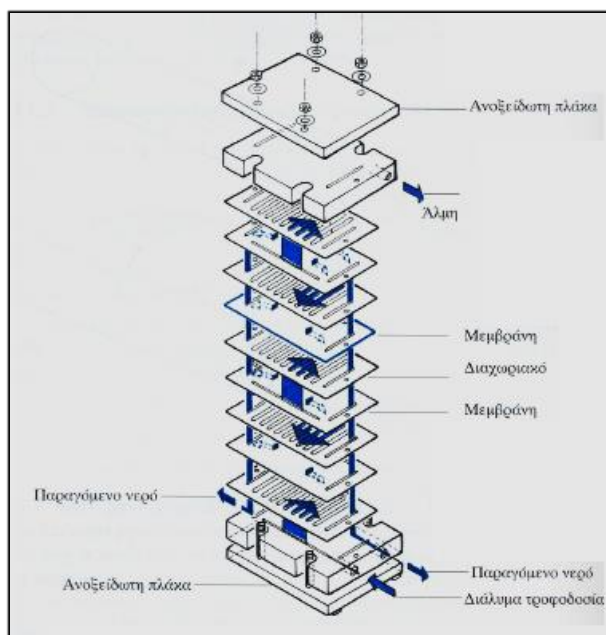
Αποτελεί τη πιο συμπαγή διάταξη από όλες, χρησιμοποιώντας ίνες εσωτερικής διαμέτρου 42 μm και εξωτερικής διαμέτρου 85 μm . Σε ένα σωλήνα 4 ιντσών περιέχονται ένα εκατομμύριο τέτοιες ίνες πολλαπλασιάζοντας την ανά μονάδα όγκου επιφάνεια της συσκευής κατά 50 φορές σε σχέση με τον σωληνωτό τύπο και κατά 15 περίπου φορές σε σχέση με τον σπειροειδή τύπο. Ο τύπος αυτός αποτελεί την πιο εξελιγμένη μορφή των μεμβρανών και βρίσκει μεγάλη εφαρμογή παγκοσμίως. Το υλικό κατασκευής είναι το πολυαμίδιο. Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου μεμβρανών είναι η πιο συμπαγής κατασκευή του και η αντοχή σε συνθήκες θερμοκρασιών και pH (pH 4-11 έως 35 °C), ενώ στα μειονεκτήματα περιλαμβάνονται η εύκολη ρύπανση και η απαραίτητη χρήση χημικών κατά τον καθαρισμό των μεμβρανών.



Σχήμα 13. Τύπος κοίλων ινών [10].

4.2.4. Τύπος δίσκων – πλαισίου ή επίπεδος τύπος.

Πρόκειται για σύνολο μεμβρανών επίπεδου σχήματος, οι οποίες τοποθετούνται ενδιάμεσα σε διάτρητα πορώδη πλαίσια. Τα πλαίσια αυτά χρησιμεύουν για τη στήριξη των μεμβρανών. Το νερό τροφοδοσίας ρέει ανάμεσα στο στενό άνοιγμα που μεσολαβεί μεταξύ των επιφανειών των μεμβρανών, ενώ το προϊόν συλλέγεται διαμέσου των ειδικών ανοιγμάτων που έχουν τα πλαίσια. Αυτός ο τύπος αποτελεί μία από τις πρώτες και απλούστερες κατασκευές.



Σχήμα 14. Επίπεδος τύπος μεμβρανών [10].

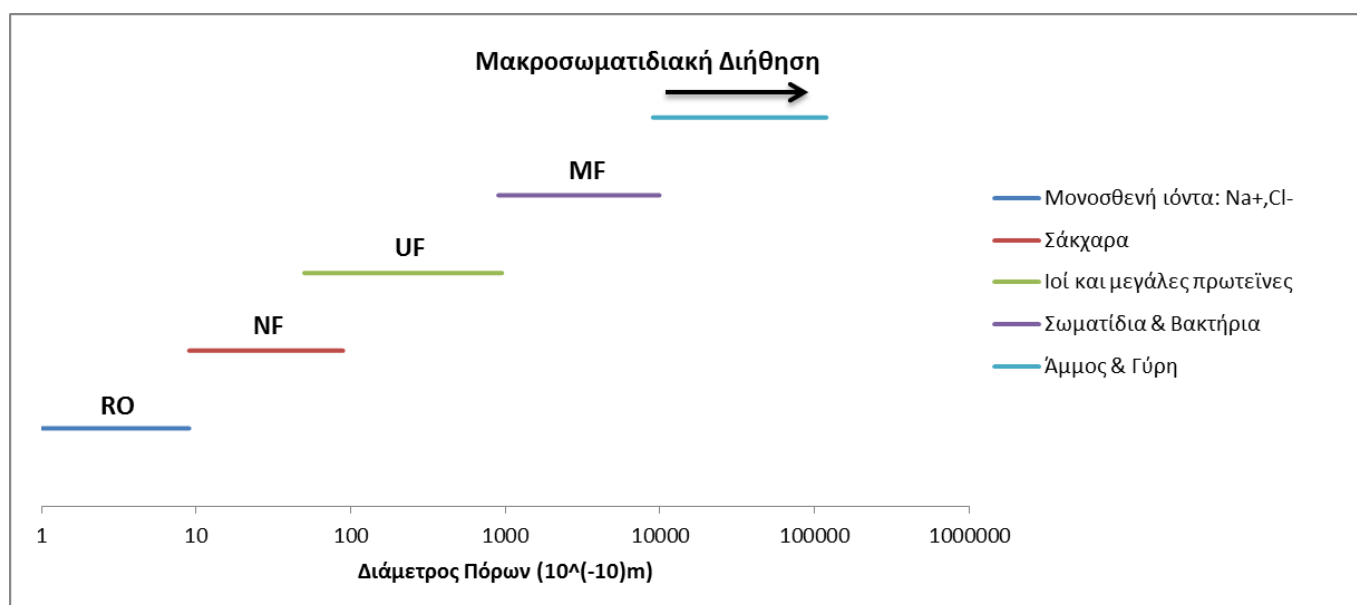
4.2.5. Σύγκριση τύπων μεμβρανών

Παρακάτω ακολουθεί μία σύγκριση των τύπων μεμβρανών σε 5 βασικούς τομείς:

- *Κόστος συστήματος:*
σωληνωτός, επίπεδος >> κοίλων ινών, σπειροειδής
- *Ευελιξία σχεδιασμού:*
σπειροειδής > κοίλων ινών > επίπεδος > σωληνωτός
- *Απαιτούμενος χώρος συστήματος:*
σωληνωτός >> επίπεδος > σπειροειδής > κοίλων ινών
- *Ευαισθησία σε ρύπανση:*
κοίλων ινών >> σπειροειδής > επίπεδος > σωληνωτός
- *Χρήση ενέργειας:*
σωληνωτός > επίπεδος > κοίλων ινών > σπειροειδής.

5. Αντίστροφη όσμωση: Βασικές αρχές.

Οι μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης δεν έχουν διακριτούς πόρους που διαπερνούν τη μεμβράνη και συγκαταλέγονται στις μεμβράνες που βρίσκονται σε πολύ μεγάλη διαθεσιμότητα εμπορικώς. Το πολυμερές υλικό των μεμβρανών RO σχηματίζει μία στρωματοποιημένη, δικτυωτή δομή, και το νερό πρέπει να ακολουθεί μία ελικοειδή οδό διαμέσου της μεμβράνης για να φθάσει στη περατή πλευρά. Οι μεμβράνες RO μπορούν να απορρίψουν του μικρότερους ρύπους, μονοσθενή ιόντα, ενώ άλλες μεμβράνες, όπως της νανοδιήθησης (NF), της υπερδιήθησης (UF), και της μικροδιήθησης (MF), έχουν σχεδιαστεί για την αφαίρεση υλικών αυξανόμενου μεγέθους, όπως υποδεικνύεται στο Σχήμα 15.



Σχήμα 15. Εύρος ονομαστικής διαμέτρου πόρων για εμπορικά διαθέσιμες μεμβράνες [4].

Οι UF και NF μεμβράνες επίσης κατηγοριοποιούνται με βάση το μοριακό βάρος αποκοπής (MWCO) (Molecular Weight Cut-Off), ή το μοριακό βάρος, όπου η μεμβράνη θα διατηρήσει το 90% της διαλυμένης ουσίας στο διάλυμα. Το γενικό εύρος τιμών MWCO για UF και NF είναι 2.000-500.000 Da και 250-2.000 Da αντίστοιχα. Η MF μεμβράνες συνήθως χαρακτηρίζονται από το ονομαστικό μέγεθος πόρου (0,05 mm-10 mm) ή από την απόρριψη της μεμβράνης (90% απόρριψη ενός συγκεκριμένου μεγέθους σε mm).

Οι μεμβράνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε σε διήθηση με ροή κατά μέτωπο (dead-end flow) είτε σε διήθηση με διασταυρούμενη (εγκάστρια) ροή (cross-flow). Οι μεμβράνες RO συνήθως λειτουργούν σε διασταυρούμενης ροής λειτουργία και είναι πιο συχνά διαθέσιμες ως σπειροειδείς ενότητες, όπου τα φύλλα της μεμβράνης τυλίγονται γύρω από ένα εσωτερικό σωλήνα που συλλέγει το προϊόν διαπέρασης. Οι περισσότερες μεμβράνες επιτρέπουν τη διήθηση διαμέσου των πόρων ροής, όπου το ρευστό ωθείται διαμέσου της μεμβράνης με μια θετική υδροστατική πίεση. Η ροή του υγρού εξαρτάται από τη πορότητα της μεμβράνης, το ποσοστό του όγκου της

μεμβράνης που είναι κενός χώρος και μπορεί να περιέχει υγρό, και την ελίκωση, η απόσταση την οποία ένα μόριο πρέπει να ταξιδέψει διαμέσου της μεμβράνης διαιρούμενη με το πάχος της μεμβράνης. Ροή ρευστού μέσω μεμβρανών συμβαίνει επίσης λόγω διάχυσης. Η γενική σχέση που περιγράφει την μεταφορά μέσω των πόρων και λόγω διάχυσης μπορεί να εκφραστεί ως εξής :

$$N_{Ax} = \frac{\rho_A \kappa}{\mu} \frac{dp}{dx} - D_{AB} \frac{d\rho_A}{dx} \quad (5.1)$$

όπου N_{Ax} είναι η ροή μάζας του A στην x-κατεύθυνση (κάθετη στην επιφάνεια της μεμβράνης), ρ_A είναι η πυκνότητα του A, κ είναι η διαπερατότητα, μ είναι το ιξώδες, dp/dx είναι η μεταβολή της πίεσης κατά τη διεύθυνση x, και D_{AB} είναι ο συντελεστής διάχυσης για τη διάδοση του A στο B (η μεμβράνη). Για MF και UF μεμβράνες, ο όρος διάχυσης είναι αμελητέος σε σύγκριση με τον όρο συναγωγής. Η μεταφορά του διαλύτη μέσω των μεμβρανών NF πραγματοποιείται μέσω ενός συνδυασμού ροής εκ μεταφοράς και διάχυσης, ενώ πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι η μεταφορά διαλυμένων ουσιών μέσω NF μεμβρανών ελέγχεται κυρίως από τη διάχυση.

Η μεταφορά μέσω μεμβρανών RO, ωστόσο, ελέγχεται από διάχυση, και δεν υπάρχουν ανοικτά κανάλια για ροή μέσω πόρων. Ο μηχανισμός μεταφοράς της RO έχει χαρακτηριστεί μηχανισμός διάχυσης-διάλυσης. Στο μοντέλο διάχυσης-διάλυσης, η μεταφορά νερού κατά μήκος μιας μεμβράνης RO συμβαίνει σε τρία ξεχωριστά στάδια: απορρόφηση πάνω στην επιφάνεια της μεμβράνης, διάχυση μέσω του πάχους της μεμβράνης, και εκρόφιση από την επιφάνεια διαπέρασης του προϊόντος της μεμβράνης. Μόλις ένα μόριο νερού έχει απορροφηθεί επί της επιφάνειας της μεμβράνης, η μεταβολή συγκέντρωσης νερού (του συστήματος νερού-μεμβράνης) κατά μήκος της μεμβράνης προκαλεί τα μόρια του νερού να διαχυθούν λόγω διαφοράς συγκέντρωσης προς την πλευρά διαπέρασης της μεμβράνης. Τα μόρια του νερού απομακρύνονται στη συνέχεια από τη μεμβράνη και γίνονται μέρος του όγκου διαπέρασης. Μια μεμβράνη RO λειτουργεί με την επίτευξη μιας υδροστατικής πίεσης μεγαλύτερη από την οσμωτική πίεση του διαλύματος. Η θετική διαφορά πίεσης δημιουργεί μια χημική διαφορά δυναμικού (μεταβολή συγκέντρωσης) κατά μήκος της μεμβράνης η οποία κινεί το υγρό διαμέσου της μεμβράνης αντίθετα από την φυσική κατεύθυνση της όσμωσης (κίνηση των μορίων του νερού από μια περιοχή υψηλής συγκέντρωσης σε μια περιοχή χαμηλής συγκέντρωσης), ενώ τα άλατα διατηρούνται και συγκεντρώνονται στην επιφάνεια εισροής της μεμβράνης. Κάποια διέλευση άλατος διαμέσου της μεμβράνης συμβαίνει. Η διέλευση άλατος για την ίδια μεμβράνη αυξάνει με την συγκέντρωση άλατος και τη θερμοκρασία. Η μεταφοράς μάζας μέσω των μεμβρανών RO μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

$$N_A = L(\Delta p - \Delta \pi) \quad (5.2)$$

όπου N_A είναι η ροή του υγρού (νερό) διαμέσου της μεμβράνης, L είναι ο συντελεστής διαπερατότητας, Δp είναι η διαμεμβρανική διαφορά πίεσης, και $\Delta \pi$ είναι η διαφορά οσμωτικής πίεσης μεταξύ του εισαγόμενου και του εξαγόμενου νερού (διήθημα). Η οσμωτική πίεση π εξαρτάται από τη συγκέντρωση του διαλύματος και

τη θερμοκρασία του διαλύματος. Για ένα θερμοδυναμικά ιδανικό διάλυμα, η σχέση περιγράφεται ως εξής:

$$\pi = CRT \quad (5.3)$$

όπου C είναι η συγκέντρωση ιόντων (μοριακές μονάδες), R είναι η σταθερά ιδανικών αερίων και T είναι η θερμοκρασία λειτουργίας.

Ο συντελεστής διαπερατότητας L εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της μεμβράνης και περιγράφεται από τη σχέση:

$$L = \frac{DSV}{RTl} \quad (5.4)$$

όπου D είναι η ικανότητα διάχυσης του νερού, S είναι η διαλυτότητα στο νερό, V είναι ο μερικός γραμμομοριακός όγκος του νερού, R είναι η σταθερά ιδανικών αερίων, T είναι η θερμοκρασία λειτουργίας και l είναι το πάχος της μεμβράνης. Αυτός ο ορισμός του L βασίζεται στο μοντέλο διάχυσης-διάλυσης της μεταφοράς νερού μέσω μιας μεμβράνης RO.

Η οσμωτική πίεση του θαλασσινού νερού κυμαίνεται μεταξύ 2.300-2.600 kPa και μπορεί να είναι τόσο υψηλή όσο 3.500 kPa. Οι οσμωτικές πιέσεις υφάλμυρου νερού είναι πολύ μικρότερες από ότι εκείνες του θαλασσινού νερού. Για ένα εύρος συγκέντρωσης από 2000-5000 mg / L, οι οσμωτικές πιέσεις κυμαίνονται από 100 έως 300 kPa. Η οσμωτική πίεση π στο συμπύκνωμα συσχετίζεται με την ανάκτηση R_w από τη σχέση:

$$\pi_{\text{concentrate}} = \left(\frac{1}{1-R_w} \right) \quad (5.5)$$

Για να ξεπεραστεί η οσμωτική πίεση, οι πιέσεις τροφοδοσίας σε εφαρμογές θαλάσσιων υδάτων κυμαίνονται από 6000 έως 8000 kPa, ενώ αυτές σε υφάλμυρο νερό είναι από 600-3000 kPa.

Η ανάκτηση είναι ένας σημαντικός δείκτης της απόδοσης της RO. Η ανάκτηση μιας μεμβράνης ή ενός συνολικού συστήματος RO δίνεται από τη σχέση:

$$R_w = \frac{Q_p}{Q_f} \quad (5.6)$$

όπου Q_p είναι ο ογκομετρικός ρυθμός ροής διαπέρασης και Q_f είναι ο ογκομετρικός ρυθμός ροής τροφοδοσίας. Η ανάκτηση αντίστροφης όσμωσης κυμαίνεται από 35% έως 85%, ανάλογα με τη σύσταση του τροφοδοτούμενου νερού, την αλατότητα του τροφοδοτούμενου νερού, την προεπεξεργασία, τις επιλογές απόρριψης του συμπυκνώματος, καθώς και τη διαμόρφωση βέλτιστου ενεργειακού σχεδιασμού. Μικρές μεταβολές στην ανάκτηση μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά το συνολικό κόστος του συστήματος RO, καθώς και την έκταση των τυπικών περιοριστικών

παραγόντων, όπως την οσμωτική πίεση, την προδιάθεση ρύπανσης και τις επικαθίσεις από δυσδιάλυτα άλατα (mineral scaling). Μία αύξηση στην ανάκτηση απαιτεί μια αύξηση στην πίεσης τροφοδοσίας και μία αύξηση στην ροή διαπέρασης. Αύξηση της επιφάνειας της μεμβράνης μπορεί επίσης να είναι αναγκαία για να βελτιστοποιηθεί η υψηλότερη ανάκτηση. Όταν διαπερνούσα ροή αυξάνεται, μειώνεται η αλατότητα του διηθήματος λόγω αύξησης της αραίωσης. Ωστόσο, λειτουργώντας μια μονάδα RO σε μια υψηλότερη ροή διαπέρασης συχνά οδηγεί σε μείωση της ροής, και η λειτουργία μιας μονάδας RO σε υψηλότερη ανάκτηση χωρίς αύξηση στην ροής προκαλεί μία αύξηση στο πέρασμα άλατος. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας RO, πόλωση της συγκέντρωσης λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια της μεμβράνης, όπου διαλυμένα ιόντα συσσωρεύονται σε ένα λεπτό στρώμα του νερού τροφοδοσίας. Πόλωση της συγκέντρωσης είναι ο λόγος της συγκέντρωσης άλατος στην επιφάνεια της μεμβράνης και της συγκέντρωσης άλατος στον κύριο όγκο του διαλύματος. Καθώς η αλατότητα αυξάνει στην επιφάνεια της μεμβράνης, αυξάνει και η τοπική οσμωτική πίεση. Συνεπώς, η συνολική διαφορά πίεσης μεταξύ της υδροστατικής πίεσης και της οσμωτικής πίεσης μειώνεται, μειώνοντας την διαπερνούσα ροή, και η αύξηση της αλατότητας στην επιφάνεια της μεμβράνης αυξάνει τη μεταφορά άλατος διαμέσου της μεμβράνης. Επιπλέον, φαινόμενα όπως η καθίζηση αλάτων και η ρύπανση μπορεί να αυξηθούν λόγω της υψηλότερης τοπικής αλατότητας. Μοντέλα είναι διαθέσιμα για τον υπολογισμό της πραγματικής συγκέντρωσης άλατος στην επιφάνεια της μεμβράνης RO και προβλέπουν την καθίζηση. Η απόδοση της μεμβράνης RO μπορεί επίσης να μετρηθεί από τη ροή άλατος διαμέσου της μεμβράνης, αλλά πιο συχνά μετράται από την απόρριψη άλατος. Η ροή άλατος είναι μία συνάρτηση της συγκέντρωσης άλατος και η μεταφορά άλατος συμβαίνει από μια περιοχή υψηλής συγκέντρωσης άλατος σε μία περιοχή χαμηλής συγκέντρωσης άλατος. Η ροή άλατος περιγράφεται από τη σχέση:

$$N_s = B(C_{\text{feed}} - C_{\text{permeate}}) \quad (5.7)$$

όπου N_s είναι η ροή άλατος διαμέσου της μεμβράνης, B είναι μια σταθερά (παρόμοια με το L στην εξίσωση ροής νερού) που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της μεμβράνης, C_{feed} είναι η συγκέντρωση ιόντων στο διάλυμα τροφοδοσίας, και C_{permeate} είναι η συγκέντρωση ιόντων στο διήθημα. Το B περιγράφεται από τη σχέση:

$$B = \frac{D_s K_s}{l} \quad (5.8)$$

όπου D_s είναι η ικανότητα διάχυσης άλατος διαμέσου της μεμβράνης, K_s είναι ο συντελεστής κατανομής άλατος μεταξύ του διαλύματος και των σταδίων της μεμβράνης και l είναι το πάχος της μεμβράνης.

Η απόρριψη άλατος μέσω μεμβράνης είναι ένα μέτρο της συνολικής απόδοσης του συστήματος μεμβράνης και οι κατασκευαστές μεμβρανών αναφέρουν τυπικώς μια συγκεκριμένη τιμή απόρριψης άλατος για κάθε εμπορικώς διαθέσιμη μεμβράνη. Η

απόρριψη άλατος μέσω μεμβράνης (λειτουργία διασταυρούμενης ροής (cross-flow)) δίνεται ονομαστικά από τη σχέση:

$$R_s = \left(1 - \frac{C_{\text{permeate}}}{C_{\text{feed}}}\right) \times 100\% \quad (5.9)$$

Ωστόσο, οι μεμβράνες RO συνήθως είναι συσκευασμένες σε ένα στοιχείο σπειροειδούς περιέλιξης, όπου πολλές μεμβράνες τυλίγονται γύρω από έναν κεντρικό σωλήνα και διαχωρίζονται με διαχωριστικά. Σε ένα στοιχείο σπειροειδούς περιέλιξης, η τροφοδοσία γίνεται όλο και πιο περιεκτική σε αλάτι από την αρχή μέχρι το τέλος του σωλήνα και η απόρριψη άλατος περιγράφεται από τη σχέση:

$$R_s = \left(1 - \frac{C_{\text{permeate}}}{\frac{C_{\text{feed}} + C_{\text{concentrate}}}{2}}\right) \times 100\% \quad (5.10)$$

όπου $C_{\text{concentrate}}$ είναι η συγκέντρωση ιόντων στο συμπύκνωμα. Όταν οι μεμβράνες δοκιμάζονται χρησιμοποιώντας τη λειτουργία σε ροή κατά μέτωπο η εξ. (9) γίνεται:

$$R_s = \left(1 - \frac{C_{\text{permeate}}}{C_{\text{concentrate}}}\right) \times 100\% \quad (5.11)$$

Οι μεμβράνες RO επιτυγχάνουν απορρίψεις NaCl μεταξύ 98 με 99,8%, ενώ οι NF μεμβράνες εμφανίζουν τιμές απόρριψης μεγαλύτερες από 90% για τα πολυσθενή ιόντα και μεταξύ 60 και 70% για τα μονοσθενή ιόντα. Η απόρριψη άλατος NF, ιδιαίτερα για μονοσθενή ιόντα, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό τη συγκέντρωση των συνολικών διαλυμένων στερεών (TDS) και τη παρουσία άλλων ιόντων.

Ενώ οι κατασκευαστές προσφέρουν μεμβράνες υψηλής απόρριψης άλατος για μονάδες RO, οι μεμβράνες δεν διατηρούν την αρχική απόρριψη άλατος καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής τους (έως 7 έτη με αποτελεσματική προ-επεξεργασία). Η φυσιολογική γήρανση της μεμβράνης προκαλεί στο πέρασμα άλατος (πέρασμα άλατος % = 100 - R_s) αύξηση περίπου 10% ανά έτος και άλλοι παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η αλατότητα, ο στόχος ανάκτησης και ο καθαρισμός, μπορούν επίσης να επηρεάζουν το πέρασμα άλατος.

Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται η διαπερατότητα και για το νερό, και για το αλάτι. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας μπορεί να έχουν αρνητική ή θετική επίδραση στη συνολική του συστήματος RO. Για παράδειγμα, σε θερμοκρασίες κάτω των 30°C, μία αύξηση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας επιτρέπει στο σύστημα να λειτουργεί σε χαμηλότερη πίεση τροφοδοσίας (ή στην ίδια πίεση τροφοδοσίας και σε υψηλότερη διαπερνούσα ροή). Ωστόσο, η επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας στη μείωση της πίεσης τροφοδοσίας είναι μη γραμμική. Περαιτέρω αυξήσεις στη θερμοκρασία αυξάνουν την ωσμωτική πίεση (αυξάνοντας έτσι την απαιτούμενη πίεση τροφοδοσίας) και μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την κατανάλωση ενέργειας, εάν ένα δεύτερο στάδιο RO απαιτείται για να πληρεί το προϊόν τα πρότυπα ποιότητας. Συνήθως, οι μονάδες RO λειτουργούν σε σταθερή

διαπερνούσα ροή όπου η αλατότητας της ποικίλλει αναλογικά με τη θερμοκρασία. Ακόμη και αν μία μονάδα λειτουργεί σε σταθερή πίεση (αυξάνοντας την διαπερνούσα ροή με αύξηση της θερμοκρασίας), η αλατότητα της ροής διαπέρασης θα αυξηθεί με τη θερμοκρασία λόγω μεγαλύτερης αύξησης στην διαπερατότητα του άλατος σε σχέση με την διαπερατότητα του νερού.

Οι αυξήσεις στην αλατότητα του νερού αυξάνουν το πέρασμα άλατος στη μεμβράνη. Η δίοδος άλατος επηρεάζεται τόσο από τη συγκέντρωση των TDS όσο και από τη σύνθεση των δισθενών ιόντων στο διάλυμα, λόγω των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ιόντων και της επιφάνειας της μεμβράνης. Οι μεμβράνες RO έχουν ένα συνολικό αρνητικό επιφανειακό φορτίο και απωθούν τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα ή μόρια. Καθώς απωθούνται αρνητικά ιόντα, περισσότερα κατιόντα από τα ανιόντα είναι παρόντα κοντά στην επιφάνεια της μεμβράνης. Αυτό το φαινόμενο δημιουργεί ένα ηλεκτρικό δυναμικό γνωστό ως δυναμικό Donnan. Το δυναμικό Donnan βοηθά στην απόθεση ιόντων από τη μεμβράνη, αλλά μια αύξηση στην αλατότητα ή τα δισθενή ιόντα μειώνει την επίδραση του δυναμικού Donnan στη απόρριψη άλατος μέσω της μεμβράνης. Το μέγεθος της μεταβολής στην απόρριψη άλατος σε συγκεκριμένες μεμβράνες μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με την σύνθεση του νερού και την αντοχή φορτίου της μεμβράνης. Ο Bartels και άλλοι βρήκαν μια αύξηση στη δίοδο άλατος (για αρκετές διαφορετικές μεμβράνες RO υφάλμυρου νερού) από περίπου 0,4% έως 1,2% και 4% για αύξηση αλατότητας των 1.000 mg / L NaCl - 10.000 mg / L NaCl.

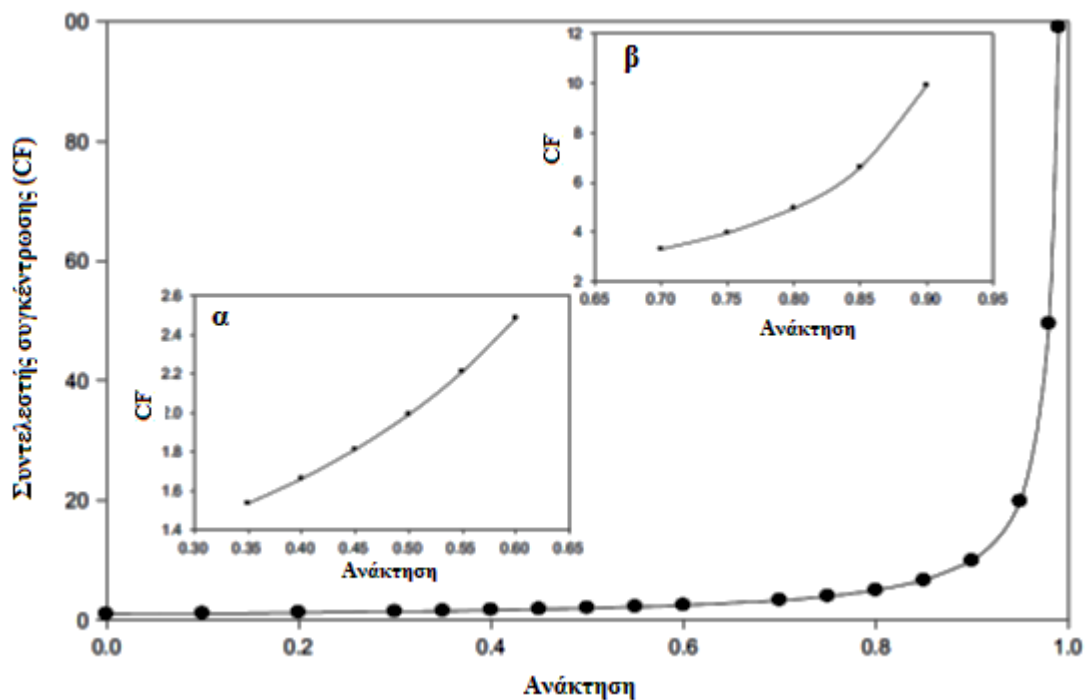
Το επιφανειακό φορτίο της μεμβράνης αυξάνεται με την αύξηση του pH, με αποτέλεσμα την αύξηση της απόρριψης άλατος. Ενώ όλες μεμβράνες RO έχουν ένα ισοηλεκτρικό σημείο όπου το συνολικό φορτίο της μεμβράνης είναι μηδέν, πολικές ομάδες εντός του υλικού μεμβράνης πολυαμιδίου παρέχουν τοπικά δίπολα που επιτρέπουν την απόρριψη άλατος. Ωστόσο, οι περισσότερες εμπορικές μεμβράνες RO έχουν ισοηλεκτρικά σημεία σε σχετικά χαμηλές τιμές pH (3-4) όταν δοκιμάζονται με ένα πρότυπο διάλυμα ηλεκτρολύτη (0.01 M NaCl ή KCl) και έχουν αρνητικό επιφανειακό φορτίο σε pH τυπικής λειτουργίας RO (5-7). Άλλα συστατικά του νερού, όπως δισθενή ιόντα και διαλυμένα οργανικά ύλη (χοϊκά οξέα) μπορούν να αλλάξουν το ισοηλεκτρικό σημείο.

Η απόρριψη άλατος R_s και η ανάκτηση R_w , μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του συντελεστή συγκέντρωσης (CF) του ρεύματος συμπυκνώματος:

$$CF = \left(\frac{1}{1-R_w} \right) [1 - R_w(1 - R_s)] \quad (5.12)$$

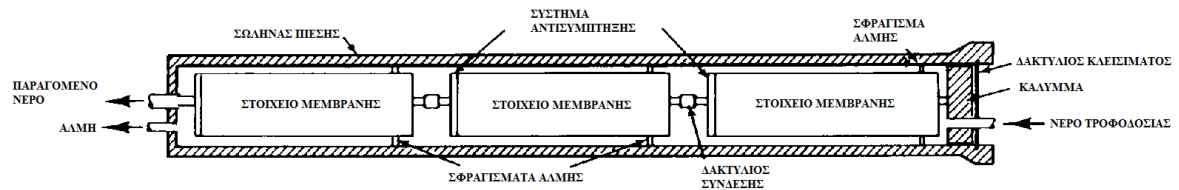
Ο CF μπορεί επίσης να υπολογιστεί ως ο λόγος της συγκέντρωσης TDS του συμπυκνώματος προς τη συγκέντρωση TDS του τροφοδοτούμενου νερού (C_C / C_F). Η επίδραση της αύξησης της ανάκτησης στον συντελεστή συγκέντρωσης φαίνεται στο Σχήμα 16 για μια υποτιθέμενη απόρριψη άλατος 99%. Ο CF αυξάνει εκθετικά όσο αυξάνεται η ανάκτηση. Μικρές αλλαγές σε υψηλή ανάκτηση μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τη συγκέντρωση TDS στο συμπύκνωμα. Ειδικότερα, υπάρχει μια σημαντική διαφορά μεταξύ του εύρους CF για RO θαλασσινού νερού σε σύγκριση με

εκείνο για RO υφάλμυρου νερού. Όταν η ανάκτηση αυξάνεται από 35% έως 60% (RO θαλασσινού νερού), ο συντελεστής συγκέντρωσης αυξάνει ελαφρά από 1,5 έως 2,5. Ωστόσο, όταν η ανάκτηση αυξάνεται από 70% έως 90% (RO υφάλμυρου νερού), ο συντελεστής συγκέντρωσης αυξάνει πιο δραματικά από 3,3 έως 9,9. Αυτή η διαφορά στην αύξηση του συντελεστή συγκέντρωσης απεικονίζει ένα βασικό πρόβλημα που απαντάται κυρίως σε υφάλμυρα συστήματα RO νερό: την καθίζηση δυσδιάλυτων αλάτων (CaCO_3 , CaSO_4 , BaSO_4 , SrSO_4 , πυριτικά άλατα). Ο CF είναι μία χρήσιμη ένδειξη της συνολικής αλατότητας του συμπυκνώματος, αλλά αυτό δεν επιτρέπει την άμεση σύγκριση των ειδικών ιόντων ή αλάτων (ιδιαίτερα τα άλατα που σχηματίζουν προβληματικά ιζήματα) μεταξύ διαφορετικών συμπυκνωμάτων.

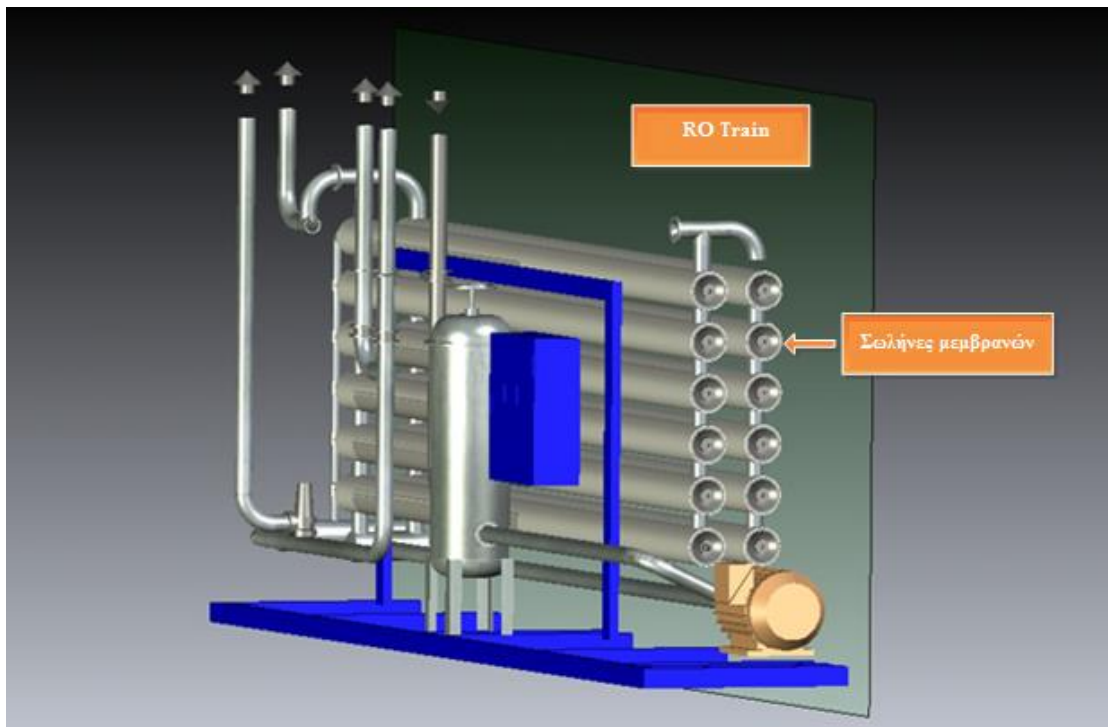


Σχήμα 16. Η επίδραση της αύξησης της ανάκτησης στον συντελεστή συγκέντρωσης συμπυκνώματος ($R_s = 99\%$). Ένθετα: (α) τυπικό εύρος ανάκτησης για λειτουργία RO θαλασσινού νερού και (β) τυπικό εύρος ανάκτησης για λειτουργία RO υφάλμυρου νερού [4].

Οι μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης συνήθως λειτουργούν χρησιμοποιώντας 1-4 περάσματα (το προϊόν διαπέρασης από το ένα είναι η τροφοδοσία στον επόμενο στην σειρά) ή στάδια (το συμπύκνωμα είναι η τροφοδοσία στον επόμενο στην σειρά). Κάθε πέραςμα ή στάδιο περιέχει πολλαπλούς σωλήνες πίεσης (RO Vessel) (μεταξύ 100 και 200 μονάδες σε μεγάλα συστήματα) που λειτουργούν εν παραλλήλω, με κάθε σωλήνα πίεσης να περιέχει 6-8 στοιχεία μεμβράνης που συνδέονται σε σειρά (Σχήμα 17). Το παράλληλο σύστημα των σωλήνων πίεσης συχνά αναφέρεται ως αμαξοστοιχία RO (RO train) (Σχήμα 18). Η ανάκτηση και ο συντελεστής συγκέντρωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν κάθε πέραςμα ή στάδιο μιας διαδικασίας RO, καθώς και το συνδυασμένο σύστημα RO (συμπεριλαμβανομένων όλων περασμάτων ή σταδίων).



Σχήμα 17. Διατομή σωλήνα πίεσης με τρία στοιχεία μεμβρανών [11].



Σχήμα 18. RO train [12].

6. Αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση: ύδατα τροφοδοσίας.

Για να φανούν οι βασικές διαφορές μεταξύ υφάλμυρου και θαλασσινού νερού, μία σύγκριση των δεδομένων παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1 – Σύγκριση πηγών θαλασσινού και υφάλμυρου νερού			
Συστατικό	Μεσογειακό Θαλασσινό νερό- Τουλόν, Γαλλία (mg/L)	Υφάλμυρο νερό - Port Hueneme, ΗΠΑ Καλιφόρνια (mg/L)	Υφάλμυρο νερό - Martin Country, ΗΠΑ Φλόριντα (mg/L)
Ca²⁺	440-670	175	179
Mg²⁺	1400-1550	58	132
Ba²⁺	0,010	<0,10	0,06
Sr²⁺	5-7,5	-	26,4
Βόριο	4,9-5,3	-	-
Na⁺	12000	170	905
Cl⁻	21000-23000	72	1867
SO₄²⁻	2400-2670	670	384
HCO₃⁻	210-142	260	146
TDS	38000-40000	1320	3664
DOC	<2	-	1,4

Πίνακας 1. Σύγκριση θαλασσινού-υφάλμυρου νερού [4].

Το θαλασσινό νερό είναι από πηγή επιφανειακών υδάτων από τη Μεσόγειο Θάλασσα, και τα δύο από τα υφάλμυρα είναι από πηγές υπόγειων υδάτων. Τα δεδομένα για συγκέντρωση βορίου στα υπόγεια ύδατα είναι περιορισμένη, επειδή το βόριο είναι ένας σχετικά νέος ρυθμιζόμενος ρυπαντής, και οι συγκεντρώσεις είναι συνήθως χαμηλά για τα υπόγεια ύδατα. Τα δεδομένα από τα υπόγεια ύδατα στην Καλιφόρνια παρουσιάζουν ένα εύρος συγκέντρωσης βορίου από 0,3 έως 0,6 mg / L, η οποία είναι πολύ χαμηλότερη από εκείνη του επιφανειακού θαλασσινού νερού και πολύ κάτω από τα περισσότερα πρότυπα (1,0 mg / L ή λιγότερο) σήμερα. Τα στοιχεία δείχνουν σαφείς διαφορές μεταξύ των δύο τύπων του νερού. Το υφάλμυρο νερό έχει πολύ χαμηλότερη συγκέντρωση TDS, αλλά η αναλογία μεταξύ TDS και συγκέντρωσης μαγνησίου είναι περίπου η ίδια και για τα τρία ύδατα που παρουσιάζονται. Ωστόσο, οι αναλογίες ασβεστίου / TDS, ανθρακικών / TDS, και θεικών / TDS είναι σημαντικά υψηλότερες σε υφάλμυρο νερό από ό, τι στο θαλασσινό νερό.

6.1 Θαλασσινό νερό αντίστροφης όσμωσης.

Οι μονάδες αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού έχουν δύο επιλογές για την πηγή τροφοδοσίας νερού: πηγάδια θαλασσινού νερού (πηγάδια θαλασσών) ή επιφανειακά ύδατα (πρόσληψη νερού από ανοιχτή θάλασσα). Κάποιες από τις πρώτες μονάδες που κατασκευάστηκαν στην Καραϊβική Θάλασσα κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970 και του 1980 χρησιμοποίησαν τροφοδοσία από ανοιχτή θάλασσα και αντιμετώπισαν σοβαρά προβλήματα ρύπανσης των μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης, ακόμη και με χημική προεπεξεργασία. Στα επόμενα χρόνια, οι εγκαταστάσεις άρχισαν να χρησιμοποιούν θαλάσσια πηγάδια για να επιτευχθεί

βελτίωση στην απόδοση της μεμβράνης της αντίστροφης όσμωσης. Η βασική διαφορά μεταξύ των πηγών νερού από ανοικτές θάλασσες και από πηγάδια θαλασσών είναι η συγκέντρωση των οργανικών και σωματιδιακών υλών στο νερό. Ομοίως με τις πηγές γλυκού νερού (υπόγειων υδάτων έναντι λιμνών και ποταμιών), το νερό που λαμβάνεται από πηγάδια φιλτράρεται φυσικώς μέσω των πορωδών μέσων (άμμος, άργιλος, πέτρες, κλπ.), και ένα μεγάλο μέρος της οργανικής ύλης που συνήθως υπάρχει στα επιφανειακά ύδατα απομακρύνεται. Σήμερα, καθώς όλο και μεγαλύτερες μονάδες RO έχουν σχεδιαστεί, τα πηγάδια θαλασσινού νερού δεν μπορούν πάντα να παρέχουν αρκετό νερό, και οι ανοιχτές θάλασσες είναι η μόνη επιλογή πηγής τροφοδοσίας.

Οι τυπικές συγκεντρώσεις θαλασσινού νερού σε όλο τον κόσμο κυμαίνονται από 35.000 mg / L (3,5% κατά μάζα) έως 45.000 mg / L (4,5% κατά μάζα) (κάθε χιλιόγραμμο καταλαμβάνει περίπου ένα λίτρο κατ' όγκο) . Μία σύνοψη διαφόρων πηγών νερού τροφοδοσίας και συναφείς συγκεντρώσεις TDS παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2 - Συγκεντρώσεις των συνολικών διαλυμένων αλάτων (TDS) για επιλεγμένα συστήματα αλμυρού νερού σε όλο τον κόσμο	
Υδάτινο σύστημα	Συγκέντρωση TDS (mg/L)
Τάμπα Μπέι	18000-31000
Ειρηνικός Ωκεανός	34000
Μεσόγειος Θάλασσα	38000-40500
Ατλαντικός Ωκεανός	38500-40000
Ερυθρά Θάλασσα	41000-42000
Κόλπος του Ομάν	40000-48000
Περσικός Κόλπος	42000-45000
Νεκρά Θάλασσα	275000

Πίνακας 2. Συγκεντρώσεις των συνολικών διαλυμένων αλάτων (TDS) για επιλεγμένα συστήματα αλμυρού νερού σε όλο τον κόσμο [4].

6.2 Υφάλμυρο νερό αντίστροφης όσμωσης.

Οι πηγές υφάλμυρου νερού είναι συχνά υπόγειες. Αυτά τα υπόγεια ύδατα μπορεί να είναι είτε φυσικά αλατούχα υδροφόρα στρώματα είτε υπόγεια ύδατα που έχει γίνει υφάλμυρα λόγω διείσδυσης θαλασσινού νερού ή ανθρωπογενών επιδράσεων (π.χ., υπερβολική χρήση και άρδευση). Επιφανειακά υφάλμυρα νερά είναι λιγότερο συχνά, αλλά μπορεί να εμφανιστούν φυσικά ή από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Τα υφάλμυρα νερά μπορούν να έχουν ένα ευρύ φάσμα σε αλατότητα (TDS) (1000-10.000 mg / L) και συνήθως χαρακτηρίζονται από χαμηλή περιεκτικότητα σε οργανικό άνθρακα και χαμηλή ποσότητα σωματιδίων ή κολλοειδών ρύπων. Ορισμένα συστατικά του υφάλμυρου νερού, όπως το βόριο και πυρίτιο, έχουν συγκεντρώσεις που μπορεί να ποικίλουν ευρέως από πηγή σε πηγή. Ένας σημαντικός παράγοντας στη βελτιστοποίηση ενός συστήματος αντίστροφης όσμωσης υφάλμυρου νερού είναι ο ακριβής χαρακτηρισμός της ειδικής τροφοδοσίας ύδατος.

7. Ρυπαντές νερού τροφοδοσίας.

7.1 Αντίστροφη όσμωση θαλασσινού νερού.

Οι πηγές θαλασσινού νερού συχνά έχουν σωματίδια και κolloειδείς προσμείξεις, καθώς επίσης και υδρογονάνθρακες από τη ρύπανση πετρελαίου και από βιολογικές ουσίες (φυκιών και άλλων μικροοργανισμών).

Ένα από τα πιο δύσκολα προς απομάκρυνση συστατικά του θαλασσινού νερού είναι το βόριο, ένα ανόργανο μόριο που φαίνεται να προκαλεί ανεπιθύμητες αναπαραγωγικές και αναπτυξιακές επιδράσεις, καθώς και καταστροφή των φυτών και των καλλιεργειών. Σε γενικές γραμμές, τα ιόντα απορρίπτονται καλύτερα από μεμβράνες RO από τις αντίστοιχες ουδέτερες μεμβράνες. Το βόριο υφίσταται φυσικά ως βορικό οξύ ($B(OH)_3$) σε υδατικό διάλυμα και βρίσκεται συνήθως στο θαλασσινό νερό εντός του εύρους συγκέντρωσης από 4,5 έως 6,0 mg / L. Λόγω ενός σχετικά υψηλού pK_a ($pK_a = -\log_{10}K_a$), το βόριο ($pK_a = 9,2$ για γλυκό νερό, 8,5 για θαλασσινό νερό), έχει περιορισμένη διάσπαση ιόντος σε ουδέτερο ή χαμηλών τιμών pH. Επιπλέον, τα πρότυπα του πόσιμου νερού για το βόριο έχουν καταστεί όλο και πιο αυστηρά. Ο ιονισμός του βορίου και κατά συνέπεια η απόρριψη βορίου μπορούν να αυξηθεί με αύξηση του pH του νερού τροφοδοσίας, αλλά η αύξηση του pH μπορεί να προκαλέσει καθίζηση άλατος και μετέπειτα scaling στη μεμβράνη (εναπόθεση ιζημάτων άλατος στην μεμβράνη RO). Επομένως, η απομάκρυνση του βορίου συχνά απαιτεί πολλαπλά στάδια RO με διαφορετικές τιμές pH, όπου το πρώτο στάδιο (σε χαμηλότερο pH) επιτυγχάνει την απομάκρυνση άλατος και ένα δεύτερο στάδιο (σε υψηλότερο pH) επιτυγχάνει την απομάκρυνση βορίου.

Ενώ μία πρότυπη μεμβράνη RO θαλασσινού νερού θα απορρίψει μέχρι 99.7% του νατρίου (Na^+) και του χλωρίου (Cl^-), λειτουργώντας σε ουδέτερο pH, η μεμβράνη θα απορρίψει μόνο περίπου το 75-80% του βορίου. Για μια συγκέντρωση βορίου 4,5 mg / L, με απόρριψη του 80% και ανάκτηση του 45%, η συγκέντρωση βορίου στο διήθημα θα είναι 2,0 mg / L. Αυτό η συγκέντρωση είναι τουλάχιστον διπλάσια από τη ελάχιστη συγκέντρωση βορίου για πολλά πρότυπα πόσιμου ύδατος (0,3-1,0 mg / L). Η απόρριψη βορίου αυξάνει καθώς αυξάνει το pH, και μπορεί να φθάσει στο 98-99% σε pH 11. Ωστόσο, ακόμα και αν υπάρχει μια δεύτερη μονάδα RO που κατεργάζεται την απόρριψη βορίου, η πρώτη μονάδα RO δεν μπορεί να λειτουργήσει πολύ πάνω από pH 10, εξαιτίας της καθίζησης άλατος.

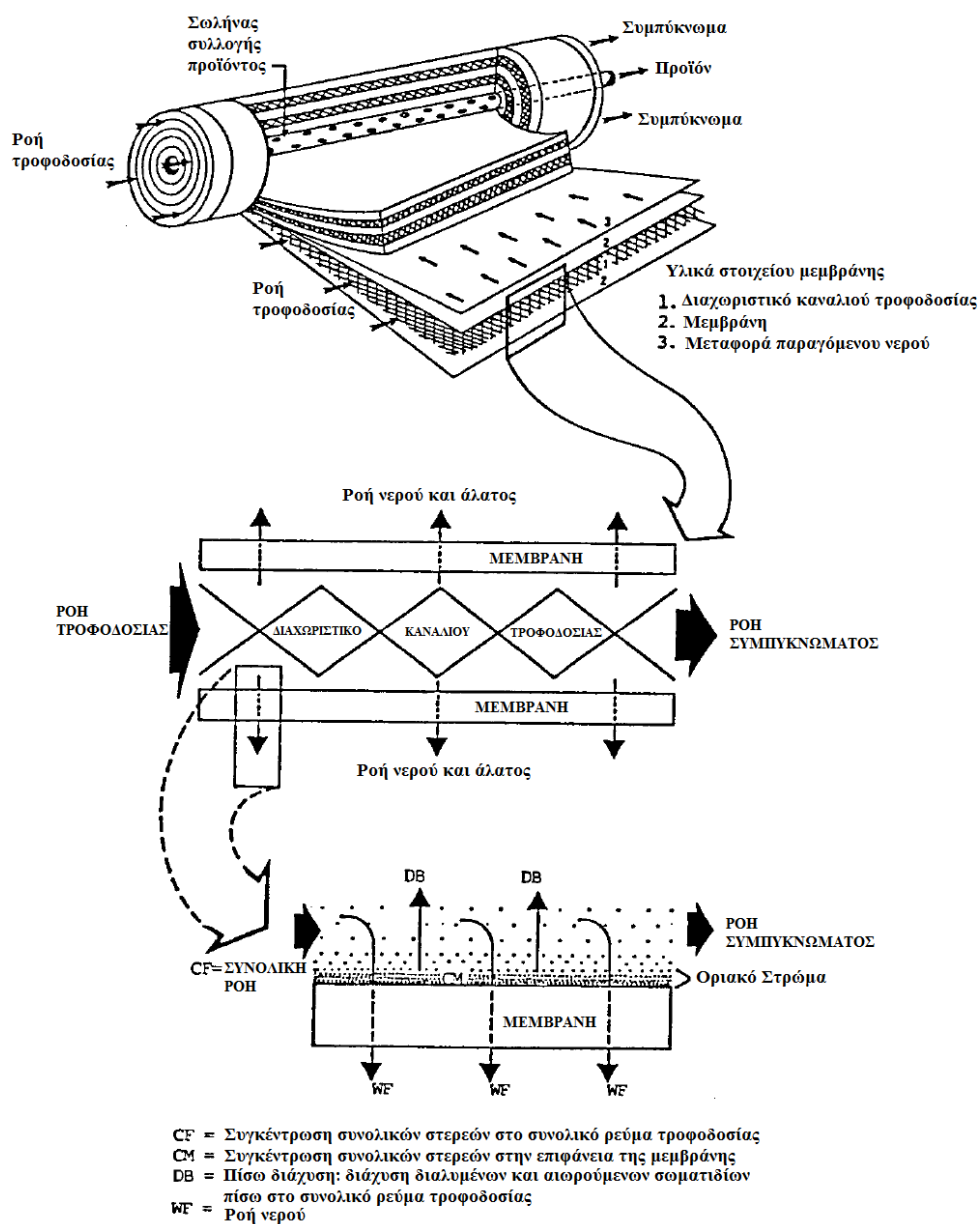
7.2 Αντίστροφη όσμωση υφάλμυρου νερού.

Το βόριο μπορεί επίσης να είναι ρυπαντής σε συστήματα αντίστροφης όσμωσης υφάλμυρου νερού. Ως συνέπεια του χαμηλότερης γενικής απόρριψης άλατος στις μεμβράνες RO υφάλμυρου ύδατος (σε σύγκριση με αυτών της RO θαλασσινού νερού), το βόριο τυπικά απορρίπτεται στο 65-80% σε συνθήκες δοκιμής κατασκευαστή (25 °C, 15% ανάκτηση, πίεση 1030 kPa, 1500 mg / L NaCl στο διάλυμα τροφοδοσίας, pH 6.5-7.0). Ωστόσο, σε πραγματικά συστήματα, η απόρριψη βορίου μπορεί να είναι τόσο χαμηλή όσο 15-20%. Λόγω αυτής της χαμηλής απομάκρυνσης βορίου από μεμβράνες υφάλμυρου νερού, την υψηλότερη συνολική ανάκτηση των συστημάτων RO υφάλμυρου νερού και τη παρουσία των ιόντων καθαλάτωσης στο διήθημα, ένα δεύτερο πέρασμα RO σε υψηλό pH (> 10) δεν είναι εφικτό. Ως εκ τούτου, τα συστήματα RO υφάλμυρου νερού χρησιμοποιούν μια άλλη μέθοδο για την απομάκρυνση του βορίου: ανταλλαγή βορίου-ειδικών ιόντων.

Άλλοι ρυπαντές υφίστανται σε ορισμένους πόρους νερού, είτε λόγω φυσικής εμφάνισης είτε λόγω ανθρώπινης δραστηριότητας. Ρυπογόνες ουσίες, όπως τα ραδιονουκλίδια και το φθόριο, υπάρχουν φυσικά σε ορισμένους υπόγειους υδάτινους πόρους υφάλμυρου νερού. Οι πηγές νερού ανθρώπινης δραστηριότητας έχουν επίσης τεχνητώς αυξημένα τα επίπεδα νιτρικών αλάτων (λιπάσματα), φυτοφάρμακα (γεωργική χρήση της γης), αρσενικό (εξορυκτικές δραστηριότητες) και ενδοκρινικούς διαταράκτες (φαρμακευτικά προϊόντα σε υγρά απόβλητα). Κατά την διήθηση μέσω μεμβρανών RO, αυτές οι προσμείξεις συγκρατούνται στο συμπύκνωμα, και το πυκνό διάλυμα πρέπει να επεξεργαστεί πριν από τη διάθεση. Συγκεκριμένοι ρυπαντές νερού μπορούν να υπαγορεύσουν επίσης τον τύπο απόρριψης συμπυκνώματος που χρησιμοποιείται. Βαθύ πηγάδι έγχυσης χρησιμοποιείται για ορισμένες μονάδες RO υφάλμυρου νερού στη Φλόριντα που έχουν ραδιονουκλίδια στο συμπύκνωμα.

8. Ρύπανση μεμβρανών.

Δύο μηχανισμοί ρύπανσης παρατηρούνται γενικά για τις διαδικασίες μεμβράνης: η επιφανειακή ρύπανση και η ρύπανση στους πόρους. Ωστόσο, οι μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης δεν έχουν διακριτούς πόρους και ουσιαστικά θεωρούνται ότι είναι μη πορώδεις. Έτσι, ο κύριος μηχανισμός ρύπανσης για τις μεμβράνες RO είναι η επιφανειακή ρύπανση. Η επιφανειακή ρύπανση μπορεί να προκύψει από διάφορους ρύπους, συμπεριλαμβανομένων των αιωρούμενων σωματιδίων (ανόργανα ή οργανικά), διαλυμένη οργανική ύλη, διαλυμένα στερεά και βιογενές υλικό. Επιπλέον, η ρύπανση μπορεί να αναπτυχθεί ανομοιόμορφα μέσω μιας μονάδας ή ενός στοιχείου μεμβράνης και μπορεί να συμβεί μεταξύ των φύλλων της μεμβράνης μιας μονάδας, όπου βρίσκονται διαχωριστικά που δημιουργούν χώρο για το ρεύμα συμπυκνώματος (Σχήμα 19).



Σχήμα 19. Ροή στο εσωτερικό της μεμβράνης και ρύπανση στην επιφάνεια της μεμβράνης [13].

Γενικά, οι μονάδες RO θαλασσινού νερού, ιδιαίτερα εκείνες που παραλαμβάνουν το νερό από ένα ανοιχτό κανάλι πρόσληψης νερού, έχουν κυρίως μολυνθεί από βιολογική και σωματιδιακή ύλη, ενώ οι μονάδες RO υφάλμυρου νερού μολύνονται από διαλυμένα ανόργανα άλατα και τις κατακρημνίσεις. Ωστόσο, και οι δύο τύποι RO μπορούν να προσβληθούν και από τις δυο γενικές ομάδες των ρύπων. Επιπλέον, οι τύποι των προβληματικών ρύπων είναι ειδικοί για τον κάθε χώρο, ιδιαίτερα για την RO υφάλμυρου νερού, και μπορεί να εξαρτάται από τις διαδικασίες προεπεξεργασίας.

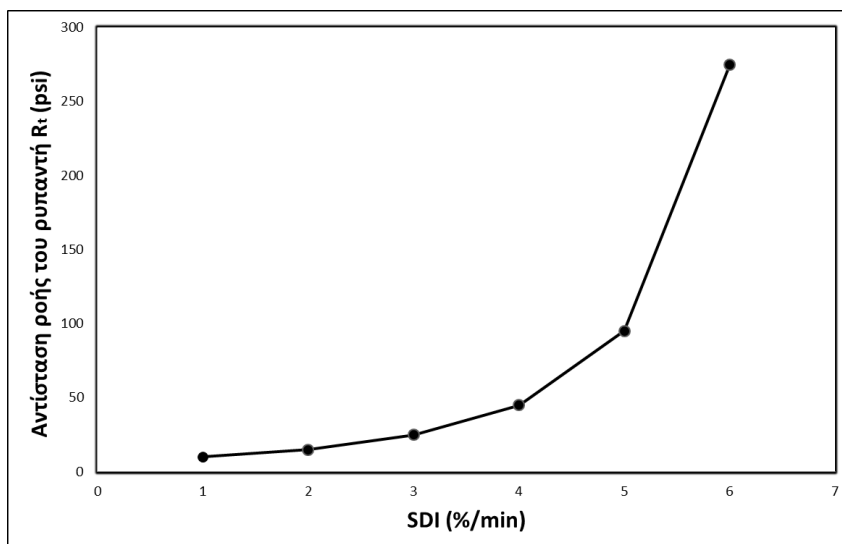
Η ικανότητα του νερού να ρυπαίνει τις μεμβράνες RO συχνά περιγράφεται με τη χρήση του δείκτη πυκνότητας ιλύος, ή SDI (Silt Density Index). Το SDI του νερού προσδιορίζεται από το ρυθμό εναπόθεσης σε φίλτρο 0,45 μm σε μία πίεση 207 kPa (30 psi) και περιγράφεται στην πρότυπη μέθοδο ASTM D4189.

Η εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του SDI είναι η ακόλουθη:

$$SDI = \frac{100\% \times (1 - t_1/t_2)}{t}$$

όπου το t είναι ο συνολικός χρόνος παρέλευσης της ροής και t₁ και t₂ είναι οι χρόνοι (σε δευτερόλεπτα) που απαιτείται για να φιλτραριστούν 500 ml νερού αρχικά και μετά από t λεπτά, αντίστοιχα. Το πείραμα έχει ρυθμιστεί σε διήθηση με συνεχή ροή κατά μέτωπο υπό πίεση, και η μεμβράνη να είναι κάθετη προς την ροή του διηθήματος. Ο συνολικός χρόνος t επιλέγεται (ο πρότυπος είναι 15 λεπτά), και το δείγμα ρέει μέσα από το φίλτρο καθ' όλη τη διάρκεια των 15 λεπτών. Καθώς το νερό ρέει μέσω της μεμβράνης, οι ρύποι συνεχώς συσσωρεύονται και ρυπαίνουν τη μεμβράνη, συνεπώς, ο χρόνος t₁ αναμένεται να είναι μικρότερος από τον χρόνο t₂. Τόσο η συμβατική όσο και η προεπεξεργασία μέσω μεμβρανών μειώνουν το SDI του τροφοδοτούμενου νερού αλλά κάθε επιλογή προεπεξεργασίας μπορεί να έχει αρνητικές και θετικές πτυχές. Ένα SDI 3 ή μικρότερο προτιμάται για εισροή RO. Ωστόσο, πολλές μονάδες ανέχονται SDI με τιμές μεταξύ 4 και 5, ένα εύρος το οποίο είναι συχνά εφικτό μέσω μιας συμβατικής προεπεξεργασίας.

Οι Kremen και Tanner (1998) έδειξαν τη σχέση μεταξύ του SDI και της τάσης ρυπάνσεως του νερού συσχετίζοντας το SDI με μία συνολική αντίσταση ροής [14]. Η συνολική αντίσταση ροής (R_t) είναι ο συνδυασμός των δύο αντιστάσεων, της αντίστασης του φίλτρου (R_F) και της αντίστασης του ρυπαντή (επί του φίλτρου) (R_P). Η θεωρητική σχέση μεταξύ SDI και R_t, που εμφανίζεται στο Σχήμα 20, εμφανίζει μια εκθετική σχέση μεταξύ του αυξανόμενου SDI και της αυξανόμενης αντίστασης του ρυπαντή (ή αυξανόμενης συσσώρευσης ρυπαντή στη μεμβράνη). Αυτή η σχέση δείχνει πολύ μεγαλύτερη αντίσταση ρυπάνσεως για τιμές SDI μεταξύ 4 και 5 από ό, τι μεταξύ των τιμών SDI 1 και 4. Συνεπώς, στην ιδανική περίπτωση, ένα σύστημα προεπεξεργασίας που μπορεί να μειώσει το SDI σε τιμή κάτω από 2 (μεμβράνες) θα προσφέρει ένα νερό με μια μικρότερη τάση ρυπάνσεως από ένα σύστημα προεπεξεργασίας που παρέχει μία τιμή SDI 3-5 (μέσο διήθησης).



Σχήμα 20. Η επίδραση της αύξησης του SDI στην αντίσταση ροής διαπέρασης του νερού από τον ρυπαντή, υποδεικνύοντας μία υψηλότερη τάση ρυπάνσεως [14].

Ένας δείκτης παρόμοιος με το SDI, ο τροποποιημένος δείκτης ρυπάνσεως (MFI, modified fouling index), έχει αναπτυχθεί για να συσχετίσει καλύτερα τη ρύπανση της μεμβράνης, τη πτώση της ροής, και τη συγκέντρωση των σωματιδίων. Η αρχική μέθοδος MFI που χρησιμοποιεί μεμβράνη μικροδιήθησης 0,45 μm σε ροή κατά μέτωπο και παρέχει μια γραμμική συσχέτιση μεταξύ του δείκτη και της συγκέντρωσης των σωματιδίων. Ωστόσο, ο MFI δεν προβλέπει πάντα με ακρίβεια την ρύπανση που παρατηρείται στα συστήματα μεμβρανών, λόγω του αριθμού των μικρών σωματιδίων που περνούν μέσω της μεμβράνης 0.45 μm. Πιο πρόσφατα, ένας τροποποιημένος MFI, ο MFI-UF, έχει αναπτυχθεί. Ο MFI-UF χρησιμοποιεί μεμβράνες υπερδιήθησης (UF ultrafiltration) για να διατηρήσει ένα μεγαλύτερο μέρος των μικρών σωματιδίων που μπορούν να περάσουν μέσα από τις μεμβράνες μικροδιήθησης αλλά και θα ρυπάνουν μία μεμβράνη RO. Ο MFI-UF έχει ακολούθως χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της απόδοσης της προεπεξεργασίας και της δυνητικής ρύπανσης της μεμβράνης RO κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της εγκατάστασης.

Η θολότητα (turbidity), ένα μέτρο διάχυσης του φωτός από σωματίδια σε διάλυμα, επίσης συχνά αναφέρεται ως ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας της προεπεξεργασίας. Μετρούμενη σε NTU (νεφελομετρικές μονάδες θολότητας), η θολότητα συνιστάται να είναι μικρότερη από 0,2 NTU για την επιτυχή επεξεργασία RO. Το ακατέργαστο νερό μπορεί να έχει θολότητες μεταξύ 0,1 και αρκετών εκατοντάδων NTU. Οι περισσότερες μονάδες RO αναφέρεται ότι έχουν θολότητες ακατέργαστου ύδατος κάτω των 45 NTU.

Τόσο ο SDI όσο και η θολότητα παρουσιάζουν περιορισμούς στην πρόβλεψη της ποιότητας και της ικανότητας ρυπάνσεως του νερού τροφοδοσίας στην αντίστροφη όσμωση. Η δοκιμή SDI χρησιμοποιεί ένα κελί διήθησης σε κατά μέτωπο ροή, ενώ οι περισσότερες εμπορικές μονάδες μεμβρανών RO λειτουργούν σε λειτουργία

διασταυρούμενης ροής. Επιπλέον, η μεμβράνη (0,45 μm) που χρησιμοποιείται για το SDI δεν διατηρεί ρυπαντές όπως βιολογικά πολυμερή. Η βιορύπανση, που συχνά είναι μία σημαντική ανησυχία για τη λειτουργία της RO, δεν μπορεί να προβλεφθεί από τον SDI. Επιπλέον, οι τιμές SDI δεν συσχετίζονται γραμμικά με κολλοειδή ή αιωρούμενα στερεά, δύο σημαντικές ομάδες ρυπαντών. Η έρευνα έχει δείξει διάφορα προβλήματα ρυπάνσεως που δεν συσχετίζονται απαραίτητα με την τιμή SDI του νερού τροφοδοσίας, ως εκ τούτου, ο SDI μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης της δυνητικής ρύπανσης του νερού, αλλά δεν θα πρέπει να εκλαμβάνεται ως ο αποκλειστικός δείκτης για ρύπανση. Καμία άμεση σχέση μεταξύ SDI και θολότητας δεν είναι δυνατή, αν και χαμηλές τιμές SDI συχνά αντιστοιχούν σε χαμηλή θολότητα.

8.1 RO θαλασσινού νερού.

Το ανθρακικό ασβέστιο είναι συνήθως το μοναδικό προβληματικό ίζημα στο θαλασσινό νερό RO, και συχνά οι χαμηλότερες ανακτήσεις RO θαλασσινού νερού (περιορίζονται από την οσμωτική πίεση) αποτρέπουν οποιαδήποτε προβλήματα καθίζησης. Συνεπώς, η καθίζηση δεν είναι πιθανό να συμβεί σε εφαρμογές RO θαλασσινού νερού, και η ρύπανση κατά τη διάρκεια αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού προκαλείται κυρίως από τα αιωρούμενα σωματίδια, τις οργανικές ενώσεις και τη βιολογική ανάπτυξη.

Η ρύπανση μεμβράνης προκαλείται από την εναπόθεση των οργανικών και ανόργανων ρυπαντών του νερού και μπορεί να συμβεί σε αρκετά στρώματα. Αιωρούμενα και κολλοειδή σωματίδια ρυπαίνουν μία μεμβράνη πηζοντας μαζί και σχηματίζουν ένα στρώμα τύπου κέικ (cake-like layer) στην επιφάνεια της μεμβράνης, ενώ διαλυμένες οργανικές ουσίες αλληλεπιδρούν άμεσα με την επιφάνεια της μεμβράνης και μεταξύ τους προκαλώντας ρύπανση. Τα κολλοειδή σωματίδια συχνά αποτελούνται από άργιλο, οργανικές ενώσεις, ανόργανες ενώσεις και μέταλλα, όπως αλουμίνιο και σίδηρο πυρίτια του σιδήρου. Βιολογική ρύπανση συμβαίνει όταν κύτταρα μικροβίων συσσωρεύονται και προσκολλώνται σε επιφάνειες (μεμβράνες και διαχωριστικά), σχηματίζοντας βιομεμβράνες. Καθώς συμβαίνει ρύπανση της μεμβράνης, βασικές λειτουργίες της επιδεινώνονται, συμπεριλαμβανομένων τη δίοδο άλατος διαμέσου της μεμβράνης, τη διαπερνούσα ροή και τη πτώση πίεσεως κατά μήκος της μεμβράνης. Για να αντιστραφεί αυτή η ρύπανση, χρησιμοποιούνται χημικά καθαρισμού (οξέα ή βάσεις) ενώ συχνά απαιτείται να μείνει η μονάδα εκτός λειτουργίας για κάποιο χρονικό διάστημα.

8.2 RO υφάλμυρου νερού.

Το κρίσιμο πρόβλημα ρύπανσης σε συστήματα RO υφάλμυρου νερού είναι η καθίζηση αλάτων και η κλιμάκωση της μεμβράνης (scaling). Οι υψηλότερες σχετικές συγκεντρώσεις του ασβεστίου, των ανθρακικών και θεικών αλάτων, σε συνδυασμό με τις υψηλότερες ανακτήσεις που είναι δυνατές για υφάλμυρο νερό, προκαλούν ίζηματα θεικού ασβεστίου και ανθρακικών που αποτελούν τυπικές ανησυχίες στην

RO υφάλμυρου νερού. Ένας σημαντικός παράγοντας στη δυνητική ρύπανση της μεμβράνης από διαλυμένα ανόργανα είναι η πόλωση της συγκέντρωσης. Ενώ το ανθρακικό ασβέστιο είναι συχνά το κύριο ίζημα ανησυχίας, πολλά άλλα άλατα μπορούν να είναι προβληματικά σε υφάλμυρο νερό RO. Μερικές συγκεντρώσεις θεικών αλάτων υπόγειων υδάτων, όπως αυτά που βρέθηκαν στη νότια Καλιφόρνια (450 - 670 mg / L) (Leitz και Boegli, 2001) [15], μπορούν να φτάσουν σε υψηλά επίπεδα λόγω καλλιέργειας και λίπανσης. Η καθίζηση θεικού ασβέστιο και η κλιμάκωση της μεμβράνης έχουν μελετηθεί εκτενώς: το θεικό βάριο, το θεικό στρόντιο, και τα πυριτικά άλατα έχουν χαμηλή διαλυτότητα και μπορούν να γίνουν περιοριστικοί παράγοντες στην ανάκτηση υφάλμυρου νερού RO. Ωστόσο, τα ιζήματα βαρίου και το στρόντιο τείνουν να είναι λιγότερο σημαντικά επειδή τα κατιόντα υπάρχουν σε χαμηλές συγκεντρώσεις, σε σύγκριση με το ασβέστιο.

Η διαδικασία της κλιμάκωσης μεμβράνης παρουσιάζεται σε διάφορα στάδια. Το πρώτο στάδιο της ομοιογενούς καθίζησης συμβαίνει όταν τα ιόντα αντίθετου φορτίου συνδέονται και αρχίζουν να συγκεντρώνονται μαζί σε μεγάλες ομάδες (> 1000 άτομα). Στο δεύτερο στάδιο, τα συμπλέγματα ιόντων αρχίζουν να σχηματίζουν πυρήνες, που χαρακτηρίζονται από πιο εύτακτη σύνδεση και ευθυγράμμιση των ιόντων. Το τρίτο και τελικό στάδιο είναι η ανάπτυξη των κρυστάλλων του άλατος που σχηματίζεται στους πυρήνες (κρύσταλλοι σπόροι). Ενώ τα δύο πρώτα στάδια είναι αναστρέψιμα, το τρίτο στάδιο είναι μη αναστρέψιμο και θα συνεχίσει να εμφανίζεται έως ότου οι συγκεντρώσεις ιόντων μειωθούν και φθάσουν το όριο διαλυτότητας. Ετερογενής καθίζηση μπορεί επίσης να εμφανιστεί, όπου πυρήνες ή ομάδες ιόντων δημιουργήσουν ίζημα σε συνεργασία με αιωρούμενα ή κολλοειδή σωματίδια του διαλύματος. Επιπλέον, μέταλλα όπως μαγνήσιο, βάριο και στρόντιο συχνά καθιζάνουν όταν άλατα που έχουν καταβυθιστεί, όπως το ανθρακικό ασβέστιο, μαζί με αυτά.

Χημικές ουσίες που ονομάζονται αντικαθαλωτικά χρησιμοποιούνται σε συστήματα αντίστροφης όσμωσης υφάλμυρου νερού για την αποφυγή καθίζησης. Τα αντικαθαλωτικά παρεμποδίζουν την καταβύθιση με διάσπαση ενός ή περισσότερων πτυχών των σταδίων κρυστάλλωσης. Ειδικότερα, τα αντικαθαλωτικά είναι σε θέση να χρησιμοποιηθούν σε σχετικώς χαμηλές συγκεντρώσεις (<10 mg / L), όπου οι συγκεντρώσεις ιόντων είναι στοιχειομετρικά πολύ υψηλότερες. Είναι αποτελεσματικά στην αύξηση του ορίου της συγκέντρωσης ιόντων που απαιτείται για την ομαδοποίηση, καθώς και τη διατάραξη της δημιουργίας πυρήνων και κρυσταλλικής δομής. Ορισμένα αντικαθαλωτικά μπορούν επίσης να προσροφηθούν στις επιφάνειες του κρυστάλλου και να απωθήσουν άλλα ιόντα στο διάλυμα ή πλήρως χηλικές ενώσεις με διαλυμένα ιόντα. Από όλες τις πιθανές αλληλεπιδράσεις μεταξύ αντικαθαλωτικών και ιόντων, μόνο ο μηχανισμός αποσιδήρωσης απαιτεί ισομοριακές ποσότητες των ιόντων και αντικαθαλωτικών.

Τα αντικαθαλωτικά αναπτύχθηκαν αρχικά το 1800 για χρήση σε λέβητες και νερό ψύξης· σήμερα, οι χημικές ουσίες έχουν προσαρμοστεί για χρήση σε συστήματα RO. Τα αντικαθαλωτικά είναι οργανοφωσφορικού, πολυφωσφορικού ή πολυμερούς τύπου ενώσεις που προστίθενται στο νερό τροφοδοσίας πριν από την είσοδό του στη μονάδα RO. Τα αντικαθαλωτικά δεν αντιμετωπίζουν πλήρως την καθίζηση σε υψηλές

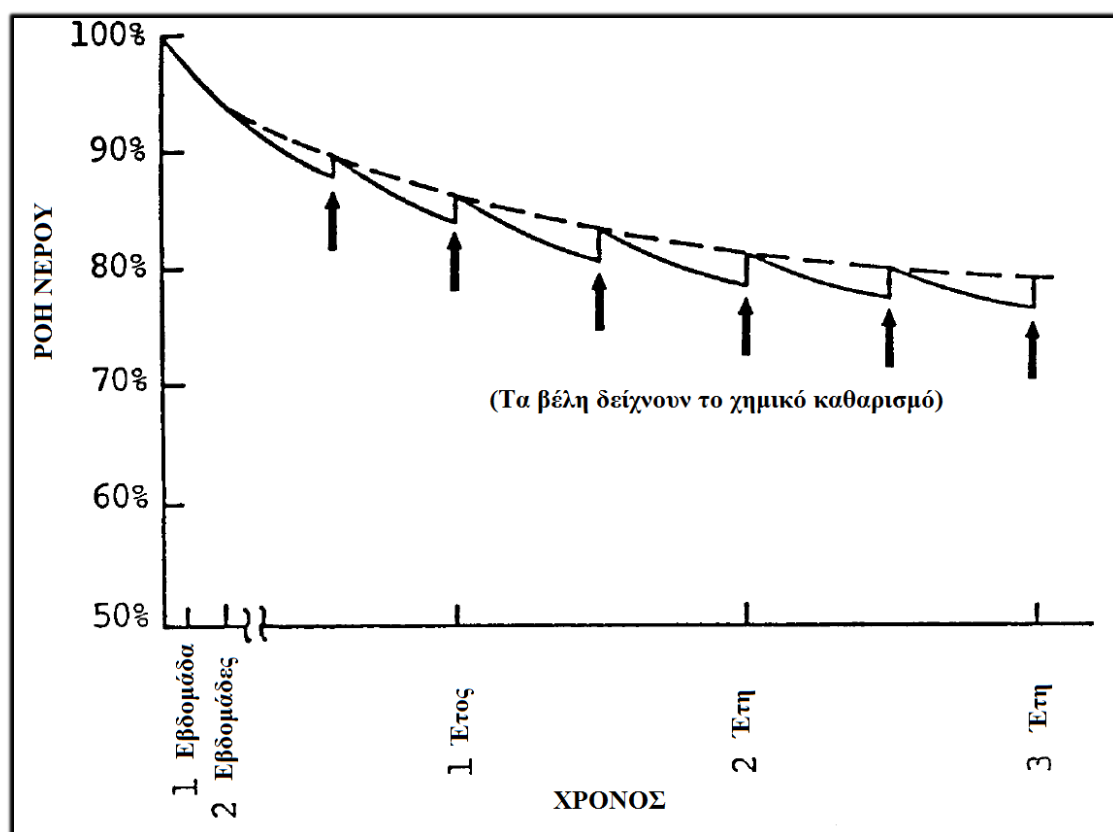
συγκεντρώσεις ιόντων και καθώς η συγκέντρωση άλατος αυξάνει η καθίζηση τελικά θα εμφανιστεί.

Τα ίδια τα αντικαθαλωτικά μπορούν να γίνουν ρυπαντές αν χρησιμοποιηθούν σε υπερβολικές συγκεντρώσεις· οι τυπικές συγκεντρώσεις αντικαθαλωτικών στην τροφοδοσία RO δεν υπερβαίνουν τα 35 mg / L και είναι συχνά μικρότερες από 10 mg / L. Ορισμένα αντικαθαλωτικά έχουν επιπλέον περιορισμούς: πολυακρυλικών οξέων αντικαθαλωτικά θα κορέσουν τις μεμβράνες με την παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων σιδήρου και εξαμεταφωσφορικά (SHMP) τελικά υδρολύονται παρουσία του αέρα, παράγοντας ανόργανο φωσφορικό, οδηγώντας πιθανώς σε κατακρήμνιση φωσφορικού ασβεστίου. Υψηλές συγκεντρώσεις αντικαθαλωτικών σε δεξαμενές τροφοδοσίας ή συστήματα δοσολογίας μπορεί να προωθήσουν καθίζηση και βιολογική ανάπτυξη και η τοποθέτηση του συστήματος δοσολογίας αντικαθαλωτικών είναι κρίσιμη για την αποφυγή ανεπιθύμητων αντιδράσεων με άλλες προσθήκες χημικών. Έρευνες έχουν δείξει ότι η βιολογική ανάπτυξη ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο αντικαθαλωτικού, και μερικά από αυτά μπορούν να αυξήσουν τη βιολογική ανάπτυξη έως 4-10 φορές το κανονικό ποσοστό. Επιπλέον, χημικά όπως στυπτηρία (διπλό θειικό άλας καλίου και αργιλίου), χλωριούχος σίδηρος, και άσβεστος (υδροξείδιο του ασβεστίου) χρησιμοποιούνται στην προκατεργασία πήξης και μπορούν να μεταφερθούν μέσω του συστήματος και να προκαλέσουν ρύπανση της μεμβράνης RO. Άλλα συστατικά του νερό, όπως το διοξείδιο του πυριτίου, μπορεί να προκαλέσουν απόφραξη της μεμβράνης σε συνδυασμό με πρόσθετα χημικά προκατεργασίας· πυριτικά άλατα αργιλίου καθιζάνουν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας RO.

Ο Tran και άλλοι (2007) πραγματοποίησαν μια μελέτη μιας σπειροειδούς περιτυλίξεως μεμβράνης RO η οποία χρησιμοποιήθηκε για ένα έτος σε ένα εργοστάσιο αφαλάτωσης (επιφανειακό υφάλμυρο νερό: 900 mg / L TDS), με τη χρήση προηγμένων αναλυτικών και μικροσκοπικές τεχνικών, για να καθοριστεί η σύνθεση του ρυπαντή που αποτίθενται στην επιφάνεια της μεμβράνης [16]. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ρυπαντές αρχικά εναποτίθενται στην επιφάνεια της μεμβράνης σαν μία λεπτή, άμορφη στρώση (<1 μm πάχος) που περιέχει σωματιδιακή ύλη. Στην κορυφή ήταν μια άλλη άμορφη στρώση (~3 μm πάχος) η οποία περιείχε κυρίως εξωκυτταρικό πολυμερικό υλικό από οργανισμούς και κάποια πυριτικά αργίλια. Μια τρίτη και τελική στρώση σχηματίστηκε σε περιοχές όπου οι πρώτες δύο στρώσεις ήταν παχύτερες (~10 συνολικά μm) και αποτελούνταν αποκλειστικά από κρυστάλλους πυριτικού αργιλίου· στην περίπτωση αυτή, η δεύτερη άμορφη στρώση δεν περιείχε πυριτικό αργίλιο. Περαιτέρω ανάλυση έδειξε υψηλές συγκεντρώσεις ασβεστίου, χλωρίου, αργιλίου και φωσφόρου, υποδεικνύοντας ελάχιστη διαλυτή καταβύθιση άλατος (CaCO₃), παρεμποδισμένη διάχυση ή παγίδευση διαλυμένων ιόντων, και τη παρουσία των χημικών προκατεργασίας (πηκτικό αλουμίνιο και φωσφορικό αντικαθαλωτικό), αντιστοίχως. Οι άμορφες μήτρες περιείχαν υψηλά επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα, οξυγόνου, φωσφόρου και αλουμινίου, υποδεικνύοντας οργανικά και βιολογικά υλικά και πυριτικούς κρυστάλλους.

9. Καθαρισμός της μεμβράνης.

Ένας συνδυασμός όξινων και / ή βασικών (αλκαλικών) χημικών χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό των μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης. Στα συνήθη όξινα διαλύματα (pH~2) περιλαμβάνονται το υδροχλωρικό οξύ, το φωσφορικό οξύ, το υδροθειικό νάτριο ($\text{NH}_2\text{SO}_3\text{H}$) και το σουλφαμικό οξύ ($\text{NH}_2\text{SO}_3\text{H}$), ενώ στα αλκαλικά (pH~12) χημικά περιλαμβάνονται το λαυρυλοθειικό νάτριο, το υδροξείδιο του νατρίου, το αιθυλενοδιαμινοτετραοξικό οξύ (Na_4EDTA) και ειδικά προϊόντα καθαρισμού. Τα περισσότερα διαλύματα καθαρισμού πραγματοποιήθηκαν από αποθέματα χημικών διαλυμάτων σε μία τελική συγκέντρωση των 0,03 - 2,0% (κ.β.). Ο καθαρισμός της μεμβράνης βοηθά στην αποκατάσταση της διαπερνούσας ροής και ως εκ τούτου στη μείωση περάσματος άλατος. Ο Reverberi και άλλοι μείωσαν το πέρασμα άλατος σε μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης από 1,9% σε 1,2% με αλκαλικό καθαρισμό (0,025% (κ.β.) θειικό λαυρύλιο νατρίου / NaOH , pH 12,5) [17].



Σχήμα 21. Επίδραση του χημικού καθαρισμού στη ροή νερού ως συνάρτηση του χρόνου ζωής της μεμβράνης [13].

10. Προεπεξεργασία για θαλασσινό και υφάλμυρο νερό αντίστροφης όσμωσης.

Ο πρωταρχικός στόχος κάθε συστήματος προεπεξεργασίας RO (για θαλασσινό νερό ή υφάλμυρο νερό) είναι να μειώσει την τάση των ακαθαρσιών του νερού στο σύστημα μεμβράνης RO. Επιφανειακοί υδάτινοι πόροι (θαλασσινού και υφάλμυρου νερού) έχουν συνήθως μια μεγαλύτερη τάση ρύπανσης των μεμβρανών και απαιτούν πιο εκτεταμένα συστήματα προεπεξεργασίας σε σχέση με τους υπόγειους υδάτινους πόρους. Σε γενικές γραμμές, η RO θαλασσινού νερού τείνει να χρησιμοποιεί τις πηγές των επιφανειακών υδάτων, η RO υφάλμυρου νερού συχνά χρησιμοποιεί πηγές υπόγειων υδάτων.

10.1 Συμβατική προεπεξεργασία.

Η συμβατική προεπεξεργασία αποτελείται συνήθως από προσθήκης οξέος, προσθήκη θρομβωτικού / κροκιδωτικού, απολύμανση, μέσα διήθησης, και φυσιγγια διήθησης. Οι πρώτες προσθήκες χημικών, όπως των οξέων, των πηκτικών μέσων, και των κροκιδωτικών, προετοιμάζουν το νερό τροφοδοσίας για κοκκώδη μέσα διήθησης. Η επεξεργασία με οξύ μειώνει το pH του νερού τροφοδοσίας (τυπική περιοχή pH 5-7), το οποίο αυξάνει την διαλυτότητα του ανθρακικού ασβεστίου, το βασικό δυναμικό ίζημα σε πολλά νερά τροφοδοσίας. Το πιο κοινό οξύ που χρησιμοποιείται για χαμηλότερο pH νερού τροφοδοσίας είναι το θειικό οξύ (H_2SO_4). Ωστόσο, υδροχλωρικό οξύ (HCl) χρησιμοποιείται όταν η προσθήκη θειικού οξέος έχει τη δυνατότητα να προκαλέσει θειικά ιζήματα.

Τα υδατικά σωματίδια και η κολλοειδής ύλη είναι συνήθως αρνητικά φορτισμένα, και έτσι παραμένουν ανεξάρτητα καθώς δεδομένου των όμοιων φορτίων απωθούν το ένα το άλλο. Ο ρόλος των θρομβωτικών είναι να εξουδετερώσει αποτελεσματικά τα όμοια φορτία και να αφήσει τα αιωρούμενα στερεά να συγκεντρωθούν σε συσσωματώματα (μεγάλες ομάδες αιωρούμενων σωματιδίων χαλαρά συνδεδεμένα). Ως εκ τούτου, τα πηκτικά είναι συνήθως μικρά, θετικά φορτισμένα μόρια. Τα ανόργανα θρομβωτικά είναι συνήθως άλατα σιδήρου ή αργιλίου όπως χλωριούχος σίδηρος ή το θειικό αργίλιο, ενώ τα οργανικά θρομβωτικά είναι τυπικά κατιονικά, χαμηλού μοριακού βάρους (<math> < 500.000 \text{ Da}</math>) πολυμερή (π.χ., χλωριούχο διμεθυλοδιαλλυλαμμώνιο ή πολυαμίνες). Το αργίλιο δεν χρησιμοποιείται όπως συνήθως στην προκατεργασία πήξης πριν από τη διήθηση της μεμβράνης λόγω της πιθανής βλάβης στο σύστημα μεμβράνης. Η τυπική δοσολογία για ένα ανόργανο θρομβωτικό (5-30 mg/L) είναι μεγαλύτερη από τη δοσολογία που απαιτείται για ένα πολυμερές πηκτικό (0,2-1,0 mg/L). Εάν το νερό τροφοδοσίας είναι ελαφριάς κακής ποιότητας νερό και δεν απαιτεί κροκιδωση και καθίζηση, η ενσωματωμένη πήξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακριβώς πριν από τη μέσα διήθησης. Ο πρωταρχικός στόχος της ενσωματωμένης πήξης είναι να αλλάξει τη χημεία της επιφάνειας των αιωρούμενων σωματιδίων, έτσι ώστε να αποδίδουν καλά στα μέσα διήθησης. Είναι επίσης δυνατή η ταυτόχρονη χρήση των δύο τύπων θρομβωτικών για να λάβουμε τα πλεονεκτήματα των διαφόρων χαρακτηριστικών κάθε θρομβωτικού.

Όταν το νερό τροφοδοσίας έχει υψηλό SDI (μεγαλύτερο από 10), η κροκιδώση χρησιμοποιείται συχνά με την πήξη, πριν από τα μέσα διήθησης. Η διαδικασία της κροκιδώσης και της καθίζησης είναι μια γνωστή μέθοδος αφαίρεσης των σωματιδίων στην επεξεργασία του νερού. Τα κροκιδωτικά είναι συχνά υψηλού μοριακού βάρους ($> 1 \times 10^7$ Da), ανιονικά πολυμερή.

Η διήθηση κοκκωδών μέσων περιλαμβάνει υλικά όπως η άμμος, ο ανθρακίτης, η ελαφρόπετρα, το χαλίκι και ο γρανίτης και συχνά, ένας συνδυασμός αυτών των υλικών που χρησιμοποιείται σε στρώματα στην κλίνη διήθησης για να επωφεληθούμε του πλεονεκτήματος των διαφορετικών αποτελεσματικών μεγεθών των υλικών. Οι κλίνες διήθησης μπορεί να είναι ανοικτές προς την ατμόσφαιρα, και με τη χρήση της βαρύτητας να προκαλούν τη ροή του διηθήματος, ή τα φίλτρα μπορεί να κλειστά προς την ατμόσφαιρα και το διήθημα να συμπιέζεται. Αν και πιο ακριβή και ενεργοβόρα, η διήθηση υπό πίεση είναι πιο κοινή σε προεπεξεργασία RO και μπορεί συνήθως να μειώσει το SDI του νερού τροφοδοσίας κατά ένα συντελεστή 2. Η θολότητα των διαπερνώντων μέσων διήθησης είναι συχνά περίπου 0,1 NTU. Τα μέσα διήθησης μπορεί να είναι ευαίσθητα σε αλλαγές του νερού τροφοδοσίας, και το διαπερνούν SDI μπορεί να ποικίλει αρκετές μονάδες κατά τη διάρκεια γεγονότων όπως η ανάπτυξη φυκιών και η μόλυνση από πετρέλαιο. Η μόλυνση από πετρέλαιο είναι ένα ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα, και τις περισσότερες φορές αφαιρείται χρησιμοποιώντας μονάδα επίπλευσης (dissolved air flotation (DAF)) κατά τη διάρκεια προεπεξεργασίας της μεμβράνης.

Η διήθηση με φυσίγγια χρησιμοποιείται σαν ένα τελευταίο στάδιο κατεργασίας στη συμβατική προκατεργασία του νερού RO. Τα φυσίγγια φίλτρου είναι συνήθως 1-10 μm και να ενεργούν ως ένα τελικό στάδιο καθαρισμού για την απομάκρυνση μεγαλύτερων των σωματιδίων που διέρχονται μέσω των προηγούμενων μέσων διήθησης. Σωματίδια μεγαλύτερα από 5-10 mm μπορούν να ρυπάνουν τα κανάλια που χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση του συμπυκνώματος της αντίστροφης όσμωσης και ως εκ τούτου τα φυσίγγια φίλτρου είναι απαραίτητα ένα βήμα πριν από την τελική επεξεργασία αντίστροφης όσμωσης.

Τα αντικαθαλωτικά χρησιμοποιούνται κυρίως ως προεπεξεργασία για συστήματα RO υφάλμυρου νερού και συνήθως δοσολογούνται μετά από τα μέσα κοκκώδους διήθησης, είτε πριν είτε μετά τη διήθηση φυσιγγίου. Η επιλογή ενός συγκεκριμένου αντικαθαλωτικού εξαρτάται από τη σύνθεση του νερού τροφοδοσίας. Πολλά αντικαθαλωτικά είναι εμπορικά διαθέσιμα και έχουν σχεδιαστεί για να αντιμετωπίσουν συγκεκριμένα προβλήματα καθίζησης. Η βελτιστοποίηση του είδους και της δοσολογίας του αντικαθαλωτικού είναι τόσο σημαντική όσο και η βελτιστοποίηση του θρομβωτικού. Υψηλότερες δόσεις αντικαθαλωτικού δεν μειώνουν απαραίτητως την καθίζηση άλατος και η παρουσία ορισμένων δυναμικών ιζημάτων μπορεί να αλλάξει την αποτελεσματικότητα ενός συγκεκριμένου αντικαθαλωτικού.

Η χρήση αντικαθαλωτικού δεν συνιστάται, εάν η συγκέντρωση ορισμένων δυναμικών ιζημάτων είναι πολύ υψηλή. Ο υπερκορεσμός ενός άλατος μπορεί να περιγραφεί με τον δείκτη κορεσμού (Saturation Index (SI)) του άλατος. Ο δείκτης κορεσμού ($SI_x = IAP/K_{sp,x}$) είναι ο λόγος του γινομένου ενεργοτήτων των κατιόντων

και των ανιόντων του άλατος (Ion Activity Product (IAP)) προς το αντίστοιχο γινόμενο διαλυτότητας στο άλας ($K_{sp,x}$). Η οριακή τιμή για το ανθρακικό ασβέστιο ($CaCO_3$) εκφράζεται συχνά ως LSI, ή αλλιώς δείκτης κορεσμού Langelier (Langelier Saturation Index), που είναι ο λογάριθμος του SI ($\log_{10} (IAP / K_{sp,CaCO_3})$). Ο πίνακας 3 παρουσιάζει μία λίστα κοινών οριακών τιμών του SI ή του LSI για την χρήση αντικαθαλωτικών.

Πίνακας 3 - Αποτελεσματικότητα αντικαθαλωτικών: όρια συγκέντρωσης (SI) για επιλεγμένα άλατα σε διάλυμα με αντικαθαλωτικό (Hydranautics, 2003).	
Καθιζάνον Άλας	Όριο SI
BaSO₄	80
CaSO₄	4
SrSO₄	12
CaCO₃	$10^{-2.9}$ (LSI=2.9)
Silica (SiO₂)	1.6

Πίνακας 3. Οριακές τιμές SI για γνωστά αντικαθαλωτικά [4].

Η απολύμανση επιτυγχάνεται μέσω της προσθήκης ενός ισχυρού οξειδωτικού, όπως το όζον, το χλώριο (αέριο, διοξείδιο του χλωρίου ή υποχλωριώδες νάτριο), τη χλωραμίνη, ή το υπερμαγγανικό κάλιο. Το οξειδωτικό συνήθως δοσολογείται σε μία αρκετά υψηλή συγκέντρωση για να επιτρέψει στο υπολειπόμενο απολυμαντικό να κινηθεί μέσα στο υπόλοιπο σύστημα προεπεξεργασίας και να αποτρέψει τη βιολογική ανάπτυξη. Για παράδειγμα, το χλώριο συνήθως δοσολογείται έτσι ώστε να επιτρέψει μια υπολειπόμενη συγκέντρωση 0,5-1,0 mg / L. Εάν το χλώριο χρησιμοποιείται ως απολυμαντικό, ενεργός άνθρακα (συνήθως περιέχεται σε ένα φίλτρο) ή όξινο θειώδες νάτριο χρησιμοποιείται κατά το τέλος του συστήματος προεπεξεργασίας για την απομάκρυνση (χημική μείωση) του χλωρίου. Το όξινο θειώδες νάτριο είναι λιγότερο ακριβό και πιο συχνά χρησιμοποιείται για μεγάλες εγκαταστάσεις αφαλάτωσης. Η πλειοψηφία των μεμβρανών RO σήμερα στην αγορά είναι κατασκευασμένες από αρωματικά πολυαμίδια, και τέτοιες δομές είναι γνωστό ότι είναι ευαίσθητες σε χημική προσβολή από χλώριο. Έτσι η εκτεταμένη έκθεση σε χλώριο προκαλεί φθορά της μεμβράνης και μείωση της απόρριψης άλατος. Άλλα οξειδωτικά, όπως το όζον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απολύμανση, αλλά προκαλούν το σχηματισμό βρωμικού, ένα γνωστό και ελεγχόμενο καρκινογόνο, σε ύδατα που περιέχουν βρωμίδιο. Όλες οι διαδικασίες απολύμανσης προκαλούν τον σχηματισμό παραπροϊόντων απολύμανσης, τα οποία είναι δυνητικά τοξικά προϊόντα οξείδωσης που σχηματίζονται από τις αντιδράσεις μεταξύ του απολυμαντικού και των οργανικών και των ανόργανων συστατικών του νερού.

10.2 Προεπεξεργασία μέσω μεμβρανών.

Αν και η συμβατική προεπεξεργασία έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για μονάδες RO θαλασσινού και υφάλμυρου νερού, οι διακυμάνσεις στο νερό τροφοδοσίας μπορεί να προκαλέσουν μεταβολές στην αποτελεσματικότητα της συμβατικής προεπεξεργασίας. Συχνά, κολλοειδή και αιωρούμενα σωματίδια περνούν μέσα από τη συμβατική προεπεξεργασία και συμβάλουν στην δύσκολη (και πιθανώς μη αναστρέψιμη) απομάκρυνση της ρύπανσης των μεμβρανών RO.

Μια νέα τάση στην προεπεξεργασία αποτέλεσε μια μετακίνηση προς τη χρήση μεμβρανών με μεγαλύτερο μέγεθος πόρων (MF, UF και NF) για την επεξεργασία του νερού τροφοδοσίας RO. Οι εγκαταστάσεις και οι πειραματικές δοκιμές των μεμβρανών MF και UF έχουν αυξηθεί, ωστόσο οι πειραματικές δοκιμές δείχνουν και την επιτυχή εφαρμογή των μεμβρανών NF στην προεπεξεργασία της αντίστροφης όσμωσης. Τόσο οι μονάδες MF όσο και οι μονάδες UF έχουν τη δυνατότητα ανάπλυσης (καθαρισμός) και λειτουργίας κατά μετώπου ροής κάτι που δίνουν σε αυτές τις μεμβράνες περισσότερη λειτουργική ευελιξία από ότι έχουν οι μονάδες NF. Οι μεμβράνες UF φαίνεται να είναι μακράν η πιο συνηθισμένη επιλογή σε ερευνητικές μελέτες και πειραματικές δοκιμές και επιτυγχάνουν ίσως την καλύτερη ισορροπία μεταξύ της απομάκρυνσης των ρυπαντών και τη διαπερνούσα παραγωγή ανάμεσα στους τρεις τύπους μεμβρανών. Αυτό οφείλεται στο ότι οι μεμβράνες UF έχουν μικρότερους πόρους από τις μεμβράνες MF και υψηλότερη ροή από τις μεμβράνες NF. Ωστόσο, και οι τρεις μεμβράνες έχουν πλεονεκτικά χαρακτηριστικά, και κάθε μονάδα επεξεργασίας πρέπει να επιλέξει την προεπεξεργασία βάσει συγκεκριμένων ρύπων που θέλει να απομακρύνει. Οι μεμβράνες MF είναι η κατάλληλη επιλογή για την απομάκρυνση των μεγαλύτερων σωματιδίων σε υψηλότερες διαπερνούσες ροές, ενώ NF μεμβράνες χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση διαλυμένων προσμίξεων, καθώς και σωματιδιακού κολλοειδούς υλικού.

Η μικροδιήθηση (MF), η υπερδιήθηση (UF) και η νανοδιήθηση (NF) παρέχουν αρκετά πλεονεκτήματα ως προεπεξεργασία σε αντίστροφη όσμωση, σε σύγκριση με τη συμβατική πολλαπλή διήθηση. Οι μεμβράνες λειτουργούν ως ένα ορισμένο φράγμα μεταξύ του συστήματος RO κάθε αιωρούμενου σωματιδίου. Η προεπεξεργασία μέσω μεμβρανών μπορεί να μειώσει το SDI του τροφοδοτούμενου νερού σε τιμές χαμηλότερες του 2 και τη θολότητα σε τιμές μικρότερες από 0,05 NTU, και είναι ιδιαίτερα επωφελής για συστήματα RO που αντιμετωπίζουν επιφανειακά ύδατα, όπως θαλασσινό νερό ανοικτής πρόσληψης και υφάλμυρα επιφανειακά ύδατα. Τα επιφανειακά ύδατα τείνουν να έχουν περισσότερα οργανικά κολλοειδή και αιωρούμενα στερεά, καθώς και μεγαλύτερη μεταβλητότητα και σποραδικές προβληματικές εκδηλώσεις, όπως η αύξηση των φυκιών και η χημική μόλυνση. Λόγω της μεγαλύτερης απομάκρυνσης των οργανικών και σωματιδίων με προεπεξεργασία μέσω μεμβρανών, το σύστημα RO μπορεί να λειτουργεί σε υψηλότερη διαπερνούσα ροή. Οι τυπικές τελικές διαπερνούσες ροές για ένα σύστημα UF-RO κυμαίνονται σε ένα εύρος 15-24 L/m²·h, ενώ η διαπερνούσα ροή που εξέρχεται από το στάδιο προεπεξεργασίας UF είναι μεταξύ 60-150 L/m²·h. Επιπλέον,

η προεπεξεργασία μέσω μεμβρανών μειώνει τη γενική γήρανση και την καταστροφή των μεμβρανών RO από τα συστατικά του νερού τροφοδοσίας, μειώνει τις αντικαταστάσεις των μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης και την συχνότητα του χημικού καθαρισμού. Τα συστήματα προεπεξεργασίας με μεμβράνες έχουν, σε γενικές γραμμές, μειωμένο κόστους κεφαλαίου και τώρα γίνονται οικονομικά ανταγωνιστικά με τα συμβατικά συστήματα.

Τα βασικά μειονεκτήματα στη προεπεξεργασία μέσω μεμβρανών είναι η έμφυτη τάση της μεμβράνης να διαχωρίζει τους ρυπαντές από το παραγόμενο νερό που έχει ως αποτέλεσμα κατά την διαδικασία αυτή να ρυπαίνεται η ίδια η μεμβράνη. Τόσο η επιφανειακή ρύπανση, όσο και η ρύπανση των πόρων εμφανίζεται στις MF, UF και NF μεμβράνες. Ο κίνδυνος ρύπανσης της μεμβράνης εμποδίζει τη γενική λειτουργία σε υψηλή διαπερνούσα ροή (ειδικά για τα τροφοδοτούμενα ύδατα με υψηλή περιεκτικότητα σε οργανικά) και οι ακαθαρσίες προκαλούν βλάβη της μεμβράνης και μείωση της ροής. Έρευνες έχουν δείξει ότι οι υδρογονάνθρακες (πετρέλαιο) και η κυτταρική ή εξωκυτταρική ύλη (από βακτήρια) είναι ιδιαίτερα επιτυχείς ρυπαντές. Οι μεμβράνες NF μπορούν επίσης να υπόκεινται σε καθίζηση αλάτων και σε κλιμάκωση, λόγω των πολύ μικρότερων πόρων. Οι μεμβράνες UF και MF συνήθως αντικαθίσταται κάθε 5-10 χρόνια.

Η πήξη έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία ενσωματωμένη με μεμβράνες MF, UF, NF για την πρόληψη της ρύπανσης κατά τη διάρκεια προεπεξεργασίας του νερού τροφοδοσίας αντίστροφης όσμωσης. Το θρομβωτικό (πηκτικό) συνήθως δοσολογείται σε χαμηλή συγκέντρωση (~ 0,3-1 mg / L) πριν από το προεπεξεργασία μέσω μεμβρανών και επιτρέπει τον σχηματισμό ενός πορώδους πηγμένου κομματιού επί της επιφάνειας της μεμβράνης. Ο χλωριούχος σίδηρος (FeCl_3) έχει αποδειχθεί ότι είναι το πιο επιτυχημένο θρομβωτικό σε εφαρμογές προεπεξεργασίας τροφοδοτούμενου νερού RO. Το θρομβωτικό αφαιρεί τους βασικούς ρυπαντές της μεμβράνης και σχηματίζει μία δομή κέικ που είναι πιο πορώδης από την μεμβράνη, αποφεύγοντας έτσι τη μείωση ροής του προϊόντος. Ωστόσο, η επιτυχής πήξη και διήθηση μέσω της μεμβράνης είναι ευαίσθητες στην πηκτική δόση και δόσεις πάνω ή κάτω από τη βέλτιστη δόση μπορεί να οδηγήσουν σε μείωση της διαπερνούσας ροής. Επιπλέον, η χρήση των πηκτικών αποκλείει τη χρήση των αντικαθαλωτικών στο ίδιο ρεύμα, επειδή τα αντικαθαλωτικά είναι συνήθως αρνητικά φορτισμένα (όμοια φορτισμένα με τα σωματίδια), και τα πηκτικά με τα αντικαθαλωτικά θα σχηματίσουν μαζί ένα δύσκολο ρυπαντή για τη μεμβράνη. Ως εκ τούτου, εάν τα θρομβωτικά χρησιμοποιούνται μαζί με την προεπεξεργασία μέσω μεμβρανών πριν από την RO, τα αντικαθαλωτικά συνήθως δοσολογούνται μεταξύ της προεπεξεργασίας μέσω μεμβρανών και της μονάδας RO.

11. Σχεδιασμός συστήματος αντίστροφης όσμωσης.

11.1. Τυπικές περιοχές παραμέτρων λειτουργίας.

Μια σύγκριση του τυπικού εύρους λειτουργίας για τις βασικές παραμέτρους RO παρουσιάζεται στον Πίνακα 4 τόσο για υφάλμυρο όσο και για θαλασσινό νερό.

Πίνακας 4 - Σύγκριση του τυπικού εύρους λειτουργίας για τις βασικές παραμέτρους RO για υφάλμυρο και για θαλασσινό νερό.		
Παράμετρος	RO Θαλασσινού νερού	RO Υφάλμυρου νερού
Διαπερνούσα Ροή RO (L/m ² ·h)	12-15 (πρόσληψη ανοικτής θαλάσσης) 15-17 (θαλάσσιο πηγάδι)	12-45 (υπόγεια ύδατα)
Υδροστατική Πίεση (kPa)	5500-8000	600-3000
Αντικατάσταση Μεμβράνης	20% κάθε χρόνο Κάθε 2-5 χρόνια	5% κάθε χρόνο Κάθε 5-7 χρόνια
Ανάκτηση (%)	35-45	75-90
pH	5.5-7	5.5-7
Απόρριψη Άλατος (%)	99.4-99.7	95-99

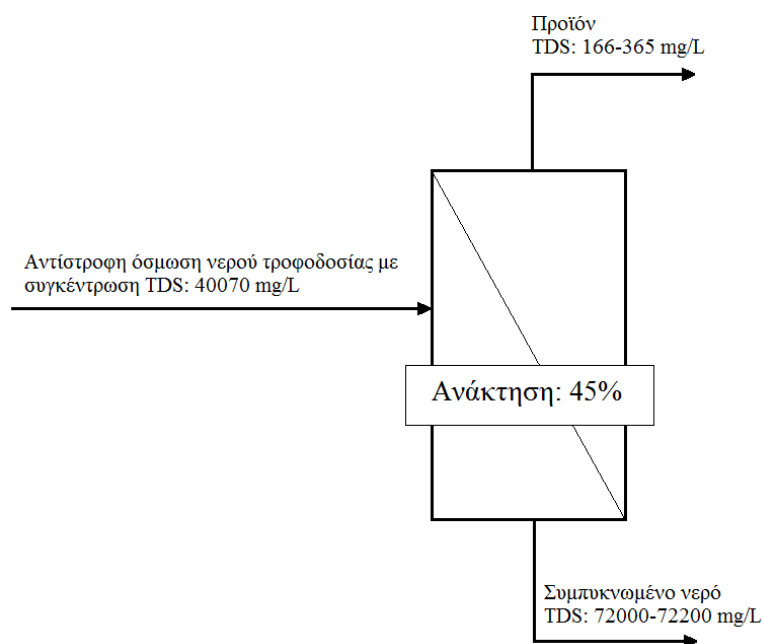
Πίνακας 4. Σύγκριση του τυπικού εύρους λειτουργίας για τις βασικές παραμέτρους RO για υφάλμυρο και για θαλασσινό νερό [4].

Λόγω της χαμηλότερης συγκέντρωσης σε TDS του νερού τροφοδοσίας, οι περισσότερες τιμές των παραμέτρων για το υφάλμυρο νερό RO είναι λιγότερο περιορισμένες από ότι για το θαλασσινό νερό RO. Για παράδειγμα, ακόμη και με μια απόρριψη αλάτων τόσο χαμηλή όπως 95%, μια μεμβράνη RO υφάλμυρου νερού μπορεί ακόμα να παράγει νερό με συγκέντρωση TDS αρκετά κάτω από τα πρότυπα του πόσιμου νερού. Επίσης η χαμηλότερη αλατότητα στο νερό τροφοδοσίας επιμηκύνει τη διάρκεια ζωής της μεμβράνης RO υφάλμυρου νερού και επιτρέπει υψηλότερη διαπερνούσα ροή σε χαμηλότερη πίεση τροφοδοσίας. Η διάρκεια ζωής της μεμβράνης μπορεί να γίνει σημαντικά μικρότερη από την υψηλή ρύπανση του νερού τροφοδοσίας RO που δεν είναι κατάλληλα ή αποτελεσματικά προεπεξεργασμένο. Επιπλέον, η ροή στην αντίστροφη όσμωση μπορεί να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ακαθαρσίες της μεμβράνης και η μέγιστη ροή σε μία συγκεκριμένη εμπορική μεμβράνη περιορίζεται από τις προδιαγραφές του εκάστοτε κατασκευαστή. Το φυσιολογικό εύρος λειτουργίας των τιμών pH παραμένει το ίδιο και για τους δύο τύπους μεμβρανών RO, λόγω του ελέγχου της καθίζησης και των υλικών της μεμβράνης.

11.2. Σχεδιασμός συστήματος αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού.

Οι μονάδες αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού συχνά λειτουργούν με ένα ή με δύο περάσματα αντίστροφης όσμωσης. Αν και πολλές νέες μονάδες έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί με συστοιχία δύο περασμάτων, οι πιο πρόσφατες έχουν επιλέξει ένα πέραςμα. Ακόμα, ορισμένες μονάδες πρέπει να χρησιμοποιούν περισσότερα περάσματα, όπως τέσσερα για παράδειγμα, ανάλογα με τις παραμέτρους του σχεδιασμού τους και τα πρότυπα του φρέσκου νερού. Η μονάδα αφαλάτωσης

στην Eni Gela της Σικελίας, φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 22, είναι ένα παράδειγμα μονάδας αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού με ένα πέρασμα.

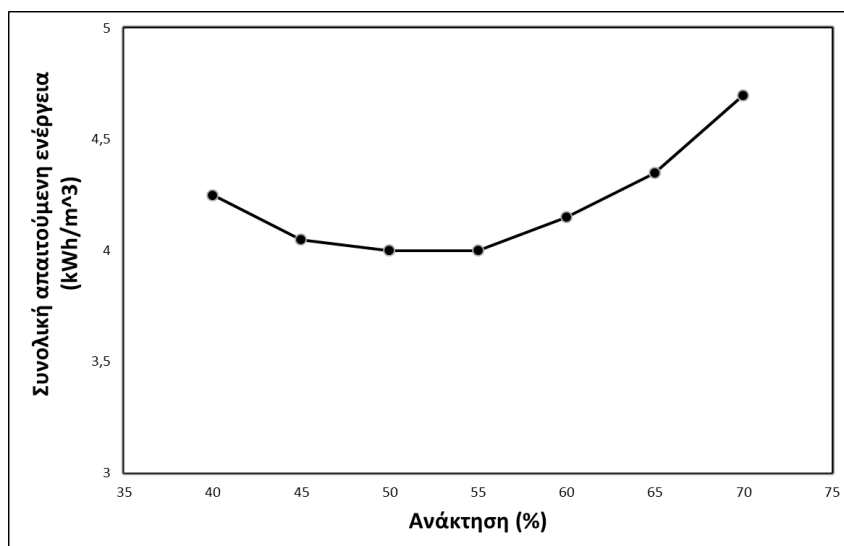


Σχήμα 22. Διάγραμμα της ροής νερού στη διαδικασία αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού μονάδας ενός πέρασματος στην Eni Gela της Σικελίας [4].

Το τροφοδοτούμενο νερό της μονάδας της Eni Gela έχει συγκέντρωση σε TDS 40070 mg/L και ζητούμενη ανάκτηση 45%. Κατά τη διάρκεια μιας τριετούς περιόδου, η ανάκτηση κυμαινόταν από 46% έως 40%. Συνήθως, η επιλογή μεταξύ ενός ή περισσότερων περασμάτων RO εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του ενεργειακού κόστους, τα χαρακτηριστικά του νερού τροφοδοσίας (θερμοκρασία, σύνθεση και συγκέντρωση σε TDS), την επιθυμητή ανάκτηση, και τα πρότυπα του παραγόμενου νερού.

Η βασική ενέργεια σε ένα σύστημα RO είναι η ισχύς που απαιτείται για την άντληση του νερού τροφοδοσίας και σχετίζεται άμεσα με την πίεση τροφοδοσίας και τον ρυθμό ροής. Οι υψηλές συγκεντρώσεις άλατος που εντοπίζονται στο θαλασσινό νερό απαιτούν υψηλές υδροστατικές πιέσεις (έως 7000 kPa). Όσο υψηλότερη είναι η συγκέντρωση του άλατος, τόσο μεγαλύτερη είναι η πίεση και η ισχύς άντλησης που απαιτείται για να παραχθεί μια επιθυμητή διαπερνούσα ροή. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η απαιτούμενη υδροστατική πίεση πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την οσμωτική πίεση στη πλευρά τροφοδοσίας της μεμβράνης. Όσο η ανάκτηση μιας μονάδας RO αυξάνει, αυξάνει και η οσμωτική πίεση στην πλευρά τροφοδοσίας της μεμβράνης, αυξάνοντας έτσι την πίεση τροφοδοσίας που απαιτείται. Ωστόσο, καθώς αυξάνεται η ανάκτηση, η ροή τροφοδοσίας που απαιτείται μειώνεται (για μια συγκεκριμένη ροή των προϊόντων), και για τις χαμηλότερες ανακτήσεις (35-50%) η συνολική απαίτηση ενέργειας μειώνεται με την αύξηση της ανάκτησης. Έτσι, υπάρχει μια ελάχιστη απαίτηση ενέργειας, συνήθως σε μία ανάκαμψη μεταξύ 50 και 55%, η οποία ποικίλλει ανάλογα με την αλατότητα του νερού τροφοδοσίας. Μια μελέτη

τέτοιας περίπτωσης από τους Wilf και Klinko (2001) φαίνεται στο Σχήμα 23. Εάν ένα σύστημα RO αποτελείται από περισσότερα από ένα περάσματα, η ενεργειακή απαίτηση θα είναι μεγαλύτερη λόγω της αυξημένης πτώσης πίεσης κατά μήκος των μετέπειτα περασμάτων.



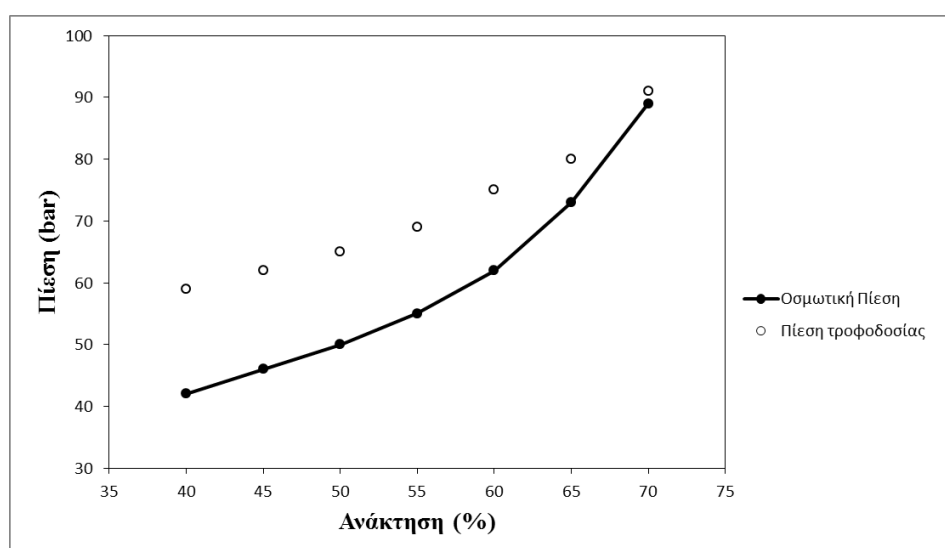
Σχήμα 23. Συνολική απαιτούμενη ενέργεια ανά όγκο παραγόμενου νερού συναρτήσει της ανάκτησης του συστήματος RO (Wilf και Klinko, 2001). (εισερχόμενο TDS: 34000 mg/L) [18].

Οι συσκευές ανάκτησης ενέργειας έχουν αναπτυχθεί για να βοηθήσουν στην ανάκτηση κάποιου μέρους από την ενέργεια που συνήθως χάνεται στις αντλίες και στο σύστημα της μεμβράνης. Ο πρωταρχικός στόχος είναι να γίνει ανάκτηση ενός μεγάλου μέρους της ενέργειας που κατέχει το πεπιεσμένο συμπυκνωμένο ρεύμα νερού το οποίο δεν ανακτήθηκε μετά την αντίστροφη όσμωση. Πριν συνεχιστεί η διάθεση ή η επεξεργασία το συμπύκνωμα οδηγείται μέσω μιας συσκευής ανάκτησης ενέργειας και η ανακτημένη ενέργεια χρησιμοποιείται ως μερική ισχύς των αντλιών. Οι συσκευές ανάκτησης ενέργειας εμπίπτουν σε δύο γενικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει συσκευές που χρησιμοποιούν υδραυλική ενέργεια για να προκαλέσουν μια θετική μετατόπιση εντός της συσκευής ανάκτησης και η ενέργεια μεταφέρεται σε ένα στάδιο ως υδραυλική ενέργεια. Οι συσκευές της δεύτερης κατηγορίας χρησιμοποιούν την υδραυλική ενέργεια του συμπυκνώματος RO σε μία διαδικασία δύο σταδίων η οποία μετατρέπει την ενέργεια πρώτα σε φυγοκεντρική μηχανική ενέργεια και στη συνέχεια πάλι σε υδραυλική ενέργεια. Ενώ κάποιες μικρού ή μεσαίου μεγέθους μονάδες χρησιμοποιούν τις συσκευές της πρώτης κατηγορίας, όπως ο τροχός Pelton ή ο στροβιλοσυμπιεστής της Pump Engineering, οι περισσότερες μονάδες χρησιμοποιούν σήμερα τις πιο εμπορικές συσκευές της δεύτερης κατηγορίας, όπως τον εναλλάκτη DWEER (Dual Work Exchanger Energy Recovery) , τον εναλλάκτη πίεσης PX (της εταιρείας ERI) ή τον εναλλάκτη PES (Pressure Exchanger System) της εταιρείας Siemag. Οι συσκευές ανάκτησης ενέργειας της πρώτης κατηγορίας μπορούν να παρέχουν μια καθαρή απόδοση μεταφοράς ενέργειας από το ρεύμα συμπυκνώματος στο ρεύμα τροφοδοσίας μεγαλύτερη από 95%.

Όταν μια συσκευή ανάκτησης ενέργειας χρησιμοποιείται για τη μεταφορά ενέργειας πίσω στον ρεύμα τροφοδοσίας RO, η τροφοδοσία μπορεί να παρακάμψει την κύρια αντλία τροφοδοσίας υψηλής πίεσης. Αντ' αυτού, μια ενισχυτική αντλία χρησιμοποιείται για να καλυφθούν οι απώλειες πίεσης στις μονάδες μεμβρανών RO, στις σωληνώσεις και στην συσκευή ανάκτησης ενέργειας. Έτσι το μέγεθος της αντλίας υψηλής πίεσης μπορεί στη συνέχεια να μειωθεί και να χρησιμοποιηθεί κυρίως για να αντλήσει το μέρος της τροφοδοσίας που αντικαθιστά το προϊόν της RO. Αυτός ο τύπος σχεδιασμού του συστήματος μειώνει σημαντικά τη συνολική κατανάλωση ενέργειας και παρέχει ξεχωριστά συστήματα άντλησης για την διαπερνούσα ροή και το συμπύκνωμα. Οι ενισχυτικές αντλίες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν μεταξύ των περάσμάτων RO για την ανάκτηση της πίεσης που χάνεται μετά από το πρώτο πέρασμα. Η επανασυμπίεση της τροφοδοσίας RO επιτρέπει μεγαλύτερη ανάκτηση στο δεύτερο πέρασμα.

Η ανάκτηση της αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού μεγιστοποιείται με τη χρησιμοποίηση μόνο ενός περάσματος μεμβρανών. Ωστόσο, εάν μία μονάδα έχει σχεδιαστεί ώστε να έχει περισσότερα από ένα περάσματα, η συνολική ανάκτηση είναι συνήθως μόνο κατά ένα μικρό ποσοστό μικρότερη από την ανάκτηση κατά το πρώτο πέρασμα. Η ανάκτηση για ένα σύστημα RO θαλασσινού νερού με δύο περάσματα μειώνεται ελαφρώς, επειδή η τροφοδοτούμενη ροή στο δεύτερο πέρασμα είναι η διαπερνούσα ροή του πρώτου περάσματος. Στόχος του δεύτερου περάσματος είναι η περαιτέρω βελτίωση της ποιότητας του παραγόμενου νερού λειτουργώντας σε υψηλή ανάκτηση (85-90%).

Η αύξηση της ανάκτησης είναι περιορισμένη στα συστήματα RO θαλασσινού νερού εξαιτίας της προκύπτουσας αύξησης της οσμωτικής πίεσης. Δεδομένου ότι η υδροστατική πίεση περιορίζεται περίπου στα 7000 kPa, η αύξηση στην ωσμωτική πίεση περιορίζει ρεαλιστικά την ανάκτηση αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού στο 55-60%. Οι Wilf και Klinko (2001) αξιολόγησαν την επίδραση της αύξησης της ανάκτησης στη πίεση τροφοδοσίας και την οσμωτική πίεση για διάφορες συγκεντρώσεις του νερού τροφοδοσίας. Στο Σχήμα 24 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για θαλασσινό νερό τροφοδοσίας με συγκέντρωση TDS 34.000 mg/L και διαπερνούσα ροή προϊόντος 13,5 L/m²·h.



Σχήμα 24. Επίδραση της ανάκτησης στην υδροστατική και οσμωτική πίεση (Wilf και Klinko, 2001). (TDS: 34000 mg/L) [18].

Για ανάκτηση πάνω από 60%, η απαιτούμενη πίεση τροφοδοσίας γίνεται πολύ μεγαλύτερη από 7000 kPa και μια υψηλότερη συγκέντρωση άλατος στο νερό τροφοδοσίας μετακινεί τις δύο καμπύλες ψηλότερα κατά μήκος της τεταγμένης. Από το 2001 έως σήμερα, οι βελτιώσεις στα υλικά των μεμβρανών και τη διαπερατότητα επιτρέπουν σε πρόσφατες μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφη όσμωσης να λειτουργούν σε χαμηλότερες πιέσεις, διατηρώντας ανακτήσεις πάνω από 40%. Μια σύνοψη επιλεγμένων μονάδων παρουσιάζεται στον Πίνακα 5:

Πίνακας 5 – Σύνοψη επιλεγμένων μονάδων αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού με ένα πέρασμα.				
Τοποθεσία μονάδας	TDS Τροφοδοσίας (mg/L)	Ανάκτηση (%)	Διαπερνούσα Ροή (L/m²·h)	Πίεση Τροφοδοσίας (bar)
El Coloso, Χιλή	36500	50	-	58
Las Palmas, Ισπανία	38000	40-45	11,0-13,5	55-70
Eni Gela, Σικελία	40070	40-46	13,3	62-64
Gran Canaria, Ισπανία	38000	42	13,0	57
Eilat, Ισραήλ	41000	50	13,0	61-63

Πίνακας 5. Σύνοψη επιλεγμένων μονάδων αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού με ένα πέρασμα [4].

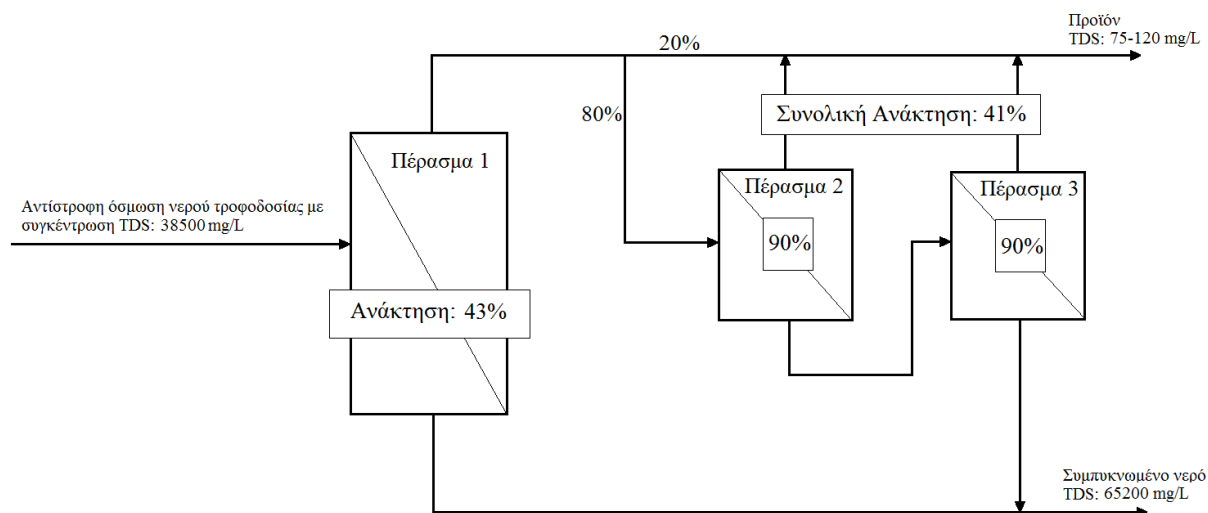
Οι μονάδες RO θαλασσινού νερού στο El Coloso της Χιλής και στο Eilat του Ισραήλ, έχουν νερά τροφοδοσίας με υψηλότερες συγκεντρώσεις TDS από το νερό που χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς στο Σχήμα 24. Ακόμα, και οι δύο μονάδες λειτουργούν με ανάκτηση 50% και χαμηλότερες πιέσεις από ότι θα μπορούσε να προβλεφθεί από τους υπολογισμούς των Wilf και Klinko.

Τα χαρακτηριστικά του νερού τροφοδοσίας παίζουν σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό ενός συστήματος RO. Για μία μονάδα RO ενός περάσματος με απόρριψη άλατος 99,7% και ανάκτηση 35%, η συγκέντρωση TDS στη διαπερνούσα ροή κυμαίνεται από 300 ως 400 mg/L. Οι περισσότερες μονάδες RO είναι σχεδιασμένες να παράγουν γλυκό νερό με συγκέντρωση TDS μικρότερη από 500 mg/L και πολλές μονάδες έχουν ως στόχο συγκεντρώσεις TDS πολύ μικρότερες από 500 mg / L. Αν ο στόχος για το παραγόμενο νερό είναι συγκέντρωση TDS πολύ κάτω από 300-400 mg/L, τουλάχιστον δύο περάσματα είναι αναγκαία για να επιτευχθεί η ζητούμενη τιμή. Επιπλέον, τα επιμέρους συστατικά του νερού τροφοδοσίας μπορεί να επηρεάσουν τον σχεδιασμό ενός συστήματος RO.

Η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας μπορεί να κυμαίνεται από 12 °C έως 35 °C. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μια αύξηση στη θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας θα αυξήσει την διαπερατότητα του νερού και του άλατος διαμέσου της μεμβράνης. Ωστόσο, οι περισσότερες μονάδες RO διατηρούν μια σταθερή διαπερνούσα ροή, επομένως η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση μόνο στην αλατότητα του παραγόμενου νερού. Μια αύξηση κατά 1 °C μπορεί να αυξήσει την διαπερατότητα άλατος κατά 3-5%. Εάν αναμένονται υψηλές θερμοκρασίες του νερού τροφοδοσίας, μπορεί να χρειάζονται πολλαπλά περάσματα για να επιτευχθεί μια επαρκώς χαμηλή συγκέντρωση TDS στο παραγόμενο νερό.

Για ένα σύστημα RO θαλασσινού νερού πολλαπλών περασμάτων είναι διαθέσιμες διάφορες επιλογές σχεδιασμού. Ο απλούστερος σχεδιασμός αποτελείται από ένα σύστημα δύο περασμάτων, όπου το πρώτο πέρασμα είναι μία συστοιχία μεμβρανών RO θαλασσινού νερού υψηλής πίεσης και το δεύτερο πέρασμα είναι ένα στάδιο RO

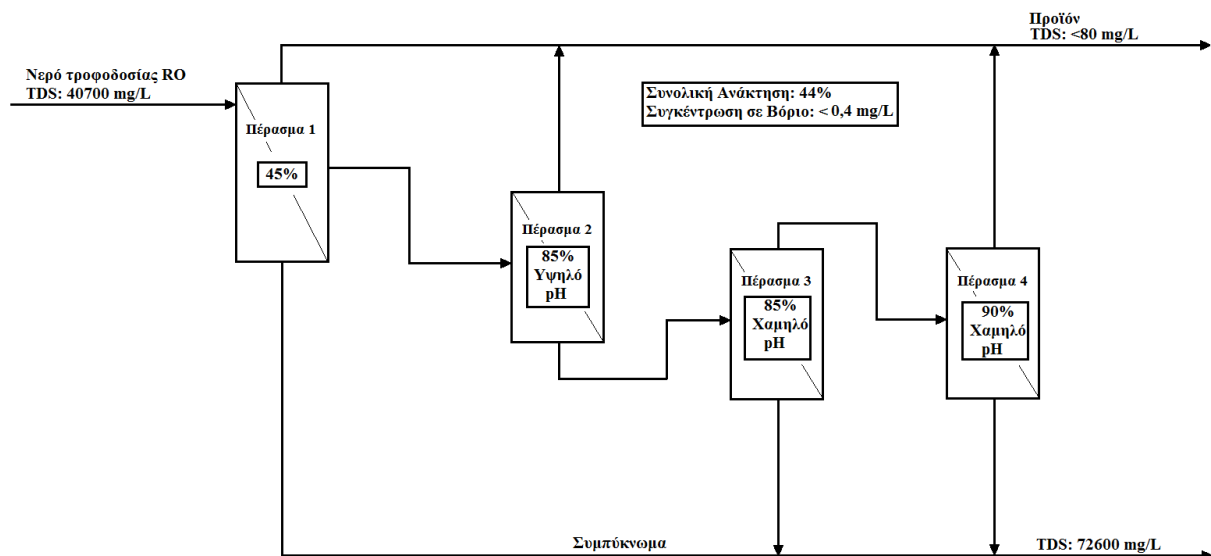
υφάλμυρου νερού χαμηλής πίεσης. Το πρώτο πέρασμα RO λειτουργεί συνήθως σε μία ανάκτηση 35-45%, ενώ το δεύτερο πέρασμα λειτουργεί σε μία ανάκτηση που πλησιάζει το 90%. Η μονάδα RO θαλασσινού νερού στη Fujairah της Σαουδικής Αραβίας που φαίνεται στο Σχήμα 25, λειτουργεί με ένα παρόμοιο σχεδιασμό, με τη διαφορά ότι το δεύτερο πέρασμα RO χωρίζεται σε δύο περάσματα RO υφάλμυρου νερού σε σειρά όπου το συμπύκνωμα από το δεύτερο πέρασμα RO υφάλμυρου νερού ανακυκλώνεται πίσω στο ρεύμα τροφοδοσίας RO, και η συνολική ανάκτηση του συστήματος RO είναι 41%.



Σχήμα 25. Διάγραμμα της ροής νερού στη διαδικασία αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού μονάδας στη Fujairah της Σαουδικής Αραβίας. Κάθε πλαίσιο αντιπροσωπεύει ένα πέρασμα αντίστροφης όσμωσης και παρουσιάζεται η ανάκτηση σε κάθε πέρασμα [4].

Το νερό τροφοδοσίας έχει συγκέντρωση TDS 38000-38500 mg/L, και το προκύπτον διήθημα έχει συγκέντρωση TDS (75-120 mg/L) χαμηλότερη από εκείνη που παρουσιάζεται για τη μονάδα ενός περάσματος Eni Gela στο Σχήμα 22. Συνήθως, ένα σύστημα RO πολλαπλών περασμάτων παράγει νερό με χαμηλότερη συγκέντρωση TDS με μόνο μια μικρή απώλεια στην ανάκτηση.

Υπάρχουν και πιο σύνθετα συστήματα RO θαλασσινού νερού, όπως είναι το σύστημα που χρησιμοποιείται στο Ashkelon του Ισραήλ. Η μονάδα Ashkelon χρησιμοποιεί τέσσερα περάσματα RO σε σειρά για τη αφαλάτωση θαλασσινού νερού από κανάλι ανοικτής πρόσληψης στη Μεσόγειο Θάλασσα (40700 mg/L TDS). Το διήθημα πρέπει να παράγεται με συγκέντρωση βορίου κάτω από 0,4 mg/L και συγκέντρωση χλωριδίων κάτω από 20 mg/L. Έτσι, η συστοιχία περασμάτων, με αλλαγές στο pH, είναι απαραίτητη για την επίτευξη της απαιτούμενης ποιότητας του παραγόμενου νερού. Στο Σχήμα 26 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του νερού στο σύστημα RO στο Ashkelon.



Σχήμα 26. Διάγραμμα της ροής νερού στη διαδικασία αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού μονάδας στο Ashkelon του Ισραήλ. Κάθε πλαίσιο αντιπροσωπεύει ένα πέρασμα αντίστροφης όσμωσης και παρουσιάζεται η ανάκτηση σε κάθε πέρασμα [4].

Το πρώτο πέρασμα έχει ανάκτηση 45% και λειτουργεί σε ουδέτερο pH. Το διήθημα από το άκρο της ροή τροφοδοσίας συλλέγεται ως προϊόν, ενώ το διήθημα από το άκρο της συμπυκνωμένης ροής συλλέγεται και στέλνεται στο δεύτερο πέρασμα. Το δεύτερο πέρασμα λειτουργεί σε ανάκτηση 85% και υψηλό pH για να επιτευχθεί μεγαλύτερη απομάκρυνση βορίου. Το συμπύκνωμα από το δεύτερο πέρασμα συνεχίζει στο τρίτο πέρασμα, το οποίο λειτουργεί επίσης σε ανάκτηση 85%, αλλά σε χαμηλό pH. Ο στόχος του τρίτου περάσματος είναι να επιτευχθεί υψηλότερη ανάκτηση χωρίς καθίζηση άλατος. Ωστόσο, η αφαίρεση βορίου στο τρίτο πέρασμα είναι ελάχιστη λόγω του χαμηλού pH και ένα τέταρτο πέρασμα (υψηλό pH, ανάκτηση 90%) αντιμετωπίζει το πρόβλημα της απομάκρυνσης του βορίου. Συνολικά, η ανάκτηση είναι περίπου 44% και η εγκατάσταση χρησιμοποιεί 25600 μεμβράνες RO θαλασσινού νερού και 15100 μεμβράνες RO υφάλμυρου νερού.

11.3. Εναλλακτικός σχεδιασμός συστήματος αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού.

Μια πρόσφατη τάση σχεδιασμού σε μεγάλες μονάδες RO θαλασσινού νερού είναι η υβριδική μονάδα: μια μονάδα αφαλάτωσης που συνδυάζει τη χρήση των διαφόρων τεχνολογιών μαζί στο ίδια μονάδα. Μονάδες όπως αυτή στη Fujairah στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα (ΗΑΕ) με παραγωγή νερού 454.000 m³/ημέρα χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό απόσταξης (MSF) και αντίστροφης όσμωσης (RO) για την παραγωγή πόσιμου νερού. Σε μία υβριδική εγκατάσταση, τα συστήματα RO και MSF λειτουργούν τόσο ανεξάρτητα όσο και παράλληλα. Η μονάδα Fujairah χρησιμοποιεί 5 μονάδες MSF που συνδέονται σε ένα γειτονικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής και μια σειρά επεξεργασίας τριών περασμάτων RO. Η συνολική παραγωγή νερού χωρίζεται σε 62,5% από MSF και 37,5 από RO, με τη μονάδα RO να παράγει φρέσκο νερό 170.500 m³/ημέρα. Οι μονάδες MSF λαμβάνουν ατμό από την μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, και τόσο οι μονάδες RO όσο και οι μονάδες MSF

τροφοδοτούνται από κανάλι ανοικτής πρόσληψης από τον κόλπο του Ομάν (Ινδικός Ωκεανός).

Το βασικό πλεονέκτημα των υβριδικών μονάδων αφαλάτωσης αυτού του τύπου είναι η ευελιξία στη παραγωγή φρέσκου νερού, λόγω της συνιστώσας της RO. Οι μονάδες MSF είναι σχετικά ευέλικτες (είναι δυνατές μεταβολές κατά 25% στη παραγωγική ικανότητα), ενώ οι μονάδες RO μπορούν να μεταβάλλουν τη παραγωγή τους μόνο κατά 5% λόγω του αρθρωτού σχεδιασμού τους. Η εγκατάσταση RO της μονάδας Fujairah αποτελείται από ένα στάδιο RO θαλασσινού νερού (18 train με ανάκτηση 43%) και δύο επόμενα στάδια RO υφάλμυρου νερού (8 train με ανάκτηση 90%). Κάθε στάδιο χωρίζεται σε δύο ξεχωριστές σωληνώσεις και συστήματα άντλησης για την περαιτέρω αύξηση της ευελιξίας. Η διαπερνούσα ροή από την RO, και από τα τρία στάδια, αναμιγνύεται με το προϊόν της MSF πριν από τη διανομή. Κατά τα δύο πρώτα έτη λειτουργίας, το μίγμα είχε μια τιμή TDS μεταξύ 75-120 mg/L. Επιπλέον, το συστατικό της RO βοηθά επίσης να μειώσει το συνολικό κόστος του παραγόμενου νερού. Ο σχεδιασμός υβριδικής μονάδας είναι ιδιαίτερα χρήσιμος σε χώρες όπως τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, όπου η ζήτηση νερού παραμένει σχετικά σταθερή κατά τη διάρκεια του έτους, αλλά η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ποικίλλει σημαντικά.

Οι υβριδικές μονάδες χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά όταν οι υπάρχουσες μονάδες αφαλάτωσης έπρεπε να επεκταθούν. Η Σαουδική Αραβία χρησιμοποίησε για πρώτη φορά υβριδικές μονάδες στις αρχές της δεκαετίας του 1990, όταν οι τρεις υπάρχουσες μονάδες MSF χρειαζόνταν πρόσθετη ικανότητα παραγωγής νερού. Οι μονάδες RO θαλασσινού νερού χτίστηκαν σε παρακείμενα ακίνητα, και τα παραγόμενα νερά από τις μονάδες MSF και τις μονάδες RO αναμιχθήκαν πριν από τη διανομή. Κάθε μονάδα MSF ήταν ήδη συνδυασμένη με μια μονάδα παραγωγής ενέργειας. Έτσι με τη μονάδα αφαλάτωσης, γεννήθηκε η έννοια της τριπλής-υβριδικής ισχύος. Περισσότερο ολοκληρωμένα υβριδικά συστήματα, όπου οι μονάδες RO και MSF χρησιμοποιούνται σε σειρά, μελετήθηκαν εκτενώς. Πιθανές χρήσεις των ολοκληρωμένων υβριδικών συστημάτων περιλαμβάνουν ανάμιξη του συμπυκνώματος RO με το ανακυκλώμενο ρεύμα MSF, χρησιμοποιώντας ένα μέρος του θερμαινόμενου θαλασσινού νερού της MSF ως νερό τροφοδοσίας της RO, και χρησιμοποιώντας νανοδιήθηση ως προεπεξεργασία για την αύξηση των ανακτήσεων MSF και RO. Ωστόσο, η απλός υβριδικός σχεδιασμός των μονάδων MSF και RO που λειτουργούν παράλληλα επιτρέπει ήδη σημαντικά πλεονεκτήματα στον τομέα βελτιστοποίησης της ενέργειας και των κεφαλαίων του κόστους για τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις MSF και στον τομέα της εξισορρόπησης στις απαιτήσεις του νερού και της ενέργειας. Ο παράλληλος σχεδιασμός παραμένει η τρέχουσα επιλογή σχεδιασμού υβριδικού συστήματος.

11.4. Σχεδιασμός συστήματος αντίστροφης όσμωσης υφάλμυρου νερού.

Οι μονάδες RO υφάλμυρου νερού τείνουν να είναι μικρότερες σε παραγωγική ικανότητα από ότι οι μονάδες RO θαλασσινού νερού, αλλά μεγαλύτερος αριθμός μονάδων RO υφάλμυρου νερού (48% του συνολικού αριθμού των μονάδων αφαλάτωσης) είναι σε λειτουργία σε όλο τον κόσμο σε σύγκριση με τις μονάδες RO θαλασσινού νερού (25%). Οι υπόλοιπες μονάδες αφαλάτωσης (28%) περιλαμβάνουν άλλα είδη νερών τροφοδοσίας, συμπεριλαμβανομένων των ποταμών, των λυμάτων, και του καθαρού νερού. Το νερό τροφοδοσίας για συστήματα υφάλμυρου νερού προέρχεται συνήθως από υπόγεια ύδατα, και τα υπόγεια ύδατα έχουν πολύ

χαμηλότερο ρυθμό ροής σε φρεάτια από ότι είναι δυνατόν να επιτευχθεί με μια ανοικτή πρόσληψη θαλασσινού νερού. Πολλές μονάδες παράγουν μεταξύ 500 και 10.000 m³/ημέρα πόσιμο νερό. Το εύρος παραγωγής των μονάδων αντίστροφης όσμωσης υφάλμυρου νερού στις ΗΠΑ είναι 200-76.000 m³/ ημέρα και το εύρος της συγκέντρωσης σε TDS του νερού τροφοδοσίας είναι 520-8.500 mg/L.

Ο βασικός σχεδιασμός για ένα σύστημα RO υφάλμυρου νερού είναι σημαντικά διαφορετικός από ότι για ένα σύστημα RO θαλασσινού νερού. Στην αντίστροφη όσμωση υφάλμυρου νερού, η τροφοδοσία σε ένα δεύτερο στάδιο είναι το συμπύκνωμα από το πρώτο στάδιο, ενώ στην αντίστροφη όσμωση θαλασσινού νερού RO, η τροφοδοσία σε ένα δεύτερο πέρασμα είναι το προϊόν διαπέρασης από το πρώτο πέρασμα. Αυτή η βασική διαφορά στον σχεδιασμό είναι αποτέλεσμα των χαμηλότερων συγκεντρώσεων TDS που υπάρχουν στο υφάλμυρο νερό οι οποίες επιτρέπουν στα συστήματα RO υφάλμυρου νερού να επιτύχουν πολύ υψηλότερες ανακτήσεις. Το υψηλό TDS σε μία τροφοδοσία θαλασσινού νερού μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη παραγωγή νερού με TDS μεγαλύτερο από 1000 mg/L σε αντίστροφη όσμωση θαλασσινού νερού ενός πέρασματος ενώ οι μονάδες RO υφάλμυρου νερού δεν έχουν συνήθως αυτό το πρόβλημα. Τα συστήματα RO υφάλμυρου νερού συχνά αποτελούνται από δύο στάδια, και κάθε στάδιο έχει μια ανάκαμψη της τάξης του 50-60%, επιτυγχάνοντας μία συνολική ανάκτηση συστήματος του 70-85%. Ένα τρίτο στάδιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ορισμένες περιπτώσεις, για την περαιτέρω αύξηση στην ανάκτηση ή την επίτευξη αφαίρεσης ανθεκτικών ρύπων (π.χ., βορίου) αλλάζοντας τις χημικές συνθήκες. Μερικά συστήματα RO υφάλμυρου νερού χρησιμοποιούν επίσης μεμβράνες NF για την απομάκρυνση αλάτων. Οι μεμβράνες NF μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σειρά μετά το σύστημα RO για τη επεξεργασία του συμπυκνώματος της RO και την αύξηση στην ανάκτηση του συστήματος. Οι διαπερνούσες ροές από την αντίστροφη όσμωση και τη νανοδιήθηση αναμιγνύονται δίνοντας το τελικό παραγόμενο νερό. Εκτός από τον αριθμό των σταδίων, μια άλλη σημαντική απόφαση στον σχεδιασμό μιας εγκατάστασης RO υφάλμυρου νερού είναι η μέθοδος διάθεσης του συμπυκνώματος.

11.5. Εναλλακτικός σχεδιασμός συστήματος αντίστροφης όσμωσης υφάλμυρου νερού.

Οι πρόσφατες καινοτομίες στον σχεδιασμό μονάδων RO υφάλμυρου νερού απορρέουν από τη συνδυασμένη ανάγκη για αφαλάτωση στην ενδοχώρα και τη μειωμένη παραγωγή συμπυκνώματος (ή την αυξημένη ανάκτηση του παραγόμενου νερού). Νέοι ρυθμιστικοί περιορισμοί, η αύξηση του μεγέθους των εγκαταστάσεων και η περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση επηρέασαν επίσης το ενδιαφέρον για την εναλλακτική διαχείριση του συμπυκνώματος. Ο βασικός περιοριστικός παράγοντας για την ευρεία χρήση της αφαλάτωσης στην ενδοχώρα είναι το υπέρογκο κόστος της διάθεσης του συμπυκνώματος. Η ιδανική λύση θα ήταν η περαιτέρω αύξηση της ανάκτησης στην RO υφάλμυρου νερού, αλλά η κλιμάκωση της μεμβράνης (scaling) περιορίζει τα συστήματα RO. Οι υψηλές ανακτήσεις (95-99%) που συναντάμε συνήθως σε μονάδες επεξεργασίας φρέσκου νερού δεν μπορούν να επιτευχθούν από τις εμπορικά διαθέσιμες μονάδες RO σήμερα.

Οι Ηνωμένες Πολιτείες (ΗΠΑ) υπήρξαν πρωτοπόρες στη χρήση αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού, όπου οι περισσότερες μονάδες RO της χώρας βρίσκονται κοντά σε παράκτιες περιοχές, δηλαδή εκεί όπου η διάθεση του συμπυκνώματος δεν αποτελεί μεγάλο μέρος του κόστους των μονάδων. Η ανάγκη για εναλλακτικές στρατηγικές

διαχείρισης του συμπυκνώματος έχει αυξηθεί λόγω της αύξησης του μεγέθους και του αριθμού των μονάδων RO υφάλμυρου νερού, καθώς και των πιο αυστηρών κανονισμών διάθεσης. Επιπλέον, πολλές περιοχές της ενδοχώρας των ΗΠΑ σιγά σιγά χάνουν (ή έχουν ήδη χάσει) τους πόρους γλυκού νερού και θα πρέπει να αρχίσουν να χρησιμοποιούν το υφάλμυρο νερό ως πηγή πόσιμου νερού. Άλλες χώρες, όπως η Αίγυπτος, η Τυνησία και η Ιορδανία, που βρίσκονται σε ξηρά κλίματα, χωρίς όμως να έχουν την αφθονία των ενεργειακών πόρων και τη οικονομική δυνατότητα ορισμένων άλλων χωρών, έχουν επίσης αρχίσει να χρησιμοποιούν RO υφάλμυρου νερού. Για τις χώρες αυτές, η RO είναι πιο προσιτή οικονομικά, και με τη χρήση υφάλμυρου νερού μειώνουν περαιτέρω το κόστος αφαλάτωσης. Για την αύξηση της ανάκτησης υφάλμυρου νερού πέρα από τα σημερινά όρια που επιβάλλονται από τον πυρήνα του συστήματος μεμβρανών RO έχουν προταθεί διάφορες τεχνολογίες και είδη επεξεργασίας. Ο γενικός στόχος όλων των επιλογών είναι η επεξεργασία του ρεύματος συμπυκνώματος ή η προεπεξεργασία του ρεύματος τροφοδοσίας RO για να ανακτηθεί περισσότερο από το νερό που συνήθως θεωρείται ως απόβλητο στο συμπύκνωμα.

Ο Gilron και άλλοι (2003) σύγκριναν τη προεπεξεργασία υφάλμυρου νερού RO με συμβατικά μέσα διήθησης με τη προεπεξεργασία διαμέσου CAPS (compact accelerated precipitation softening) [19]. Κατά τη διάρκεια της προεπεξεργασίας με CAPS, το νερό τροφοδοσίας και η βάση (NaOH) τροφοδοτούνται σε μία δεξαμενή ανάδευσης που περιέχει 1-3% στερεά ανθρακικού ασβεστίου. Η δεξαμενή περιέχει επίσης βυθισμένα φίλτρα (πόρων 8-13 μm). Η παρουσία του στερεού ανθρακικού ασβεστίου προκαλεί σχηματισμό κέικ επί των φίλτρων. Έτσι συμβαίνει καθίζηση ανθρακικού ασβεστίου τόσο στα υφιστάμενα στερεά σωματίδια του διαλύματος όσο και στο προσχηματισμένο κέικ του φίλτρου. Η μέθοδος CAPS παράγαγε νερό τροφοδοσίας RO με ροή 2000 $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ και απομάκρυνε 92-96% του ασβεστίου από το ακατέργαστο νερό τροφοδοσίας. Ως αποτέλεσμα, η μονάδα RO ήταν σε θέση να λειτουργήσει ανάκτηση 80% χωρίς την προσθήκη οξέος (pH τροφοδοσίας = 7,8) και σε ανάκτηση 88% με την προσθήκη οξέος ($\text{pH} = 7,6$). Συγκριτικά, τα συμβατικά μέσα διήθησης χωρίς προσθήκη οξέος πριν την αντίστροφη όσμωση πέτυχαν ανάκτηση της τάξης του 72% και με την προσθήκη οξέος η ανάκαμψη ήταν στο 88%. Ενώ ο ειδικός σχεδιασμός CAPS δεν έχει εφαρμοστεί σε εγκαταστάσεις αφαλάτωσης μεγάλης κλίμακας, η γενική ιδέα της επεξεργασίας του συμπυκνώματος μέσω καθίζησης αλάτων είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος και ένα σημερινό πεδίο έρευνας στην αφαλάτωση υφάλμυρου νερού.

Μια άλλη εκδοχή της ταχείας καθίζησης έχει μελετηθεί εκτενώς και αναπτύχθηκε από ερευνητές στην Καλιφόρνια. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν μια ενδιάμεση διαδικασία καθίζησης ανάμεσα σε δύο μονάδες RO υφάλμυρου νερού για να αυξήσουν τη ανάκτηση του νερού από το 90% στο 98%. Η διαδικασία της καθίζησης περιελάμβανε τη χρήση είτε ανθρακικού ασβεστίου (ασβεστίτης) ή θεικού ασβεστίου (γύψος) μαζί με τον έλεγχο του pH για την απομάκρυνση των δυσδιάλυτων αλάτων. Το στάδιο της καθίζησης διεξήχθη σε ένα κωνικό, αναδευόμενο κρυσταλλοποιητή, και το προκύπτον ίζημα αφέθηκε να κατακαθίσει, να φιλτραρισθεί (μέσω διάτρητου γυαλιού και φυσιγγίου 0,2 χιλιοστών) και στη συνέχεια να κατεργαστεί σε μία δεύτερη ενότητα RO. Ενώ με τη προσθήκη γύψου επιτεύχθηκε να απομακρυνθεί μόνο το 30% του ασβεστίου, με τη προσθήκη του ασβεστίτη επιτεύχθηκε απομάκρυνση του 92 έως 93% του ασβεστίου σε λιγότερο από 30 λεπτά. Ωστόσο, σε δοκιμές χωρίς προσθήκη ασβεστίτη, χρησιμοποιώντας μόνο ανύψωση του pH , επίσης επιτευχθεί 92-93% απομάκρυνση ασβεστίου, αλλά απαιτείται χρόνος ανάδευσης μεγαλύτερος από 30 λεπτά. Γενικά, τα πειράματα χρησιμοποιώντας και τα δύο συνθετικά και

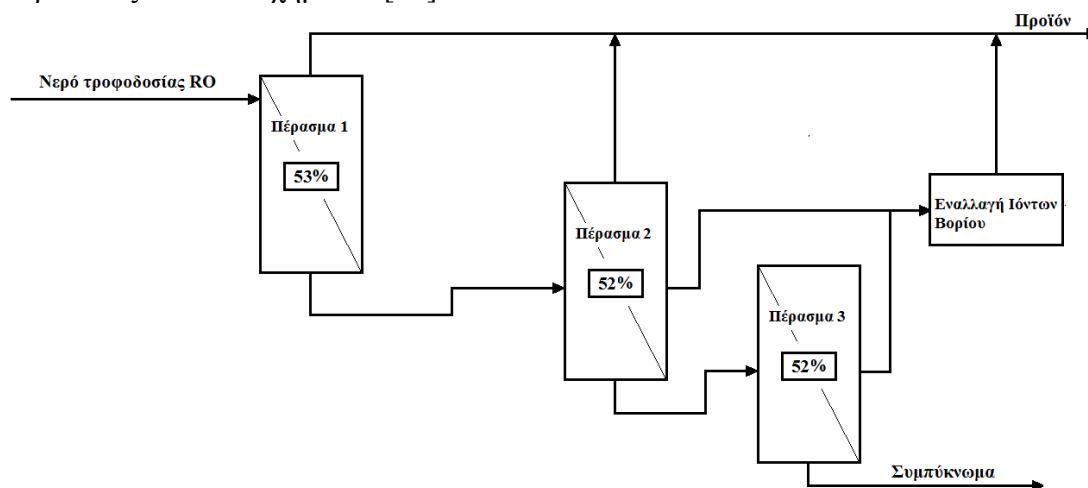
πραγματικές πηγές νερού (με χορήγηση αντικαθαλωτικών) είχαν ως αποτέλεσμα 98% συνολική ανάκτηση και καμία μετρήσιμη κλιμάκωση (scaling) της μεμβράνης στη δεύτερη μονάδα RO.

Ορισμένες έρευνες έχουν επικεντρωθεί στο νέο συνδυασμό των υφιστάμενων τεχνολογιών για την αύξηση της συνολικής ανάκτησης του συστήματος RO. Ο Almulla και άλλοι (2002) ερευνήσαν τρεις διαφορετικές στρατηγικές για να αυξηθεί η συνολική ανάκτηση από 70-75% σε 90-95%, όπως επεξεργασία του συμπυκνώματος RO υφάλμυρου νερού σε μεμβράνη RO θαλασσινού νερού, επεξεργασία υπερδιήθησης (UF) των προϊόντων έκπλυσης από το φιλτράρισμα του νερού, και επεξεργασία με κρυσταλλοποιητή-UF του συμπυκνώματος RO υφάλμυρου νερού [20]. Οι μεμβράνες RO θαλασσινού νερού λειτούργησαν σε πίεση τροφοδοσίας 2700 kPa και ανάκτηση 40%, αυξάνοντας τη συνολική ανάκτηση από 73% σε 83%. Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του συμπυκνώματος RO υφάλμυρου νερού, η καθίζηση ανθρακικού ασβεστίου, θεικού μαγνησίου, και διοξειδίου του πυριτίου περιόρισαν την ανάκτηση. Όταν χρησιμοποιήθηκε UF για τη επεξεργασία των προϊόντων έκπλυσης ανακτήθηκε τουλάχιστον το 92% του νερού και η συνολική ανάκτηση του συστήματος αυξήθηκε σε 85,4%. Τέλος, οι ερευνητές έδειξαν, με δοκιμές, ότι η κρυσταλλοποίηση μπορούσε να αφαιρέσει σημαντικά τμήματα του διοξειδίου του πυριτίου (83%), του ασβεστίου (92%) και του μαγνησίου (92%) και η συνολική ανάκτηση του συστήματος λόγω της επεξεργασίας του συμπυκνώματος με κρυσταλλοποιητή-UF εκτιμήθηκε στο 95%.

Μια άλλη επιλογή για την παραδοσιακή διάθεση του συμπυκνώματος είναι η επεξεργασία του συμπυκνώματος για συγκεκριμένη ανάκτηση άλατος. Χρησιμοποιώντας την ειδική σύνθεση του συμπυκνώματος, επιμέρους άλατα μπορούν να αφαιρεθούν κατά σειρά χρησιμοποιώντας μεταβολές του pH και καθίζηση αλάτων. Η διαδικασία έχει αναπτυχθεί από εταιρείες όπως τη Geo-Processors Pty Limited (Αυστραλία) και έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για τη επεξεργασία συμπυκνώματος σε πιλοτικές και εμπορικές εφαρμογές. Στο Eilat του Ισραήλ το συμπύκνωμα από μία μονάδα RO θαλασσινού νερού χρησιμοποιείται για την παραγωγή αλατιού. Το νερό τροφοδοσίας στη μονάδα RO είναι ένα μίγμα του θαλασσινού νερού και του συμπυκνώματος από μία τοπική μονάδα RO υφάλμυρου νερού. Με τον τρόπο αυτό, η μονάδα RO υφάλμυρου νερού αποφεύγει τη ρύπανση του θαλασσινού νερού και το κόστος απαλλαγής του συμπυκνώματος χρησιμοποιώντας το τελικά ενός προϊόντος κατανάλωσης.

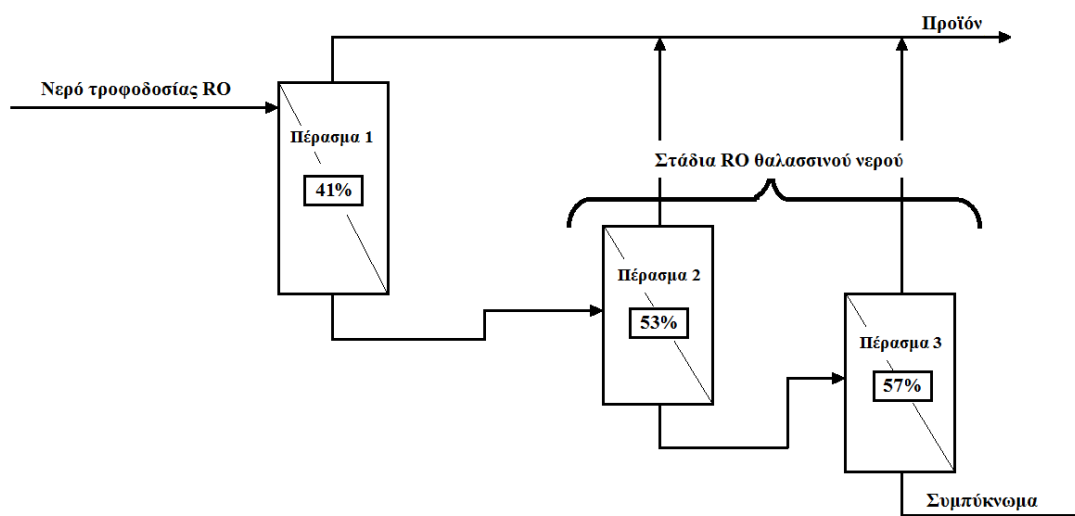
Για τους υδάτινους πόρους υφάλμυρου νερού με υψηλές συγκεντρώσεις βορίου, ο συμβατικός σχεδιασμός RO δύο σταδίων έχει επεκταθεί για να συμπεριλάβει επιπλέον στάδια RO ή ένα σύστημα ανταλλαγής ιόντων για την επίτευξη της απομάκρυνσης του βορίου. Αν και ομαδοποιείται εντός της γενικής διαδικασίας της επεξεργασίας ανταλλαγής ιόντων, η ρητίνη που χρησιμοποιείται για την αφαίρεση βορίου αλληλεπιδρά με ιονισμένα ή ουδέτερα μόρια βορίου (βορικό οξύ). Ως εκ τούτου, η ρητίνη είναι πολύ ειδική και μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ίδιο τόσο σε ουδέτερο όσο και σε όξινο pH για το επακόλουθο σύστημα RO που έχει σχεδιαστεί. Δεν υπάρχουν άλλα ιόντα στο διάλυμα που επηρεάζονται από την ειδική στο βόριο ρητίνη, και μία τυπική στήλη ανταλλαγής ιόντων μειώνει τη συγκέντρωση βορίου σε τιμή κάτω από 0,05 mg/L. Συγκριτικά, η συγκέντρωση βορίου μετά από το πρώτο πέρασμα μεμβρανών RO θαλασσινού νερού είναι μεταξύ 1 και 2 mg/L και το δεύτερο πέρασμα σε υψηλό pH μπορεί να μειώσει τη συγκέντρωση βορίου κάτω από 0,5 mg/L. Η ειδική για το βόριο στήλη ανταλλαγής ιόντων συνήθως τοποθετείται μετά το σύστημα RO αν υπάρχουν πολλά στάδια RO, κάτι σύνηθες στην αντίστροφη όσμωση υφάλμυρου νερού, η ανταλλαγή ιόντων βορίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί

για τη επεξεργασία της διαπερνούσας ροής από όλα ή τα επιλεγμένα στάδια RO. Η πρώτη παγκοσμίως μονάδα RO υφάλμυρου νερού που χρησιμοποίησε ανταλλαγή ιόντων βορίου ξεκίνησε τη λειτουργίας (στο Ισραήλ) τον Μάιο του 2006. Καθώς όλο και περισσότερες χώρες ακολουθούν το παράδειγμά του Ισραήλ όσον αφορά την υιοθέτηση αυστηρών προτύπων βορίου για το πόσιμο νερό, η τεχνολογία ανταλλαγής ιόντων είναι πιθανό να εφαρμόζεται όλο και περισσότερο. Ένα σύστημα RO-ανταλλαγής ιόντων που προτάθηκε από τους Glueckstern and Priel (2007) παρουσιάζεται στο Σχήμα 27 [21].



Σχήμα 27. Πιθανή διαμόρφωση για ένα συνδυασμένο σύστημα RO υφάλμυρου νερού και εναλλάκτη ιόντων βορίου [21].

Μια άλλη θεραπευτική επιλογή επεξεργασίας για την αφαίρεση βορίου σε συστήματα RO υφάλμυρου νερού είναι η ειδικά σχεδιασμένες μεμβράνες RO για απομάκρυνση σε ουδέτερο ή όξινο pH ή η χρήση μεμβρανών RO θαλασσινού νερού στο δεύτερο ή/και το τρίτο στάδιο ενός συστήματος RO υφάλμυρου νερού. Ωστόσο, η πρώτη επιλογή μεμβρανών απαιτεί περισσότερη ενέργεια και η δεύτερη επιλογή απαιτεί αύξηση του pH. Η κατάλληλη τεχνολογία θα πρέπει να επιλέγεται μετά από αξιολόγηση του ειδικού σχεδιασμού των μονάδων. Ένα σχέδιο για την απομάκρυνση του βορίου σε ένα σύστημα RO υφάλμυρου νερού χρησιμοποιώντας μεμβράνες RO θαλασσινού νερού στα μεταγενέστερα στάδια παρουσιάζεται στο Σχήμα 28.



Σχήμα 28. Αφαίρεση βορίου σε σύστημα RO υφάλμυρου νερού που χρησιμοποιεί μεμβράνες RO θαλασσινού νερού στο δεύτερο και στο τρίτο στάδιο [4].

12. Προσομοίωση μοντέλου συστημάτων αντίστροφης όσμωσης για αφαλάτωση θαλασσινού νερού.

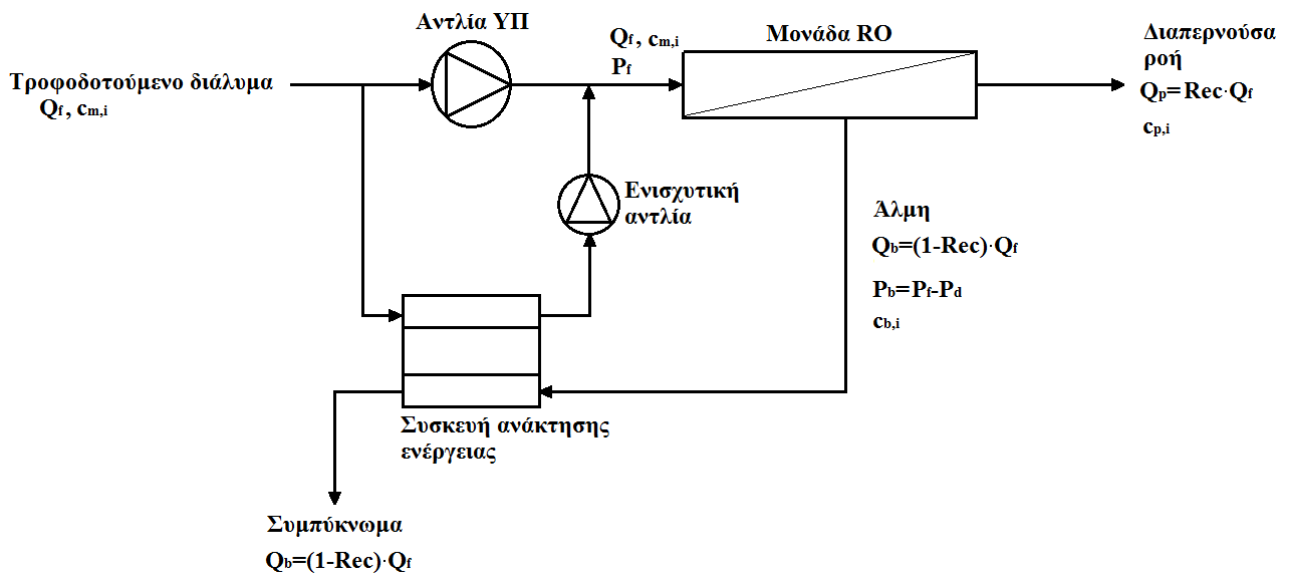
Στη συνέχεια ακολουθεί μία προσομοίωση μοντέλου συστημάτων αντίστροφης όσμωσης για αφαλάτωση θαλασσινού νερού. Στο μαθηματικό μοντέλο έχει εφαρμοστεί το μοντέλο διάλυσης-διάχυσης τροποποιημένο με τη θεωρία της συγκέντρωσης πόλωσης. Σκοπός της προσομοίωσης είναι να προβλεφθεί η απόδοση της αντίστροφης όσμωσης και να βελτιστοποιηθεί η απαιτούμενη ενέργεια καθώς επίσης και η ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος.

12.1. Ανάπτυξη μοντέλου.

Οι ακόλουθες παραδοχές χρησιμοποιήθηκαν για τον ορισμό του μοντέλου:

- Το μοντέλο διάλυσης-διάχυσης εφαρμοστεί για τη μεταφορά του νερού και της διαλυμένης ουσίας δια μέσου της μεμβράνης (Εξ. 12.1 και Εξ. 12.2)
- Μία μονάδα μεμβρανών είναι κατασκευασμένη από επίπεδα κανάλια με διαχωριστικά πλέγματα.
- Ο συντελεστής διάχυσης είναι ανεξάρτητος από τη συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας.
- Η συγκέντρωση άλατος μεταβάλλεται γραμμικά κατά μήκος ενός στοιχείου μεμβρανών (Εξ. 12.9)
- Η θεωρία λεπτού φιλμ εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της επίδρασης της συγκέντρωσης πόλωσης (Εξ. 12.8)
- Η πτώση πίεσης στη διαπερνούσα πλευρά είναι αμελητέα (Εξ. 12.3)
- Η οσμωτική πίεση είναι ανάλογη της συγκέντρωσης άλατος (Εξ. 12.4)
- Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας είναι σταθερός για δεδομένη κατάσταση ρευστού (Εξ. 12.10).
- Οι συντελεστές μεταφοράς των διαλυμένων ουσιών, εκτός του βορίου, είναι οι ίδιοι με αυτούς του NaCl. Με άλλα λόγια, θεωρείται ένα δυαδικό σύστημα διαλυμένων ουσιών [άλατος (i:salt), και βορίου (i:boron)] για απλοποίηση.
- Ο ρυθμός της διαπερνούσας ροής είναι σταθερός ενώ ο ρυθμός της ροής τροφοδοσίας μεταβάλλεται σύμφωνα με την ανάγκη.
- Η κατανάλωση ενέργειας από την υψηλής πίεσης αντλία τροφοδοσίας υπολογίζεται για τη μέγιστη ενέργεια που χρησιμοποιεί η διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης.

Το Σχήμα 29 απεικονίζει τη ροή του νερού σε ένα σύστημα μεμβρανών RO για αφαλάτωση θαλασσινού νερού.



Σχήμα 29. Σχηματικό διάγραμμα διαδικασίας αφαλάτωσης RO [22].

Τα κύρια στοιχεία του συστήματος αντίστροφης όσμωσης είναι μία μονάδα άντλησης, η συσκευή ανάκτησης ενέργειας (Energy Recovery Device, ERD) και η μονάδα RO. Μία αντλία υψηλής πίεσης (ΥΠ) τροφοδοτεί τη μονάδα RO με ροή νερού (Q_f) υψηλής πίεσης (P_f). Μία συσκευή ανάκτησης ενέργειας μεταφέρει την ενέργεια από το ρεύμα συμπυκνώματος απευθείας στη ροή τροφοδοσίας της μονάδας RO. Μία μονάδα RO είναι μια φυσικά συσκευασμένη ομάδα δοχείων RO τοποθετημένα σε σειρά και ένα δοχείο RO περιλαμβάνει 6-8 μονάδες μεμβρανών. Από τη στιγμή που υπάρχει πτώση πίεσης (P_d) κατά μήκος ενός δοχείου, η πίεση του συμπυκνώματος (P_f) είναι μικρότερη από τη πίεση τροφοδοσίας (P_f). Ο βαθμός ανάκτησης (Rec) του συστήματος αντίστροφης όσμωσης ορίζεται ως ο λόγος της διαπερνούσας ροής (Q_p) προς τη ροή τροφοδοσίας (Q_f).

Ο Πίνακας 6 συνοψίζει τις εξισώσεις του μοντέλου για την προσομοίωση της διαδικασίας της αντίστροφης όσμωσης.

Ερμηνεία	Εξίσωση	No
Μεταφορά διαλύματος	$J = L_v(P_f - P_{loss})$	(12.1)
Παράμετρος μεταφοράς διαλύματος	$L_v = \frac{1}{\frac{1}{L_{v,0} e^{\frac{\alpha_1(T-293)}{293} - \alpha_2 P_f}} + \eta R_c} \times \left(1 - \frac{A_s}{A_m}\right)$	(12.2)
Απώλεια πίεσης	$P_{loss} = \sum_i^n \Delta\Pi_i + P_d$	(12.3)
Οσμωτική πίεση	$\Delta\Pi_i = (c_{m,i} - c_{p,i})RT$	(12.4)
Πτώση πίεσης σε ένα στοιχείο	$P_d = \gamma_1 \left(\frac{ud_h}{v}\right)^{\gamma_2}$	(12.5)
Μεταφορά διαλυμένης ουσίας	$J_{s,i} = J_{c,p,i} = L_{s,i}(\bar{c}_{m,i} - c_{p,i})$	(12.6)
Παράμετρος μεταφοράς διαλυμένης ουσίας	$L_{s,i} = L_{s,i,0} e^{\frac{\beta_1(T-273)}{273}}$	(12.7)
Συγκέντρωση πόλωσης	$\frac{c_{m,i} - c_{p,i}}{c_{b,i} - c_{p,i}} = \frac{J}{e^{k_i}}$	(12.8)
Μέση συγκέντρωση	$\bar{c}_{m,i} = 0,5(c_{m,i} _{x=0} + c_{m,i} _{x=l_m})$	(12.9)
Συντελεστής μεταφοράς μάζας	$k_i = 0,5510 \left(\frac{ud_h}{v}\right)^{0,4} \left(\frac{v}{D_i}\right)^{0,17} \left(\frac{c_{b,i}}{\rho}\right)^{-0,77} \left(\frac{D_i}{d_h}\right)$	(12.10)
Ιξώδες	$\eta = 2,414 \times 10^{-5} \times 10^{\frac{247,8}{T-140}}$	(12.11)
Βαθμός ανάκτησης	$Rec = \frac{Q_p}{Q_f}$	(12.12)
Ειδική ενέργεια	$E = \frac{P_f Q_f (\varepsilon_{pump})^{-1} - P_b Q_b \varepsilon_{ERD}}{Q_p}$	(12.13)
Ταχύτητα εγκάρσιας ροής σε κανάλι άλμης RO	$u = \frac{Q_b}{w_m h_m}$	(12.14)
Ισοζύγιο μάζας	$Q_f c_{m,i} = Q_p c_{p,i} + Q_b c_{b,i}$	(12.15)

Πίνακας 6. Εξισώσεις προσομοίωσης της διεργασίας RO [22], [23].

Η σύνθεση του θαλασσινού νερού που χρησιμοποιήθηκε κατά τη μοντελοποίηση παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.

Συστατικό	Συγκέντρωση [mg/L]
Νάτριο, Na ⁺	10800
Κάλιο, K ⁺	392
Ασβέστιο, Ca ²⁺	411
Μαγνήσιο, Mg ²⁺	1290
Χλώριο, Cl ⁻	19439
Θειικό, SO ₄ ²⁻	2701
Όξινο ανθρακικό, HCO ₃ ⁻	145
Ανθρακικό, CO ₃	7,4
Βόριο, B	5
Πυρίτιο, SiO ₂	2,9
Συνολικά διαλυμένα στερεά, TDS	35217

Πίνακας 7. Σύνθεση θαλασσινού νερού του μοντέλου [22].

Δύο είδη παραμέτρων απαιτούνται για τους υπολογισμούς του μοντέλου. Οι γενικές παράμετροι όπως τα Q_p , A_m και ϵ_{pump} βρέθηκαν από προηγούμενες διεργασίες και παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Διαπερνούσα ροή	Q_p [m ³ /day]	1090
Εμβαδόν μεμβράνης για ένα στοιχείο RO	A_m [m ²]	35,3
Μήκος καναλιού άλμης για ένα στοιχείο RO	l_m [m]	0,8665
Ύψος καναλιού άλμης για ένα στοιχείο RO	h_m [m]	$0,84 \times 10^{-3}$
Πλάτος καναλιού άλμης για ένα στοιχείο RO	w_m [m]	1,34
Αριθμός στοιχείων σε ένα δοχείο πίεσης	n_e	6
Σταθερά για τη μεταφορά διαλυμένης ουσίας	α_1	8,6464
Σταθερά για τη μεταφορά διαλυμένης ουσίας	α_2 [bar ⁻¹]	0,0149
Σταθερά για τη μεταφορά διαλύματος	β_1	14,648
Απόδοση αντλίας	ϵ_{pump}	0,8

Πίνακας 8. Παράμετροι για τη προσομοίωση της διεργασίας RO [22].

Από τη άλλη μεριά οι ειδικές, για τις μεμβράνες που χρησιμοποιούνται, παράμετροι όπως οι $L_{v,0}$, $L_{s,salt,0}$, $L_{s,boron,0}$, γ_1 και γ_2 αποφασίστηκαν συγκρίνοντας τους υπολογισμούς του μοντέλου με υπάρχοντα δεδομένα RO. Οι τιμές αυτών των παραμέτρων παρουσιάζονται στον πίνακα 9.

Παράμετρος	Τιμή
$L_{v,0} [\frac{m^2 \cdot s}{kg}]$	$5,417 \times 10^{-12}$
$L_{s,salt,0} [\frac{m}{s}]$	$5,13 \times 10^{-9}$
$L_{s,boron,0} [\frac{m}{s}]$	$6,54 \times 10^{-7}$
$\gamma_1 [bar]$	$1,1 \times 10^{-9}$
γ_2	1,38

Πίνακας 9. Παράμετροι μεμβράνης για τη προσομοίωση της διεργασίας RO [22].

Οι τιμές των υπολοίπων παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στις εξισώσεις του μοντέλου παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Υδραυλική διάμετρος	$d_h = \frac{4h_m w_m}{2(h_m + w_m)} [m]$	$1,67895 \times 10^{-3}$
Κινηματικό ιξώδες	$\nu [\frac{m^2}{s}]$	$0,9015 \times 10^{-6}$
Συντελεστής διάχυσης TDS	$D_{salt} [\frac{m^2}{s}]$	$1,2 \times 10^{-9}$
Συντελεστής διάχυσης βορίου	$D_{boron} [\frac{m^2}{s}]$	1.12×10^{-9}
Πυκνότητα νερού	$\rho [\frac{kg}{m^3}]$	997
Αντίσταση σχηματισμού cake	$R_c [m^{-1}]$	$2,64 \times 10^{14}$
Επιφάνεια μεμβράνης ελεύθερη από καθιζήσεις	$A_s [m^2]$	17,65
Παγκόσμια σταθερά αερίων	$R [\frac{J}{mol \cdot K}]$	8,314

Πίνακας 10. Παράμετροι εξισώσεων της προσομοίωσης της διεργασίας RO [22].

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω παραμέτρους, οι εξισώσεις του Πίνακα 6 λύθηκαν ταυτόχρονα για τον προσδιορισμό της τροφοδοτούμενης πίεσης (P_f), της ειδικής ενέργειας κατανάλωσης (E), της συγκέντρωσης βορίου στη διαπερνούσα ροή ($c_{p,boron}$) και της συγκέντρωσης TDS στη διαπερνούσα ροή ($c_{p,salt}$). Ο υπολογισμός διεξήχθη για ένα στοιχείο μεμβρανών.

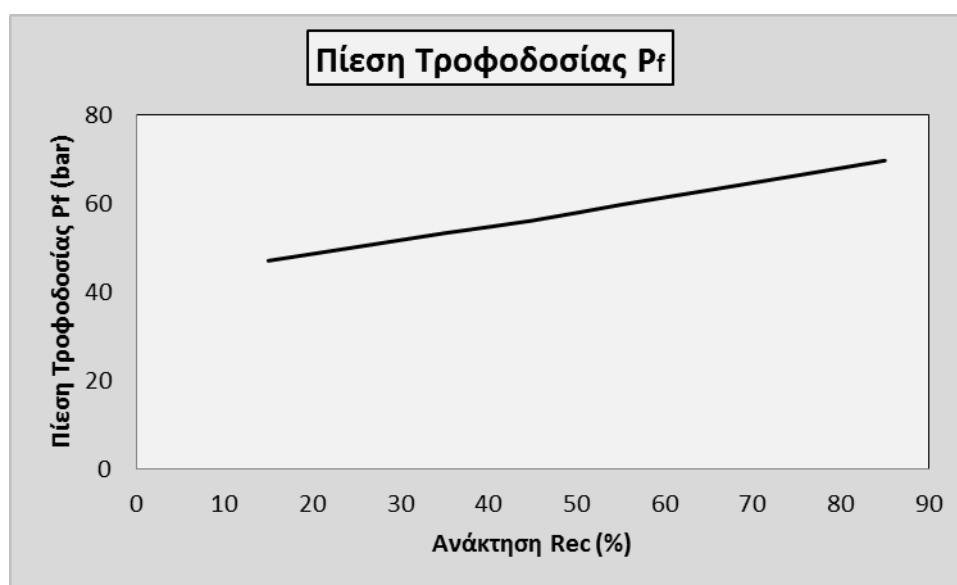
12.2. Αποτελέσματα και ανάλυση.

12.2.1. Επίδραση της ανάκτησης (Rec) στην απόδοση της RO.

Η αποτελεσματικότητα της διήθησης RO εξαρτάται από ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων λειτουργίας συμπεριλαμβανομένης της ανάκτησης (Rec). Στο Σχήμα 30 παρουσιάζονται οι καμπύλες της τροφοδοτούμενης πίεσης (P_f), της ειδικής ενέργειας κατανάλωσης (E) της συγκέντρωσης TDS στη διαπερνούσα ροή ($c_{p,salt}$) και της συγκέντρωσης βορίου στη διαπερνούσα ροή ($c_{p,boron}$) για βαθμό ανάκτησης (Rec) που κυμαίνεται από 15 έως 70% .

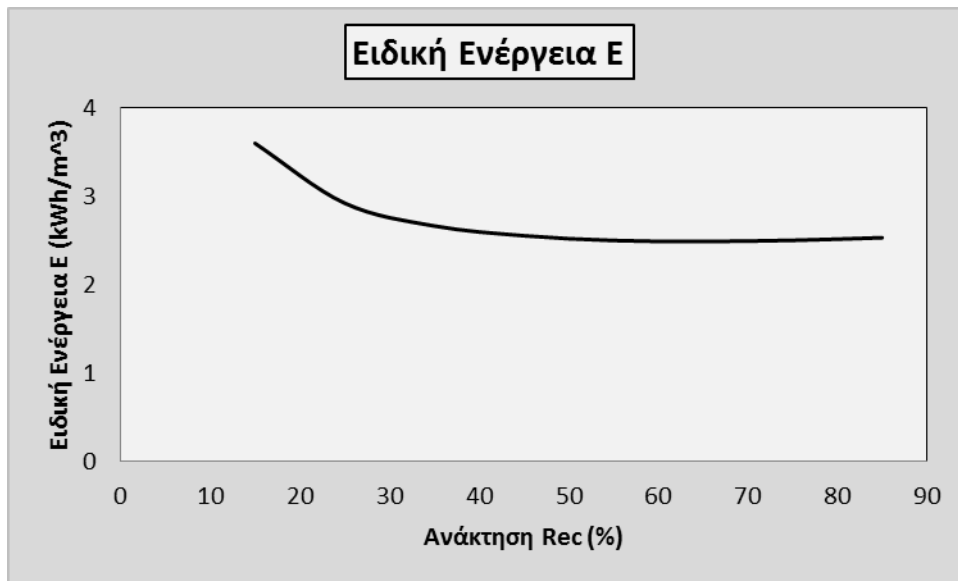
Οι συνθήκες αυτής της μοντελοποίησης είναι οι εξής: $J=14 \frac{L}{m^2 \cdot h}$, $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ και $\epsilon_{ERD}=85\%$.

Η πίεση τροφοδοσίας αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο βαθμός ανάκτησης, δείχνοντας ότι απαιτείται υψηλότερη πίεση για επιτευχθεί μεγαλύτερη ανάκτηση (Σχήμα 30(α)).



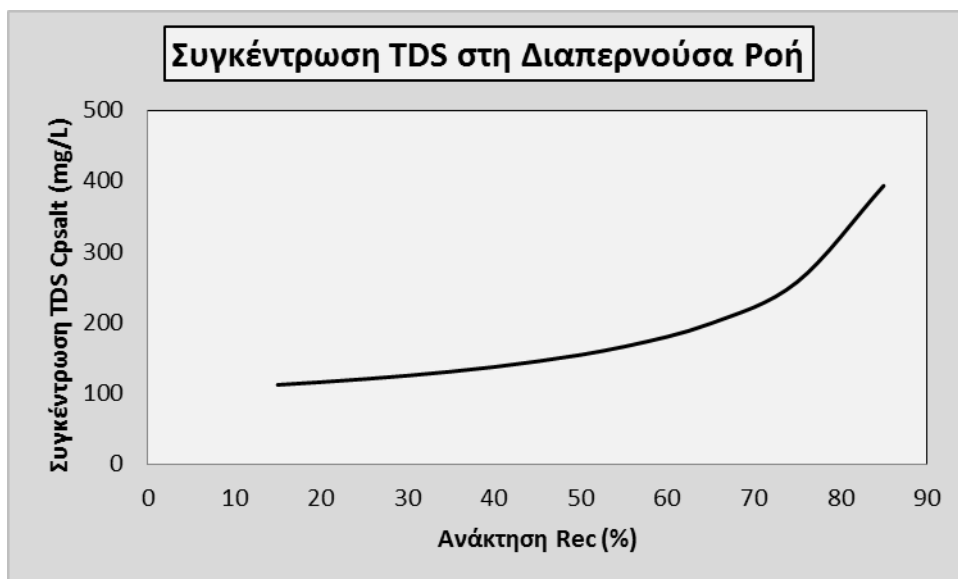
Σχήμα 30(α). Εξάρτηση της πίεσης τροφοδοσίας από την ανάκτηση.

Ωστόσο, η ειδική ενέργεια μειώνεται όταν ο βαθμός ανάκτησης αυξάνεται από 15% έως 50% και αυξάνεται όταν ο βαθμός ανάκτησης αυξάνεται για μία τιμή που βρίσκεται πάνω από το 50% (Σχήμα 30(β)). Αυτό συμβαίνει επειδή η ειδική ενέργεια εξαρτάται όχι μόνο από την πίεση τροφοδοσίας αλλά και από τον ρυθμό ροής (Εξίσωση 12.13). Όσο η ανάκτηση αυξάνεται η συνολική κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται για να αποκτηθεί υψηλή πίεση τροφοδοσίας, αλλά λιγότερο νερό μπορεί να συμπιεστεί για να παραχθεί η απαιτούμενη ποσότητα παραγόμενου νερού. Ως εκ τούτου, η ειδική ενέργεια, η οποία είναι η συνολική κατανάλωση ενέργειας διαιρούμενη από το ρυθμό της ροής τροφοδοσίας, έχει μια ελάχιστη τιμή σε ένα βέλτιστο βαθμό ανάκτησης. Κάτω από τις δεδομένες συνθήκες λειτουργίας, η ελάχιστη τιμή της ειδικής ενέργειας είναι $2,487 \text{ kWh/m}^3$ σε ανάκτηση $\text{Rec}=53\%$. Με άλλα λόγια, η τιμή αυτή είναι 2,3 φορές η οσμωτική πίεση ($1 \text{ kWh/m}^3 = 36 \text{ bar}$).

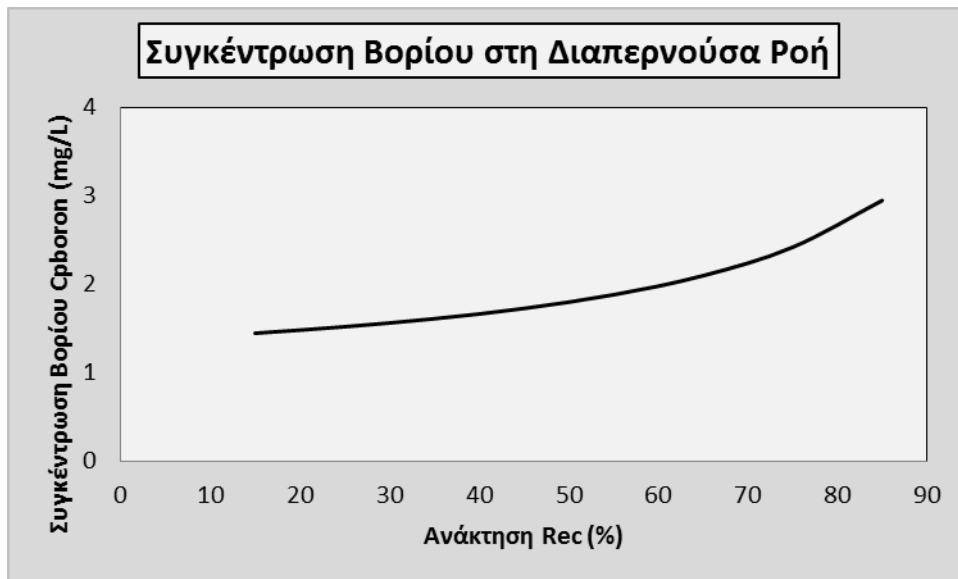


Σχήμα 30(β). Εξάρτηση της ειδικής ενέργειας από την ανάκτηση.

Στο Σχήμα 30(γ) και στο Σχήμα 30(δ) φαίνονται οι μεταβολές της συγκέντρωσης της διαπερνούσας ροής σε TDS και σε βόριο αντίστοιχα συναρτήσει του βαθμού ανάκτησης. Καθώς η συγκέντρωση άλμης είναι υψηλή σε υψηλή ανάκτηση, οι συγκεντρώσεις των διαλυμένων ουσιών στη διαπερνούσα ροή αυξάνονται με αύξηση του βαθμού ανάκτησης (Εξίσωση 12.6). Η συγκέντρωση του βορίου στο παραγόμενο προϊόν, η οποία είναι κρίσιμη για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού εξαιτίας της πιθανής επιβλαβούς επίδρασης του βορίου, διπλασιάζεται καθώς ο βαθμός ανάκτησης αυξάνεται απ το 15% στο 70%. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι ο βαθμός ανάκτησης θα πρέπει να είναι χαμηλότερος, κάτω από μία ασφαλής τιμή για τη διασφάλιση της υψηλής απόρριψης της διαλυμένης ουσίας.



Σχήμα 30(γ). Εξάρτηση της συγκέντρωσης TDS στη διαπερνούσα ροή από την ανάκτηση.



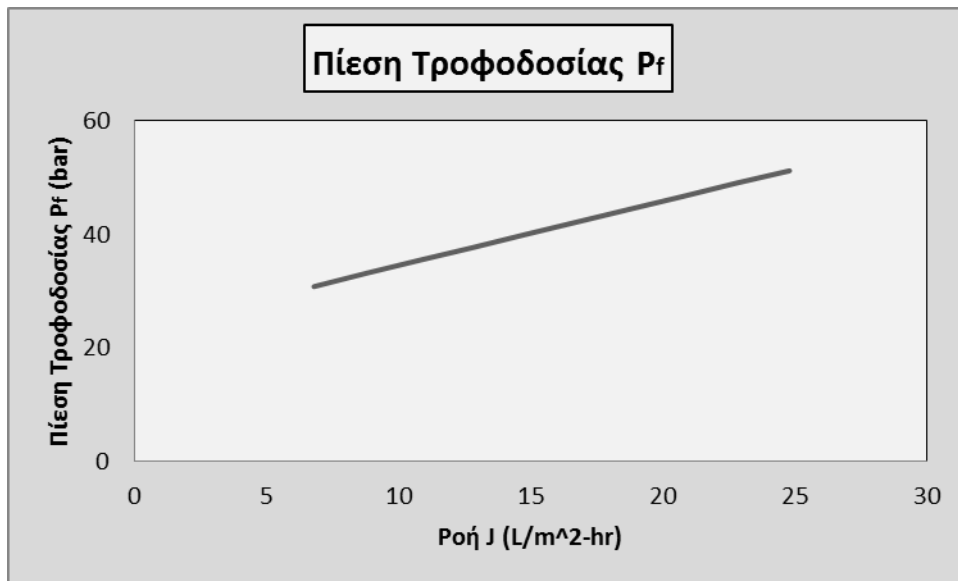
Σχήμα 30(δ). Εξάρτηση της συγκέντρωσης βορίου στη διαπερνούσα ροή από την ανάκτηση.

12.2.2. Επίδραση της ροής (J) στην απόδοση της RO.

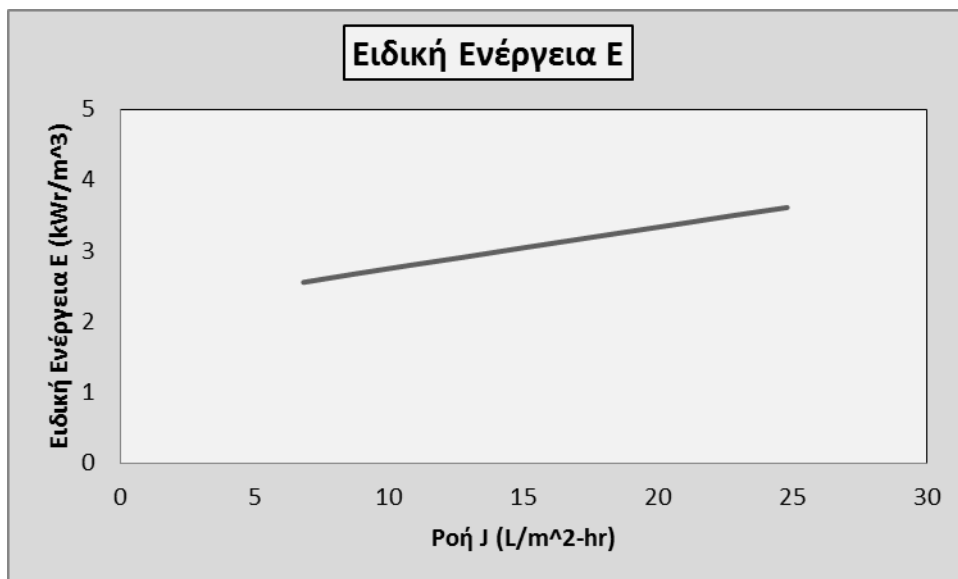
Μία άλλη σημαντική παράμετρος λειτουργίας είναι η ροή (J), η οποία διατηρήθηκε σταθερή στην προηγούμενη ανάλυση ενώ στην ανάλυση αυτή ο βαθμός ανάκτησης είναι αυτός που παραμένει σταθερός. Από τη στιγμή που η συνολική διαπερνούσα ροή διατηρείται σταθερή στα $1090 \text{ m}^3/\text{day}$, αύξηση της ροής (J) οδηγεί σε μείωση της συνολικής επιφάνειας των μεμβρανών. Για παράδειγμα, Η συνολική επιφάνεια μεμβρανών είναι 3177 m^2 σε ροή $J=14,3 \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ ενώ σε ροή $J=23,8 \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ Η συνολική επιφάνεια μεμβρανών είναι 1906 m^2 .

Οι συνθήκες αυτής της μοντελοποίησης είναι οι εξής: $Rec=40\%$, $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ και $\epsilon_{ERD}=85\%$.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 31(α) και στο Σχήμα 31(β), η πίεση τροφοδοσίας και η ειδική ενέργεια αυξάνονται με αύξηση της ροής εξαιτίας της απαίτησης για υψηλής πίεσης τροφοδοσία (Εξίσωση 12.1). Αυτό συνεπάγεται ότι χαμηλή ροή οδηγεί σε χαμηλή ειδική κατανάλωση ενέργειας.

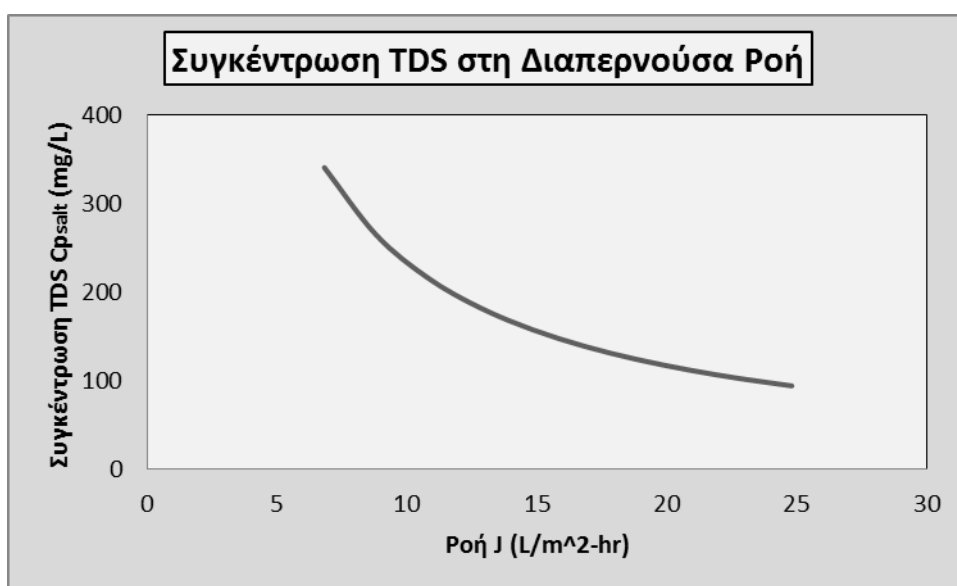


Σχήμα 31(α). Εξάρτηση της πίεσης τροφοδοσίας από τη ροή μέσω των μεμβρανών.

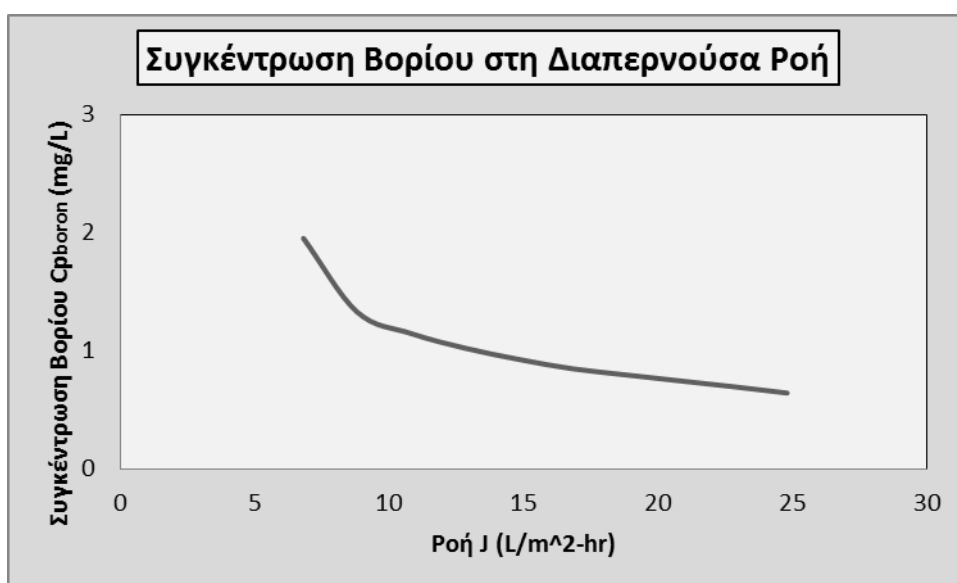


Σχήμα 31(β). Εξάρτηση της ειδικής ενέργειας από τη ροή μέσω των μεμβρανών.

Αν και οι ενεργειακές απαιτήσεις αυξάνονται με αύξηση της ροής, η απόρριψη των διαλυμένων ουσιών βελτιώνεται όσο μεγαλώνει η ροή. Τόσο η συγκέντρωση TDS όσο και η συγκέντρωση βορίου στη διαπερνούσα ροή μειώνεται περισσότερο από 50%, ως αποτέλεσμα της αύξησης της ροής από 7 σε $24 \frac{L}{m^2 \cdot h}$ (Σχήμα 31(γ),(δ)). Αυτό συμβαίνει επειδή η ροή της διαλυμένης ουσίας ($J_{s,i}$) είναι σχεδόν ανεξάρτητη από τη ροή του διαλύματος (J) για μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης με υψηλή απόρριψη. Επιλύοντας την Εξίσωση 12.6, η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στη διαπερνούσα ροή εκτιμάται από το λόγο $\frac{J_{s,i}}{J}$ και έτσι είναι αντιστρόφως ανάλογη του J . Επομένως, μία βέλτιστη τιμή της ροής φαίνεται να υπάρχει για την επίτευξη χαμηλής ειδικής ενέργειας και υψηλής απόρριψης της διαλυμένης ουσίας.



Σχήμα 31(γ). Εξάρτηση της συγκέντρωσης TDS στη διαπερνούσα ροή από τη διαμεμβρανική ροή.



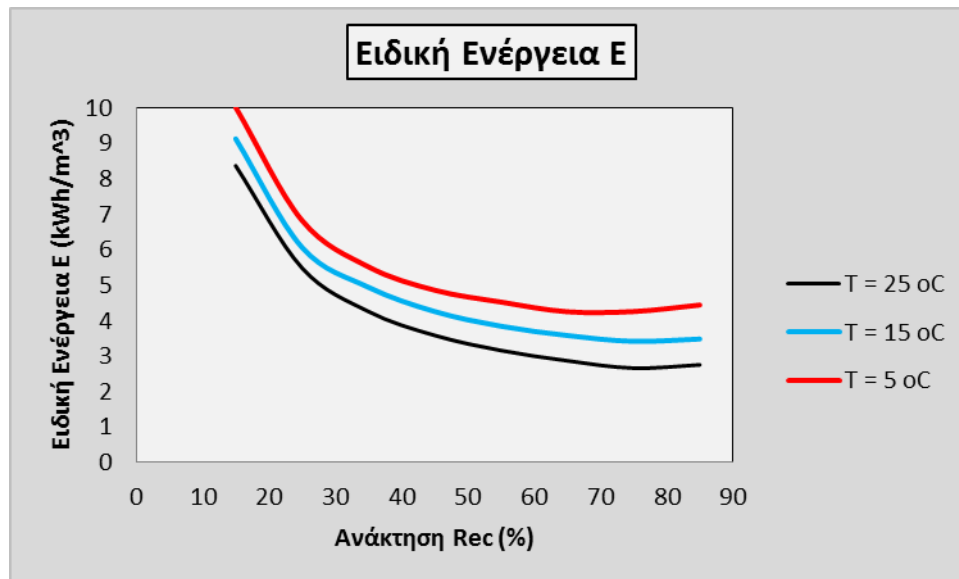
Σχήμα 31(δ). Εξάρτηση της συγκέντρωσης βορίου στη διαπερνούσα ροή από τη διαμεμβρανική ροή.

12.2.3. Επίδραση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας (T) στην απόδοση της RO.

Εκτός από την ανάκτηση και τη ροή, η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην απόδοση της διήθησης RO. Το Σχήμα 32(α) και το Σχήμα 32(β) απεικονίζουν πως η θερμοκρασίας επιδρά στην ειδική ενέργεια και τη συγκέντρωση βορίου στη διαπερνούσα ροή αντίστοιχα. Η θερμοκρασία κυμάνθηκε από 5 °C έως 25 °C.

Οι συνθήκες αυτής της μοντελοποίησης είναι οι εξής: $J=14 \frac{L}{m^2 \cdot h}$, $T=5, 15, 25 \text{ } ^\circ\text{C}$ και $\varepsilon_{ERD}=85\%$.

Η ειδική ενέργεια αυξάνεται με μείωση της θερμοκρασίας καθώς η σταθερά μεταφοράς διαλύματος (L_v) μειώνεται σε χαμηλή θερμοκρασία.

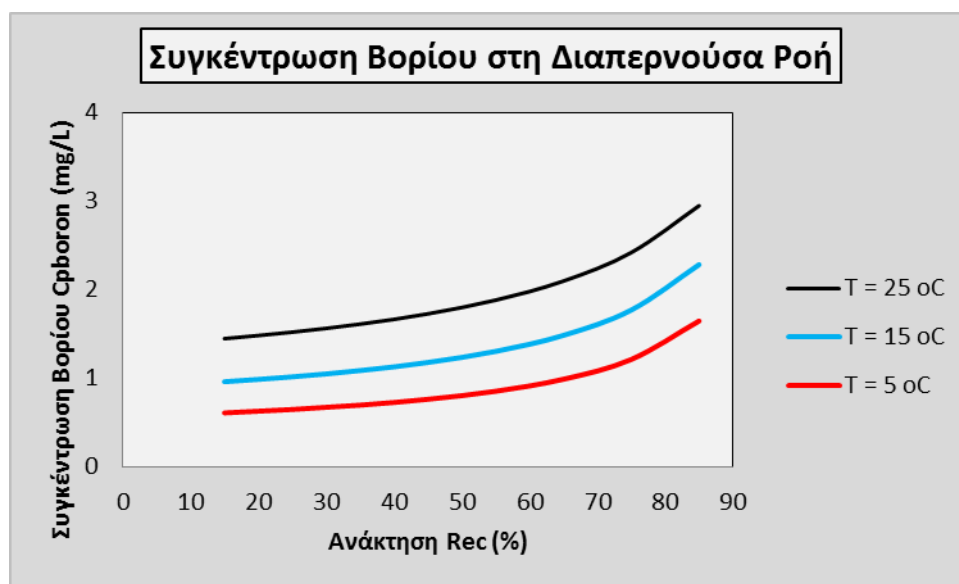


Σχήμα 32(α). Εξάρτηση της ειδικής ενέργειας από τη θερμοκρασία του τροφοδοτούμενου νερού.

Από την άλλη πλευρά, η συγκέντρωση βορίου στη διαπερνούσα ροή μειώνεται με μείωση της θερμοκρασίας, οδηγώντας σε υψηλότερη απόρριψη βορίου. Σημειώνεται ότι τόσο η σταθερά μεταφοράς διαλύματος (L_v) στην Εξίσωση 12.2 όσο και η σταθερά μεταφοράς της διαλυμένης ουσίας ($L_{s,i}$) στην Εξίσωση 12.7 αυξάνονται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Επιλύοντας την Εξίσωση 12.1 με την Εξίσωση 10.6, η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στη διαπερνούσα ροή δίνεται από τη σχέση:

$$C_{p,i} = \frac{\overline{c_{m,i}}}{\frac{L_v}{L_{s,i}}(P_f - P_{loss}) + 1} \quad (10.16)$$

Ως εκ τούτου, η εξάρτηση της απόρριψης της διαλυμένης ουσίας από τη θερμοκρασία καθορίζεται από το ποιο από τα L_v και $L_{s,i}$ εξαρτάται σε μεγαλύτερο βαθμό από τη θερμοκρασία. Οι υπολογισμοί του μοντέλου δείχνουν ότι η εξάρτηση του $L_{s,i}$ από τη θερμοκρασία υπερτερεί της εξάρτησης του L_v από τη θερμοκρασία.



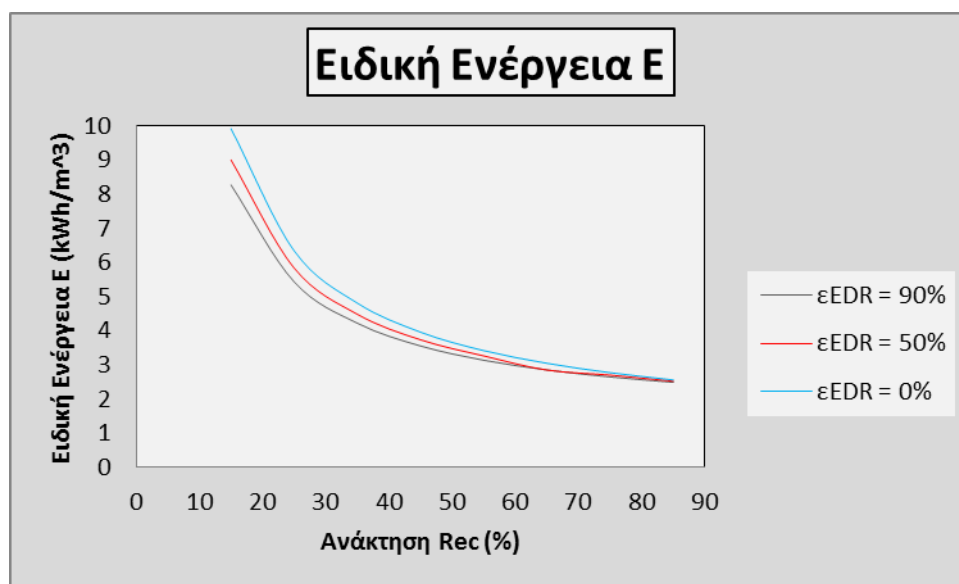
Σχήμα 32(β). Εξάρτηση της συγκέντρωσης βορίου στη διαπερνούσα ροή από τη θερμοκρασία του τροφοδοτούμενου νερού.

12.2.4. Επίδραση της απόδοσης ανάκτησης ενέργειας (ϵ_{ERD}) στην απόδοση της RO.

Εξαιτίας τη σχετικά υψηλής ενεργειακής απαίτησης, τα περισσότερα συστήματα αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού εξοπλίζονται με μία συσκευή ανάκτησης ενέργειας η οποία ανακτά ενέργεια από το συμπιεσμένο συμπύκνωμα RO το οποίο απορρίπτεται από το σύστημα. Έτσι, η απόδοση της συσκευής ανάκτησης ενέργειας (ϵ_{ERD}) είναι σημαντική στη κατανάλωση ενέργειας των συστημάτων αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού.

Οι συνθήκες της μοντελοποίησης που διεξήχθη για την μελέτη της επίδρασης του ϵ_{ERD} στην απόδοση της RO είναι οι εξής: $J=14 \frac{L}{m^2 \cdot h}$ και $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 33 η ειδική ενέργεια χωρίς τη παρουσία συσκευής ανάκτησης ενέργειας ($\epsilon_{ERD}=0\%$) μπορεί να συγκριθεί με την ειδική ενέργεια όταν υπάρχει συσκευή ανάκτησης ενέργειας. Η απόδοση της συσκευής ανάκτησης ενέργειας είναι λιγότερο σημαντική σε μία υψηλή τιμή του βαθμού ανάκτησης αφού η τιμή του ρυθμού ροής της άλμης (Q_b) είναι χαμηλή στην Εξίσωση 12.13.



Σχήμα 33. Εξάρτηση της ειδικής ενέργειας από την απόδοση ανάκτησης ενέργειας.

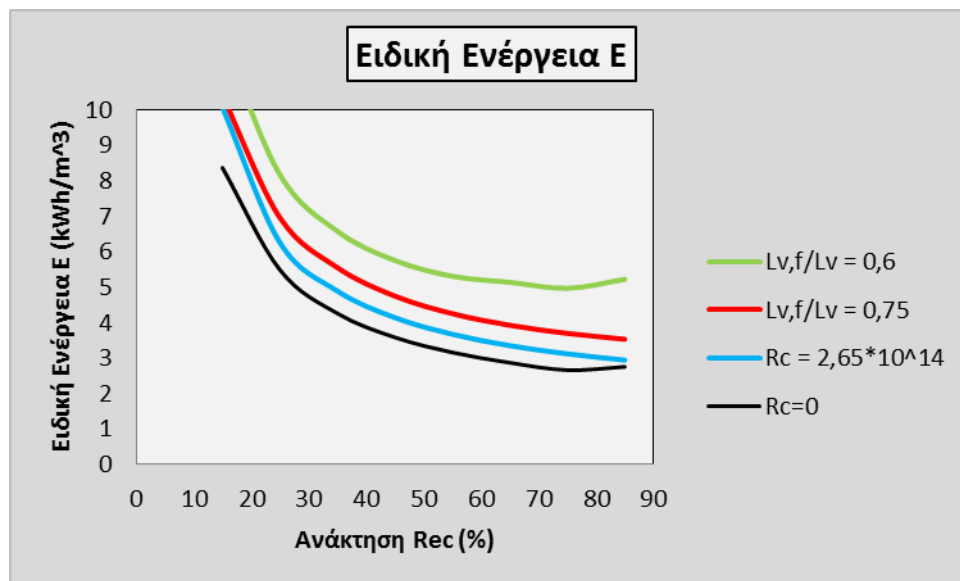
12.2.5. Επίδραση του μηχανισμού ρύπανσης στην απόδοση της RO.

Στην μοντελοποίηση που ακολουθεί επιχειρείται μία απλή προσέγγιση στην ενσωμάτωση της επίδρασης της ρύπανσης στην ειδική ενέργεια και την απόρριψη. Στην Εξίσωση 12.2, οι μηχανισμοί ρύπανσης σε ένα σύστημα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού χωρίζονται σε: α) σχηματισμός cake (cake formation) (R_c) και β) κλιμακωτό σχηματισμό (scale formation) (A_s/A_m). Η μόλυνση από την εναπόθεση σωματιδίων και κολλοειδών χαρακτηρίζεται ως σχηματισμός cake. Μόνο η επιφανειακή κρυσταλλοποίηση θεωρείται ως μηχανισμός κλιμακωτής ρύπανσης,

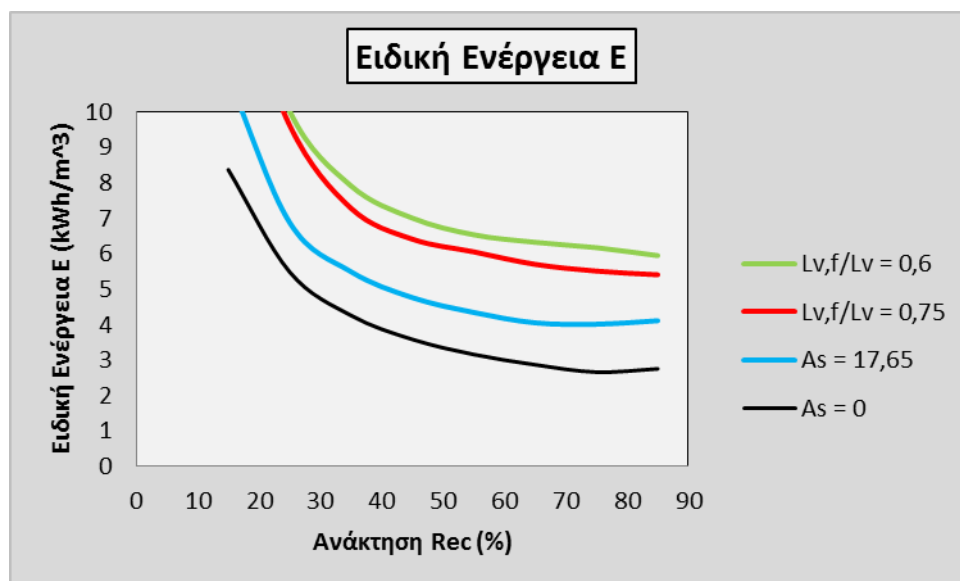
όπου η μείωση της ροής είναι αποτέλεσμα του αποκλεισμού της επιφάνειας της μεμβράνης από την πλευρική ανάπτυξη της αδιαπέραστης κλιμακωτής εναπόθεσης πάνω στη μεμβράνη.

Οι συνθήκες της μοντελοποίησης είναι οι εξής: $J=14 \frac{L}{m^2 \cdot h}$, $T=25 \text{ } ^\circ\text{C}$ και $\epsilon_{ERD}=85\%$.

Το Σχήμα 34(α) και Σχήμα 34(β) συγκρίνει την ειδική ενέργεια για δύο συστήματα RO με διαφορετικούς μηχανισμούς ρύπανσης. Η έκταση της ρύπανσης δόθηκε από το λόγο της σταθεράς μεταφοράς διαλύματος με και χωρίς ρύπανση ($L_{v,f}/L_v$). Καθώς εμφανίζεται η ρύπανση, η ειδική ενέργεια αυξάνεται εξαιτίας της απαίτησης υψηλής πίεσης τροφοδοσίας. Ανεξάρτητα από τον μηχανισμό ρύπανσης η μεταβολή της ειδικής ενέργειας είναι παρόμοια.

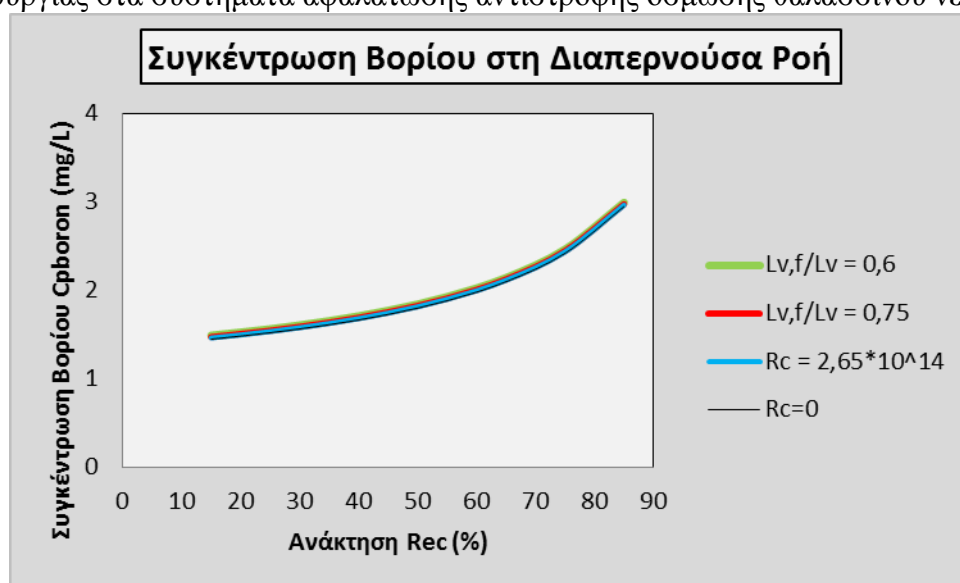


Σχήμα 34(α). Εξάρτηση της ειδικής ενέργειας από το μηχανισμό ρύπανσης cake formation.

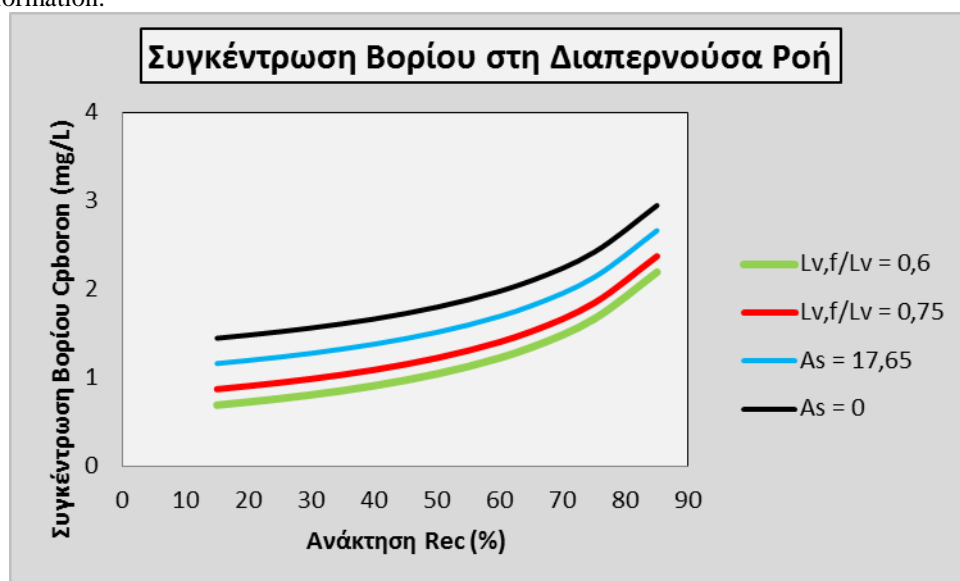


Σχήμα 34(β). Εξάρτηση της ειδικής ενέργειας από το μηχανισμό ρύπανσης scale formation.

Από την άλλη πλευρά, η απόρριψη βορίου είναι αρκετά διαφορετική, ακόμα και στο ίδιο L_{vf}/L_v , και εξαρτάται από το είδος του μηχανισμού ρύπανσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 34(γ) και το Σχήμα 34(δ), η συγκέντρωση βορίου στη διαπερνούσα ροή είναι σχεδόν σταθερή στη περίπτωση του σχηματισμού cake ενώ είναι αρκετά διαφορετική στην περίπτωση του κλιμακωτού σχεδιασμού. Αυτό συμβαίνει επειδή η τοπική ροή είναι αρκετά διαφορετική ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις. Καθώς εμφανίζεται ρύπανση στη μεμβράνη εξαιτίας του σχηματισμού cake, το L_{vf} μειώνεται αλλά η τοπική ροή εξαιτίας του κλιμακωτού σχηματισμού δεν αλλάζει. Απεναντίας, η ρύπανση της μεμβράνης εξαιτίας του κλιμακωτού σχηματισμού οδηγεί σε μείωση της ενεργούς επιφάνειας της μεμβράνης και η τοπική ροή στην επιφάνεια της μεμβράνης αυξάνεται. Από τη στιγμή που η απόρριψη της διαλυμένης ουσίας αυξάνεται με αύξηση της ροής (Σχήμα 31(γ),(δ)), η ρύπανση εξαιτίας του κλιμακωτού σχηματισμού μειώνει τη συγκέντρωση βορίου στο προϊόν. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι ο μηχανισμός ρύπανσης είναι επίσης σημαντικός για την εκτίμηση λειτουργίας στα συστήματα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού.



Σχήμα 34(γ). Εξάρτηση της συγκέντρωσης βορίου στη διαπερνούσα ροή από το μηχανισμό ρύπανσης cake formation.

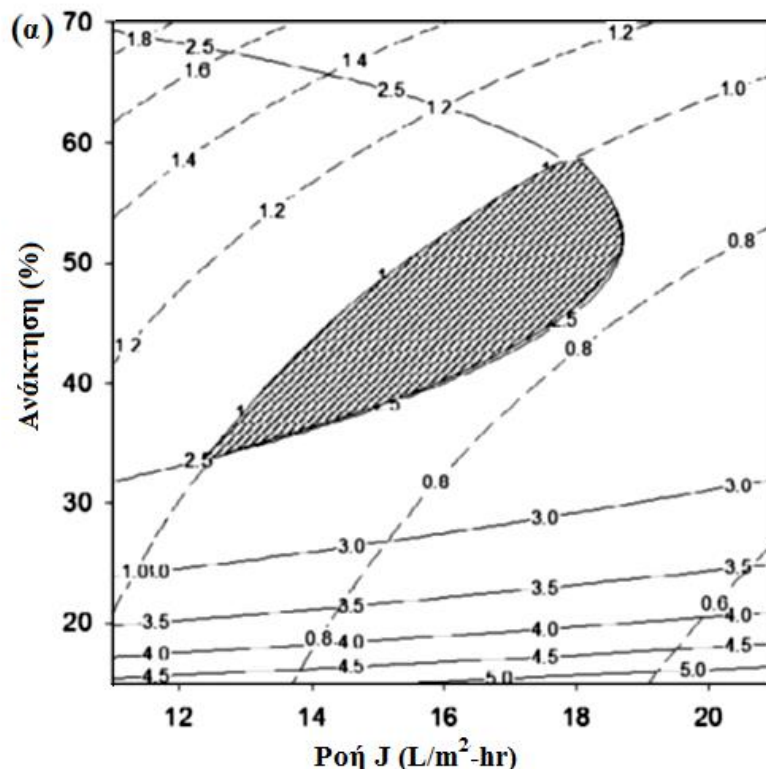


Σχήμα 34(δ). Εξάρτηση της συγκέντρωσης βορίου στη διαπερνούσα ροή από το μηχανισμό ρύπανσης scale formation.

12.2.6. Βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας για την ειδική ενέργεια και την απόρριψη βορίου.

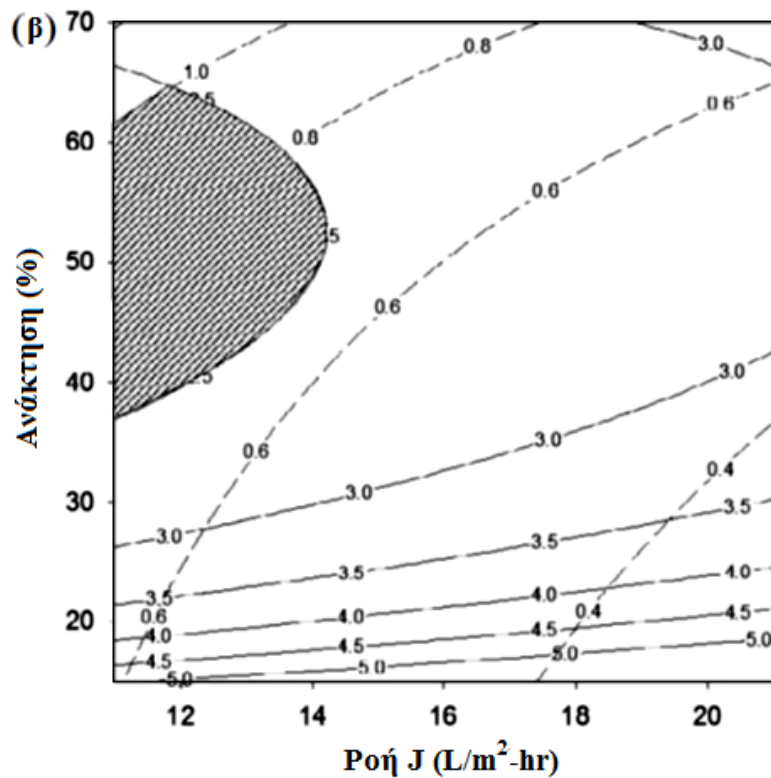
Το βόριο εμφανίζεται φυσικά και η παρουσιάζεται στο θαλασσινό νερό σε μία μέση συγκέντρωση 4,6 mg/L. Ωστόσο, αν η συγκέντρωση βορίου είναι πολύ υψηλή, το βόριο είναι επιβλαβές για την υγεία του ανθρώπου και την απόδοση των καλλιεργειών. Δυστυχώς, η διεργασία RO δεν είναι πολύ αποτελεσματική στην αφαίρεση βορίου και η απόρριψη βορίου από μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης έχει βρεθεί ότι είναι μικρότερη από 90%. Αυτό συνεπάγεται ότι οι συνθήκες λειτουργίας για την αντίστροφη όσμωση θα πρέπει να ελέγχονται προσεκτικά για τη μείωση του περάσματος βορίου σε μία μονάδα αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού ενός περάσματος. Ως εκ τούτου, τα συστήματα αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού πρέπει να βελτιστοποιούνται για τη διατήρηση χαμηλής συγκέντρωσης βορίου στη διαπερνούσα ροή καθώς επίσης και για τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Στο Σχήμα 35 παρουσιάζονται οι καμπύλες της ειδικής ενέργειας και του βορίου ως συνάρτηση της ροής και της ανάκτησης. Εδώ, υπάρχουν δύο καμπύλες που υπερκαλύπτονται ώστε να αποφασιστεί η βέλτιστη ροή και ο βέλτιστος βαθμός ανάκτησης για δοθείσα κατευθυντήρια γραμμή απόδοσης. Αν η ειδική ενέργεια και η συγκέντρωση βορίου πρέπει να είναι μικρότερη από 2,5 kWh/m³ και 1 mg/L, αντίστοιχα, η ροή και ο βαθμός ανάκτησης πρέπει να κυμαίνονται από 12,5 έως 19 $\frac{L}{m^2 \cdot h}$ και από 34 έως 58% αντίστοιχα. Η σκιασμένη περιοχή στο Σχήμα 35 (α) δείχνει το εύρος συνθηκών λειτουργίας για την εκπλήρωση της δοθείσας κατευθυντήριας γραμμής απόδοσης.



Σχήμα 35(α). Καμπύλες της ειδικής ενέργειας και της συγκέντρωσης βορίου στη διαπερνούσα ροή για διάφορες τιμές της ροής και του βαθμού ανάκτησης. T=25 °C, ε_{EDR}=85% [22].

Η μείωση της θερμοκρασίας από 25 °C έως 15 °C επιδρά σημαντικά στις συνθήκες λειτουργίας της ροής και του βαθμού ανάκτησης. Για τους παραπάνω περιορισμούς στην ειδική ενέργεια και τη συγκέντρωση βορίου και θερμοκρασία νερού τροφοδοσίας 15 °C, η ροή πρέπει να είναι μικρότερη από $14 \frac{L}{m^2 \cdot h}$ και η ανάκτηση πρέπει να είναι κάτω από 64%. Ως εκ τούτου, η σκιασμένη περιοχή στο Σχήμα 35(β) είναι αρκετά διαφορετική από το Σχήμα 35(α). Συνυπολογίζοντας τις εποχιακές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού σε πολλές χώρες, εκτός από αυτές της Μέσης Ανατολής, είναι εμφανές από αυτά τα αποτελέσματα ότι η θερμοκρασία είναι ένας σημαντικός συντελεστής επίδρασης στη βελτιστοποίηση των συστημάτων αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού.



Σχήμα 35(β). Καμπύλες της ειδικής ενέργειας και της συγκέντρωσης βορίου στη διαπερνούσα ροή για διάφορες τιμές της ροής και του βαθμού ανάκτησης. T=15 °C, $\epsilon_{EDR}=85\%$ [22].

12.3. Συμπεράσματα.

Σε αυτή τη μελέτη εξετάστηκαν θεωρητικά τα συστήματα αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού χρησιμοποιώντας ένα απλό μοντέλο βασισμένο στη θεωρία διάλυσης-διάχυσης και σε πολλαπλούς μηχανισμούς ρύπανσης. Από αυτή την εργασία μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η ανάκτηση πρέπει να βελτιστοποιείται για να επιτευχθεί χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και με ταυτόχρονη υψηλή απόρριψη διαλυμένων ουσιών. Σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς, η ελάχιστη ειδική ενέργεια για μία μονάδα αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού με χωρητικότητα $1090 \text{ m}^3/\text{day}$ είναι $2,487 \text{ kWh/m}^3$ σε $\text{Rec}=51\%$, $J=14 \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ και $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Η υψηλότερη ροή βελτιώνει την απόρριψη των διαλυμένων ουσιών αλλά αυξάνει την ειδική ενέργεια κατανάλωσης. Αυξάνοντας τη θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας μειώνεται η ειδική ενέργεια αλλά επιδεινώνεται η απόρριψη διαλυμένων ουσιών. Ο συντελεστής απόδοσης της συσκευής ανάκτησης ενέργειας είναι μια σημαντική παράμετρος επίδρασης στην ειδική ενέργεια κατανάλωσης, ειδικά σε χαμηλό βαθμό ανάκτησης.
- Χρησιμοποιώντας το παραπάνω μοντέλο, η βέλτιστη ανάκτηση και ροή μπορούν να αποφασιστούν για μία δεδομένη συνθήκη της ειδικής ενέργειας και της συγκέντρωσης βορίου στη διαπερνούσα ροή. Η θερμοκρασία επίσης είναι μία σημαντική παράμετρος που επιδρά στην βελτιστοποίηση των συστημάτων αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού.
- Με βάση τον μηχανισμό ρύπανσης, η απόρριψη άλατος μπορεί να είναι διαφορετική, ακόμη και για το ίδιο επίπεδο ρύπανσης.
- Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε τύπο μεμβράνης RO με μικρές προσαρμογές στις παραμέτρους του μοντέλου και στους συντελεστές μεταφοράς του νερού και του άλατος.

13. Μετεπεξεργασία διαπερνούσας ροής RO.

13.1. Αντίστροφη όσμωση θαλασσινού νερού.

Το προϊόν διαπέρασης από την RO θαλασσινού νερού συνήθως επεξεργάζεται πριν από τη διανομή του. Ανάλογα με το διαπερνούν TDS, το διήθημα μπορεί να αναμιχθεί με άλλο νερό είτε για να αυξήσει είτε για να μειώσει την αλατότητα του. Ασβέστης ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ή εκχυλιστές ασβεστόλιθου μπορούν να προστεθούν για να αυξηθεί η σκληρότητα, η αλκαλικότητα και το pH, καθώς και για προστατέψουν το νερό από την προκαλούμενη έκλυση ασβεστίου από τους σωλήνες του συστήματος διανομής. Η σκληρότητα είναι απαραίτητη για να επιτευχθεί η τυπική γεύση του πόσιμου ύδατος και για την πρόληψη της διάβρωσης, ενώ η αλκαλικότητα είναι το πρωταρχικό ρυθμιστικό σύστημα όλων των φυσικών υδάτων. Η αλκαλικότητα (ανθρακική και όξινη ανθρακική) βοηθά στην σταθεροποίηση του pH του νερού κατά τη διάρκεια της διανομής και της χρήσης. Εάν δεν απαιτείται πρόσθετη σκληρότητα ή αλκαλικότητα, μια άλλη βάση, όπως καυστική σόδα (NaOH), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη ρύθμιση του pH. Το διήθημα επίσης απολυμαίνεται συνήθως μέσω της χρήσης χλωρίου, υποχλωριώδους νατρίου, ή χλωραμινών. Η μετεπεξεργασία της διαπερνούσας ροής μπορεί επίσης να περιλαμβάνει αντικατάσταση των φθοριούχων.

13.2. Αντίστροφη όσμωση υφάλμυρου νερού.

Ομοίως με την RO θαλασσινού νερού, η διαπερνούσα ροή της RO υφάλμυρου νερού έχει εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα ασβεστίου και όξινων ανθρακικών (αλκαλικότητα), και αυτά τα δύο συστατικά πρέπει να αναπληρώνονται πριν από τη διανομή. Στα συστήματα RO υφάλμυρου νερού, ένα τμήμα του νερού τροφοδοσίας RO συχνά αναμιγνύεται με τη διαπερνούσα ροή της RO για να αποκαταστήσει τη σκληρότητα και την αλκαλικότητα, ενώ και καυστική σόδα χρησιμοποιείται για την ρύθμιση του pH. Εάν η ανάμειξη των υδάτων δεν είναι δυνατή, συνήθως λόγω της χαμηλότερης ποιότητας του νερού τροφοδοσίας, χρησιμοποιείται η προσθήκη ασβέστη ή η χρήση εκχυλιστών ασβεστόλιθου. Όπως και με τη διαπερνούσα ροή της RO θαλασσινού νερού, η διαπερνούσα ροή της RO υφάλμυρου νερού απολυμαίνεται πριν από τη διανομή.

14. Διάθεση συμπυκνώματος RO.

14.1. RO θαλασσινού νερού.

Για τις μονάδες RO θαλασσινού νερού, η μέθοδος διάθεσης είναι συνήθως η απόρριψη πίσω στο ίδιο το κύριο σώμα του νερού. Οι κύριες ανησυχίες είναι μόνο το σύστημα άντλησης και το μήκος των σωληνώσεων που απαιτείται για να φτάσει το συμπύκνωμα στο επιλεγμένο υποβρύχιο σημείο απόρριψης. Η πρόσληψη του νερού τροφοδοσίας και η απόρριψη του συμπυκνώματος είναι τοποθετημένα σε ξεχωριστές θέσεις και το συμπύκνωμα αραιώνεται στο μεγάλο όγκο του θαλασσινού νερού χωρίς να επηρεάζει τη σύνθεση του νερού τροφοδοσίας.

14.2. RO υφάλμυρου νερού.

Εάν είναι εφικτή, η επιφανειακή διάθεση του νερού είναι η μέθοδος διάθεσης που επιλέγεται για τις μονάδες RO υφάλμυρου νερού λόγω του υψηλότερου κόστους των άλλων επιλογών. Ωστόσο, η επιφανειακή απόρριψη του νερού συχνά περιορίζεται για τις παράκτιες εγκαταστάσεις RO. Από την άλλη μεριά, η μεγάλη ποσότητα των σωληνώσεων που απαιτείται για τη μεταφορά του συμπυκνώματος από μία μονάδα, που βρίσκεται στην ενδοχώρα, στη θάλασσα είναι οικονομικά απαγορευτική. Μερικές μονάδες RO υφάλμυρου νερού της ενδοχώρας απορρίπτουν το συμπύκνωμα σε τοπικές λίμνες και ποτάμια. Σε αντίθεση με την απόρριψη σε θαλασσινό νερό, το συμπύκνωμα RO υφάλμυρου νερού, εάν απορριφθεί σε επιφανειακά ύδατα, μπορεί να αλλάξει την αλατότητα των υδάτων υποδοχής. Η αλλαγή στην αλατότητα μπορεί να αλλάξει τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό και να επηρεάσει αρνητικά την υδρόβια ζωή. Το τυπικό όριο για την απόρριψη σε επιφανειακά ύδατα είναι μια διαφορά στην αλατότητα μικρότερη από 10%.

Εάν η τροφοδοσία σε μια μονάδα RO υφάλμυρο νερό είναι τα υπόγεια ύδατα, η μονάδα πρέπει να επεξεργάζεται το συμπύκνωμα RO πριν από τη διάθεση. Η επεξεργασία-θεραπεία είναι ιδιαίτερα σημαντική αν το συμπύκνωμα απορρίπτεται σε επιφανειακά ύδατα. Τα υπόγεια ύδατα μπορούν να έχουν υψηλές συγκεντρώσεις αερίων, όπως το διοξείδιο του άνθρακα, η αμμωνία και το υδρόθειο, μερικά από τα οποία είναι τοξικά για υδρόβια ζώα. Η θεραπεία του συμπυκνώματος μπορεί να περιλαμβάνει ρύθμιση του pH, χλωρίωση, αποχλωρίωση, απαέρωση, και αερισμό. Τα υψηλά επίπεδα φθορίου και ασβεστίου στο συμπύκνωμα RO έχουν επίσης δειχθεί ότι είναι τοξικά για ορισμένους δοκιμασμένους οργανισμούς, αν και η θεραπεία του συμπυκνώματος δεν απομακρύνει συνήθως αυτές τις προσμείξεις.

Με την αυξανόμενη ανάγκη για την αφαλάτωση υφάλμυρου νερού στην ενδοχώρα, πρέπει να χρησιμοποιούνται άλλες επιλογές διάθεσης και, μέχρι στιγμής, έχει τεθεί σε εφαρμογή ένα ευρύ φάσμα μεθόδων. Κάθε μέθοδος έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, που συχνά αντιπροσωπεύουν ένα συμβιβασμό μεταξύ του κόστους, των τοπικών διαθέσιμων πόρων, των περιβαλλοντικές επιπτώσεων και της τεχνολογίας.

Η μέθοδος διάθεσης του συμπυκνώματος που επιλέγεται πιο συχνά, μετά τη μέθοδο απόρριψης σε επιφανειακά ύδατα, είναι η χρήση ενός συνδυαστικού αποχετευτικού δικτύου. Ένα συνδυασμένο αποχετευτικό δίκτυο μεταφέρει το συμπύκνωμα και άλλα υγρά απόβλητα σε μια τοπική εγκατάσταση επεξεργασίας αστικών λυμάτων, όπου ο συνδυασμός των δύο υδάτων επεξεργάζεται ένα μέρος του άλατος από τη ροή του

συμπυκνώματος γίνεται μέρος της λύσης (αφυδατωμένο στερεό προϊόν αποβλήτων από την εγκατάσταση επεξεργασίας υγρών αποβλήτων), ενώ το υπόλοιπο παραμένει διαλυμένο και γίνεται μέρος των υγρών αποβλήτων της μονάδας. Η υψηλή περιεκτικότητα σε αλάτι μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τις βιολογικές διαδικασίες επεξεργασίας και να προκαλέσει παραβιάσεις της επιτρεπόμενης απόρριψης. Οι τοπικοί κανονισμοί, το μέγεθος της μονάδας αφαλάτωσης και τη διαθεσιμότητα μιας κοντινής μονάδας επεξεργασίας λυμάτων συχνά υπαγορεύουν την εφικτότητα αυτής της επιλογής διάθεσης του συμπυκνώματος. Αν η ροή του συμπυκνώματος είναι πολύ μεγάλη ή πολύ αλατούχα, η μονάδα αφαλάτωσης μπορεί να μην είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει διάθεση μέσω του συνδυαστικού αποχετευτικού δικτύου.

Οι μονάδες αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού που βρίσκονται κοντά σε περιοχές με άφθονο πράσινο (πάρκα, γήπεδα γκολφ) ή γεωργικές εκτάσεις μπορούν ενίοτε να χρησιμοποιούν το συμπύκνωμα RO ως νερό άρδευσης. Παρά το γεγονός ότι αυτή η επιλογή διάθεσης είναι επωφελής για τη μονάδα αφαλάτωσης, καθώς το απορριπτόμενο συμπύκνωμα γίνεται ένα χρήσιμο προϊόν, η άρδευση από το συμπύκνωμα μπορεί να προκαλέσει διάφορα προβλήματα. Η χρήση υφάλμυρου νερού για την άρδευση καλλιεργειών προσθέτει αλάτι στο έδαφος και στα τοπικά υπόγεια υδροφόρα στρώματα. Η συσσώρευση άλατος στο έδαφος μπορεί να επηρεάσει τη μελλοντική ανάπτυξη των καλλιεργειών, ενώ η αλατότητα των υπόγειων υδάτων αυξάνεται σιγά-σιγά με την πάροδο του χρόνου. Επιπλέον, οι υψηλές συγκεντρώσεις βορίου στο νερό άρδευσης μπορεί να προκαλέσουν βλάβη των μονάδων. Ενώ είναι μια χρήσιμη λύση διάθεσης του συμπυκνώματος, η εφαρμογή άρδευσης τελικά δημιουργεί την ανάγκη για περισσότερη αφαλάτωση σε περιοχές που κάποτε είχαν καθαρούς υπόγειους υδάτινους πόρους.

Οι λίμνες εξάτμισης συχνά θεωρούνται ως η βασική, συμβατική επιλογή διαχείρισης του συμπυκνώματος και ήταν αρχικά σχετικά ανέξοδη στη κατασκευή όταν υπάρχει σαν δεδομένο ο επαρκής χώρος. Ωστόσο, σήμερα, έχουν τεθεί σε εφαρμογή κανονισμοί για την προστασία του τοπικού εδάφους και των υπόγειων υδάτων από άλατα και άλλες πιθανές χημικές ουσίες που μπορούν να καταλήξουν στο έδαφος από λίμνες εξάτμισης. Οι λίμνες εξάτμισης έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως στη Μέση Ανατολή και την Αυστραλία, ενώ μικρή χρήση τους εμφανίζεται και στις ΗΠΑ (Τέξας). Έρευνες στη Μέση Ανατολή (Ομάν, Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, Ισραήλ) κατέδειξαν την ανάγκη για παρακολούθηση των διαρροών της λίμνης και για τη βελτίωση των στρατηγικών εξάτμισης. Στις ΗΠΑ, το κλίμα και το έδαφος που διατίθενται στο Τέξας επέτρεψε αυτό το είδος της διάθεσης να είναι μια βιώσιμη επιλογή. Σε αντίθεση με το Τέξας, άλλες πολιτείες στις ΗΠΑ που εξετάζουν την αντίστροφη όσμωση υφάλμυρου νερού (Καλιφόρνια, Φλόριντα, πολιτείες ανατολικής ακτής) δεν έχουν το κλίμα ή/και τις εκτάσεις που είναι απαραίτητες για την κατασκευή λιμνών εξάτμισης. Τόσο η άρδευση όσο και οι λίμνες εξάτμισης είναι μέθοδοι διάθεσης του συμπυκνώματος που χρησιμοποιούνται συνήθως για μονάδες RO μικρού μεγέθους (<400 m³/day).



Εικόνα 2. Λίμνες εξάτμισης άλατος, San Francisco Bay [24].

Η έγχυση σε υπόγειους-στεγανούς γεωλογικούς σχηματισμούς μέσω πηγαδιού-γεώτρησης (deep well injection), όπου το συμπύκνωμα εγχέεται σε αρκετές εκατοντάδες έως μερικές χιλιάδες μέτρα μέσα στο έδαφος κάτω από τα υδροφόρων στρώματα φρέσκου νερού, είναι μια άλλη επιλογή διάθεσης του συμπυκνώματος. Αυτή η επιλογή διάθεσης εφαρμόζεται παγκοσμίως για όλους τους τύπους των υγρών αποβλήτων και είναι συχνά η πιο οικονομική λύση για εγκαταστάσεις της ενδοχώρας. Αυτή η μέθοδος διάθεσης έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στη Φλόριντα για τη διάθεση του συμπυκνώματος. Μία μονάδα, που ξεκίνησε πρόσφατα (2007), στο Ελ Πάσο του Τέξας επέλεξε αυτό το τύπο διάθεσης αλλά η μέθοδος παραμένει αμφιλεγόμενη. Οι επιπλοκές περιλαμβάνουν τη κατάλληλη επιλογή της τοποθεσίας, την έκθεση του συμπυκνώματος σε χημικά, διάβρωση και διαρροές από το πηγάδι, πιθανές αρνητικές επιπτώσεις από σεισμική δραστηριότητα, την άγνωστη διάρκεια ζωής του πηγαδιού καθώς και τη καθίζηση δυσδιάλυτων αλάτων. Η διαδικασία δεν έχει χρησιμοποιηθεί αρκετό καιρό για να ξέρουμε αν το εγχυόμενο άλας τελικά φτάνει καταλήξουν στα υδροφόρα στρώματα φρέσκου νερού που βρίσκονται από πάνω. Ωστόσο, εάν ήταν κατάλληλος ο σχεδιασμός τους και η χρήση τους γινόταν για μεγάλο χρονικό διάστημα, τα πηγάδια έγχυσης θα μπορούσαν να είναι η λιγότερο δαπανηρή επιλογή διάθεσης συμπυκνώματος για τις μεγάλες μονάδες αφαλάτωσης της ενδοχώρας.

Για μία μονάδα RO υφάλμυρου νερού, όλες οι επιλογές διάθεσης αντιπροσωπεύουν απώλεια νερού και πρόσθετο κόστος στη μονάδα. Εκτός από όλες τις επιμέρους αρνητικές πτυχές της κάθε επιλογή απόρριψης που περιγράφονται, η καθεμία είναι δαπανηρή από πλευράς ανάκτησης νερού: όλο το νερό στο συμπύκνωμα χάνεται κατά τη διάρκεια της μεθόδου διάθεσης. Είτε με εξάτμιση, απόρριψη λυμάτων, εναλλακτική χρήση, ή ένεση, το νερό στο συμπύκνωμα δεν ανακτάται ως πόσιμο νερό. Επιπλέον, οι περισσότερες από τις συμβατικές μεθόδους διάθεσης, εκτός από την έγχυση μέσω πηγαδιού, δεν είναι εφαρμόσιμες για τις μεγάλες μονάδες αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού RO που βρίσκονται στην ενδοχώρα.

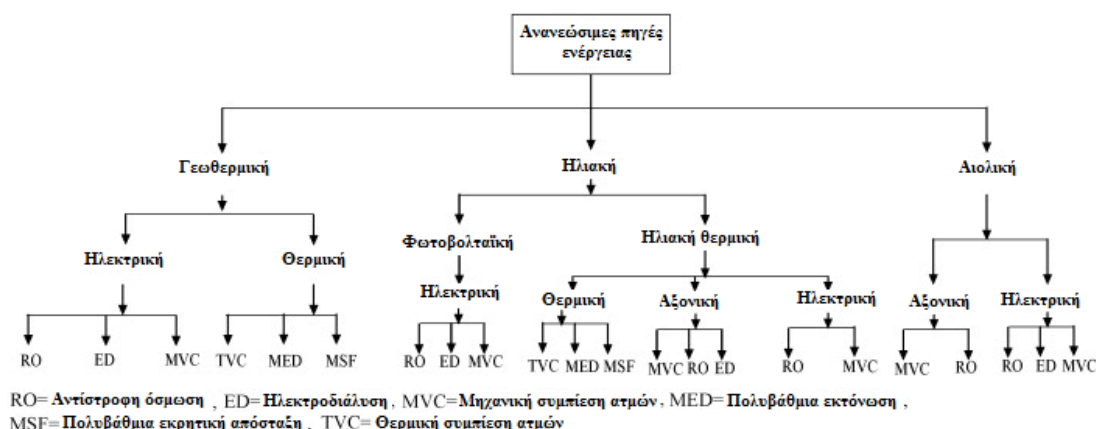
Το απόλυτο επίτευγμα στον τομέα της διάθεσης συμπυκνώματος και στην ανάκτηση RO είναι να λειτουργήσει ένα σύστημα με μηδενική απόρριψη υγρών ή αλλιώς ZLD (Zero Liquid Discharge), όπου η ανάκτηση θα πλησιάσει το 100%. Στην ZLD, το περισσότερο νερό στο συμπύκνωμα ανακτάται ως προϊόν έχοντας διαχωριστεί εντελώς το αλάτι από το νερό. Τα συστήματα ZLD περιλαμβάνουν θερμική εξάτμιση, κρυσταλλοποιητές, συμπυκνωτές άλμης, και ψεκαστικούς στεγνωτήρες. Ένα ZLD σύστημα σε συνδυασμό με ένα σύστημα RO υφάλμυρου νερού υψηλής ανάκτησης μπορεί να παράγει διαπερνούσα ροή με τόσο χαμηλό TDS όπως 10 mg/L. Τα συστήματα ZLD μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιοδήποτε γεωγραφική περιοχή και συχνά είναι εύκολα αποδεκτά από τις τοπικές κοινωνίες λόγω των θετικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την ελάχιστη παραγωγή αποβλήτων. Ενώ τα συστήματα αυτά είναι τεχνολογικά διαθέσιμα, το κόστος κεφαλαίου ενός τέτοιου συστήματος είναι συχνά από μόνο του υψηλότερο από το κόστος της εγκατάστασης αφαλάτωσης. Επιπλέον, η ενέργεια που απαιτείται για να επιτευχθεί μία ανάκτηση κοντά στο 100% σε ένα σύστημα ZLD είναι υψηλή και συχνά δεν είναι οικονομικά ή εκτός από πολύ μικρά συστήματα RO. Κάπως χαμηλότερο κόστος μπορεί να επιτευχθεί με ένα συνδυασμό ενός συστήματος συμπυκνωτή άλμης με μια λίμνη εξάτμισης, αλλά πιο συχνά αυτή η μέθοδος διαθέσεως συμπυκνώματος είναι η πιο δαπανηρή επιλογή. Σήμερα, οι προσπάθειες για να μειωθεί το κόστος της τεχνολογίας ZLD συνεχίζονται. Πιλοτικής κλίμακας δοκιμές έχουν δείξει ότι οι ZLD διεργασίες μπορούν να εφαρμοστούν σε μια ποικιλία συνθέσεων νερού και κοινοτικών αναγκών.

Μια μη-θερμική επεξεργασία η οποία προσεγγίζει τη ZLD είναι ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis, ED) ή η αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis Reversal, EDR). Οι ED και EDR χρησιμοποιούν μεμβράνες ανταλλαγής ιόντων και ηλεκτρικό ρεύμα για το διαχωρισμό ιόντων από το νερό για να δημιουργηθεί μία διαπερνούσα ροή και μία ροή συμπυκνώματος. Οι ED και EDR έχουν χαμηλότερη απόρριψη άλατος από τις μεμβράνες RO (έως 60% TDS μείωση ανά στάδιο), αλλά μπορούν να επιτύχουν ανακτήσεις έως 94% με ένα στάδιο και 97% με πολλαπλά στάδια. Η EDR είναι η κύρια τεχνολογία που χρησιμοποιείται σήμερα το ηλεκτρικό πεδίο εντός των μεμβρανών εναλλάσσεται, μειώνοντας τη κλιμάκωση της μεμβράνης. Ενώ η EDR μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλότερες ανακτήσεις από την RO, έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των μεμβρανών, και απαιτεί λιγότερη προ-και μετά-κατεργασία, το υψηλότερο κόστος κεφαλαίου και ενέργειας έχουν περιορίσει την επέκταση της EDR. Η RO παραμένει η κύρια επιλογή για αφαλάτωση μέσω μεμβρανών, ενώ η EDR κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται για την αφαίρεση της σκληρότητας από χαμηλής αλατότητας υφάλμυρα ύδατα, ειδικές βιομηχανικές εφαρμογές και ως υβριδική διεργασία με την RO.

15. Εναλλακτικές πηγές ενέργειας στην αντίστροφη όσμωση.

Η σύζευξη των εναλλακτικών (ανανεώσιμων) πηγών ενέργειας με μονάδες αφαλάτωσης RO έχει αυξήσει το ενδιαφέρον και την ανάπτυξη της RO. Οι εν λειτουργία μονάδες είναι μικρής κλίμακας ($<10 \text{ m}^3/\text{day}$) και αντιπροσωπεύουν περίπου το 0,02% της συνολικής παραγωγικής ικανότητας αφαλάτωσης στον κόσμο. Αυτές οι μονάδες είναι σε μεγάλο βαθμό μονάδες επίδειξης έρευνας και συνήθως δεν λειτουργούν συνεχώς. Επιπλέον, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εξακολουθούν να είναι πιο ακριβές από τα παραδοσιακές πηγές ενέργειας. Ως εκ τούτου, το μοναδιαίο κόστος λειτουργίας για μία μονάδα RO που συνδυάζεται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι υψηλότερο από ότι για μία τυπική μονάδα RO. Οι κοινότητες που τυπικά θα μπορούσαν να επωφεληθούν από τον συνδυασμό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με συστήματα RO βρίσκονται σε αγροτικές περιοχές, όπου οι οικονομικοί πόροι και το προσωπικό συντήρησης των συστημάτων είναι περιορισμένα. Παράγοντες όπως το κόστος κεφαλαίου, η αιεφόρος τεχνολογική πρόοδος, η τεχνική λειτουργία, η κοινωνική αποδοχή και η διαθεσιμότητα ενεργειακών πόρων, συνέβαλαν στην αργή ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην αγορά της RO.

Οι τρεις κυριότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που διατίθεται είναι η ηλιακή (φωτοβολταϊκή και θερμική), η αιολική και η γεωθερμική ενέργεια. Οι θερμικές πηγές ενέργειας πιο συχνά χρησιμοποιούνται σε αφαλάτωση απόσταξης, ενώ η αιολική και η φωτοβολταϊκή ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με αφαλάτωση RO. Ο συνδυασμός των επιλογών της ενέργειας και της διεργασίας γίνεται με βάση το ταίριασμα του τύπου της ενέργειας με το είδος της διεργασίας (θερμικής έναντι μηχανικής). Αυτά τα συστήματα RO μπορούν να χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό ή υφάλμυρο νερό ως πηγή τροφοδοσίας και είναι συνήθως μικρές και μεσαίες εγκαταστάσεις. Γενικά, η πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται πιο συχνά είναι η ηλιακή ενέργεια (70% της αγοράς), και η αντίστροφη όσμωση, έχει την πλειοψηφία (62%) στην αγορά αφαλάτωσης με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στο Σχήμα 36 παρουσιάζονται οι συνδυασμοί των τεχνολογιών των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και των μεθόδων αφαλάτωσης.



Σχήμα 36. Συνδυασμοί τεχνολογιών ΑΠΕ και μεθόδων αφαλάτωσης [25].

15.1. Εναλλακτικές πηγές ενέργειας στην αντίστροφη όσμωση θαλασσινού νερού.

Η ηλιακή αφαλάτωση είναι ίσως η πιο πολλά υποσχόμενη εναλλακτική επιλογή αφαλάτωσης με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τόσο αποστακτικές όσο και μεμβρανικές μονάδες έχουν σχεδιαστεί και λειτουργούν. Ειδικότερα, χώρες που είναι ήδη προηγμένες στη συμβατική αφαλάτωση RO, όπως η Ισπανία, η Ιταλία, και η Σαουδική Αραβία, έχουν εφαρμόσει με επιτυχία την ηλιακή φωτοβολταϊκή ενέργεια στην RO θαλασσινού νερού. Στα ηλιακών φωτοβολταϊκά κελιά, η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια, παρέχοντας άμεση πηγή ενέργειας για τη λειτουργία της RO. Οι έρευνες έχουν προτείνει ένα ευρύ φάσμα παραγωγικής ικανότητας για τις μονάδες RO θαλασσινού νερού που λειτουργούν με ηλιακή φωτοβολταϊκή ενέργεια, 0,5 - 120 m³/day.

Η Ισπανία, η επικεφαλής χώρα της αφαλάτωσης στην Ευρώπη, έχει συνδυάσει τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με τη μορφή ενός αιολικού πάρκου, με μια μονάδα RO θαλασσινού νερού στην Γκραν Κανάρια των Κανάριων Νήσων (Εικόνα). Τέσσερις ανεμογεννήτριες παρέχουν την κύρια πηγή ενέργειας για τη παραγωγή διαπερνούσας ροής RO 5000 m³/day, μαζί με εναλλάκτες πίεσης και κινητήρες μεταβλητής συχνότητας που λειτουργούν ως ένα σύστημα ανάκτησης ενέργειας. Η ενέργεια που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες είναι μεταβλητή όλο το χρόνο. Κατά καιρούς, η περίσσεια ενέργειας πωλείται στο συμβατικό δίκτυο ενέργειας και μερικές φορές η μονάδα RO καταναλώνει τη συμπληρωματική ενέργεια από το δίκτυο. Το 2004, η μονάδα λάμβανε το 57% της ηλεκτρικής ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες και το 95% της ενέργειας που παραγόταν από τις ανεμογεννήτριες πωλούταν στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 3. Μονάδα αφαλάτωσης RO θαλασσινού νερού τροφοδοτούμενη από αιολικό πάρκο στην Γκραν Κανάρια των Κανάριων Νήσων [26].

15.2. Εναλλακτικές πηγές ενέργειας στην αντίστροφη όσμωση υφάλμυρου νερού.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με συστήματα αφαλάτωσης RO υφάλμυρου νερού. Στην Αυστραλία πρόσφατα δοκιμάστηκαν συστήματα αφαλάτωσης RO μικρής κλίμακας ($0,4 - 1 \text{ m}^3/\text{day}$) τροφοδοτούμενα από ηλιακή ενέργεια. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν σε απομακρυσμένες περιοχές της κεντρικής Αυστραλίας, όπου οι κοινότητες είναι μικρές και το φρέσκο νερό είναι περιορισμένο. Ενώ οι μεγάλες μονάδες RO καλύπτουν ένα σημαντικό ρόλο για τις μεγάλες παράκτιες πόλεις, πολλές άλλες κοινότητες υποφέρουν από τις ανάγκες σε νερό. Μικρές μονάδες RO, απλά σχεδιασμένες και με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορούν να παρέχουν επιτυχώς νερό σε αγροτικές κοινότητες. Η ανάπτυξη των μικρών συστημάτων RO σε αγροτικές περιοχές έχει περιοριστεί λόγω του υψηλού κόστους επένδυσης κεφαλαίου που απαιτείται, αλλά η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα μπορούσε να επιτρέψει περισσότερες κοινότητες να επωφεληθούν από τη τεχνολογία RO. Ακόμα, η κατασκευή και η λειτουργία μιας μονάδας RO σε μια αγροτική κοινότητα απαιτεί όχι μόνο την τεχνική αξιολόγηση του χώρου και των διεργασιών, αλλά και μια μελέτη για τις κοινωνικές πτυχές γύρω από την τελική χρήση του νερού. Οι Werner και Schaefer (2007) δοκίμασαν ένα σύστημα ηλιακής ενέργειας - RO σε έξι τοποθεσίες στην κεντρική Αυστραλία και βρήκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των τοποθεσιών στη χρήση του νερού, τη ποιότητα του των πηγών νερού και στο ανθρώπινο δυναμικό συντήρησης του συστήματος [27]. Άλλες χώρες, με ξηρά, ηλιόλουστα κλίματα και αγροτικές κοινότητες που έχουν περιορισμένη πρόσβαση σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας ή σε ένα κεντρικό δίκτυο διανομής νερού, έχουν διερευνήσει επίσης παρόμοια συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας - RO τόσο για πηγές θαλασσινού νερού, όσο και για πηγές υφάλμυρου νερού. Τα συστήματα RO υφάλμυρου νερού που χρησιμοποιούν ηλιακή φωτοβολταϊκή ενέργεια έχουν ένα φάσμα παραγωγής από $0,1$ έως $60 \text{ m}^3/\text{day}$.

16. Κόστος αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης.

Το κόστος του παραγόμενου νερού ($\$/\text{m}^3$) από μονάδες αντίστροφης όσμωσης εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως ο τύπος του νερού τροφοδοσίας (θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό), το μέγεθος της μονάδας, το μέγεθος της πηγής ενέργειας και η χρήση συστήματος ανάκτησης ενέργειας. Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα παραγωγικής ικανότητας των μονάδων RO θαλασσινού νερού είναι υψηλότερη από εκείνο των μονάδων RO υφάλμυρου νερού. Το κόστος κεφαλαίου για τις μονάδες RO θαλασσινού νερού εμπίπτει μεταξύ $600 \$/(\text{m}^3/\text{day})$ και $800 \$/(\text{m}^3/\text{day})$, ενώ το κόστος κεφαλαίου για τις μονάδες RO υφάλμυρου νερού κυμαίνεται από $240 \$/(\text{m}^3/\text{day})$ έως και $400 \$/(\text{m}^3/\text{day})$. Τόσο για θαλασσινό νερό όσο και για υφάλμυρο νερό, οι μικρές εγκαταστάσεις RO ($<5000 \text{ m}^3/\text{day}$) έχουν υψηλότερο κόστος ανά μονάδα νερού ($\$/\text{m}^3$) από τις μεσαίες ($5.000\text{-}60.000 \text{ m}^3/\text{day}$) ή τις μεγάλες ($> 60.000 \text{ m}^3/\text{day}$) εγκαταστάσεις.

16.1 Σύγκριση κόστους μονάδας RO θαλασσινού νερού με μονάδα RO υφάλμυρου νερού.

Μια σύγκριση του σταθερού κόστους και του κόστους λειτουργίας και συντήρησης για ένα μεγάλο εργοστάσιο RO υφάλμυρου νερού και ένα μεγάλο εργοστάσιο RO θαλασσινού νερού παρουσιάζεται στον Πίνακα 11.

Τα δεδομένα κόστους της μονάδας RO υφάλμυρου νερού βασίζονται σε ένα μοντέλο αξιολόγησης του κόστους μίας θεωρητικής μονάδας: μία μικρότερη πιλοτική μελέτη (διαπερνούσα ροή $1.100 \text{ m}^3/\text{day}$) διεξήχθη για το νερό τροφοδοσίας. Η υποθετική μονάδα θα μπορούσε να βρίσκεται στη νότια Καλιφόρνια και να λειτουργεί από το Μητροπολιτικό Υδατικό Διαμέρισμα της Νότιας Καλιφόρνιας. Η μονάδα χρησιμοποιεί ένα μείγμα από νερό του ποταμού Κολοράντο (702 mg/L TDS) και νερό από Καλιφόρνια (394 mg/L TDS) ως νερό τροφοδοσίας ($\sim 500 \text{ mg/L TDS}$) και παράγει $700.300 \text{ m}^3/\text{day}$ διαπερνούσα ροή. Ο στόχος αυτής της υποθετικής μονάδας θα είναι να παρέχει χαμηλού TDS διαπερνούσα ροή οποία θα να αναμειγνύεται με την διαπερνούσα ροή που προκύπτει από τρεις υπάρχοντες συμβατικές μονάδες επεξεργασίας νερού που λειτουργούν στη περιοχή. Οι υφιστάμενες εγκαταστάσεις χρησιμοποιούν νερό από τον ποταμό του Κολοράντο ως πηγή τροφοδοσίας και παράγουν μία συνδυασμένη διαπερνούσα ροή $1,97 \text{ million m}^3/\text{day}$.

Η μονάδα RO θαλασσινού νερού είναι η εγκατάσταση της πόλης Ασκελόν στο νότιο Ισραήλ. Αυτή η εγκατάσταση χρησιμοποιεί ανοικτή πρόσληψη θαλασσινού νερού από τη Μεσόγειο Θάλασσα (40.700 mg/L TDS) και παράγει $330.000 \text{ m}^3/\text{day}$ διαπερνούσα ροή.

Δαπάνες Μονάδας	Μονάδα Metropolitan (\$/m ³)	Μονάδα Ashkelon (\$/m ³)
Τύπος Νερού	Υφάλμυρο	Θαλασσινό
Πάγια Κόστη (Κόστη Κεφαλαίου)	0,057	0,311
Ενέργεια	0,029	0,134
Εργασία	0,007	Περιέχονται στα Διάφορα
Χημικά	0,016	0,021
Αντικατάσταση Μεμβρανών	0,010	0,028
Διάφορα	0,077	0,031
Σύνολο	0,134	0,525

Πίνακας 11. Σύγκριση δαπανών μονάδων αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης [4].

Το κόστος ενέργειας μπορεί να συγκριθεί αφού και οι δύο αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε ένα παραπλήσιο χρονικό διάστημα, ενώ σήμερα, το κόστος της ενέργειας είναι πιθανό να έχει αυξηθεί πάνω από αυτές τις τιμές που υπολογίστηκαν πριν από μερικά χρόνια (2006). Το κόστος κεφαλαίου της μονάδας θαλασσινού νερού είναι πέντε φορές μεγαλύτερο από αυτό της μονάδας υφάλμυρου νερού. Αυτή η διαφορά του κόστους κεφαλαίου οφείλεται εν μέρει σε ένα πιο εκτεταμένο σύστημα προεπεξεργασίας, που απαιτείται για την επεξεργασία της τροφοδοσίας των επιφανειακών υδάτων, και των μεγαλύτερων σωληνώσεων άντλησης, που απαιτούνται για να μετακινηθεί το συμπύκνωμα RO θαλασσινού νερού (λόγω της χαμηλότερης ανάκτησης RO). Το κόστος της ενέργειας για τη μονάδα RO θαλασσινού νερού είναι σχεδόν πέντε φορές μεγαλύτερο από εκείνο της μονάδας RO υφάλμυρου νερού, λόγω των υψηλότερων πιέσεων και της χαμηλότερης ανάκτησης. Το κόστος χημικών είναι παρόμοιο, ενώ οι δαπάνες αντικατάστασης μεμβρανών είναι μεγαλύτερες για το σύστημα RO θαλασσινού νερού. Οι μεμβράνες RO θαλασσινού νερού έχουν συνήθως μικρότερη διάρκεια ζωής και πρέπει να αντικαθίστανται πιο συχνά λόγω ρύπανσης.

16.2 Κόστος μονάδας αφαλάτωσης RO θαλασσινού νερού.

Το κλειδί για το έντονο ενδιαφέρον και την υλοποίηση των μονάδων RO θαλασσινού νερού είναι η σημαντική μείωση του κόστους κεφαλαίου και της λειτουργία/συντήρησης κατά τα τελευταία 30 χρόνια. Το ανά μονάδα κόστος του νερού που παράγεται από την RO έχει μειωθεί από σχεδόν 5 \$/m³ στα τέλη του 1970 σε λιγότερο από 1 \$/m³ το 2004. Μονάδες που χτίστηκαν στη δεκαετία του 1990 παρήγαγαν νερό με κόστος 1 \$/m³ - 2 \$/m³, ενώ οι τελευταίες μονάδες που κατασκευάστηκαν στο Ισραήλ (μονάδα Ashkelon, η παραγωγή ξεκίνησε το 2005) και στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα (μονάδα Fujairah, η παραγωγή ξεκίνησε το 2005) έχουν κόστος παραγόμενου νερού 0,53 \$/m³ (το 2005) και 0,87\$/m³ αντίστοιχα. Στον Πίνακα 12 παρουσιάζονται οι δυνατότητες παραγωγής και οι τιμές του νερού διαφόρων μονάδων RO θαλασσινού νερού.

Τοποθεσία Μονάδας	1 ^ο Έτος Παραγωγής	Παραγωγική Ικανότητα RO (m ³ /day)	Τιμή Νερού (\$/m ³)
Galder-Agaete, Ισπανία	1989	3.500	1,94
Jeddah, Σαουδική Αραβία	1989	23.000	1,31
Ad Dur, Μπαχρέιν	1990	45.000	1,30
Lanzarote III and Agrabua, Ισπανία	1991	10.000 x 2	1,62/1,34
Santa Barbara, California, Η.Π.Α.	1992	25.000	1,51
Δεκέλεια, Κύπρος	1997	40.000	1,46
Mallorca and Marbella, Ισπανία	1998	42.000/56.400	1,03/1,00
Eilat, Ισραήλ	1998	10.000	0,72
Λάρνακα, Κύπρος	2001	56.000	0,83
Eilat, Ισραήλ	2003	10.000	0,81
Tampa Bay, Florida, Η.Π.Α.	2003	94.600	0,55
Fujairah, Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα	2005	170.500	0,87
Ashkelon, Ισραήλ	2005	320.000	0,53

Πίνακας 12. Συνοπτική παρουσίαση της παραγωγής και των τιμών του νερού για διάφορες μεγάλες μονάδες αφαλάτωσης RO θαλασσινού νερού [4].

Αρκετοί παράγοντες συνέβαλαν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των δαπανών της RO, όπως οι βελτιώσεις στα υλικά και τη τεχνολογία των μεμβρανών (υψηλότερη ροή, υψηλότερη απόρριψη αλάτων, χαμηλότερη απαιτούμενη υδροστατική πίεση, χαμηλότερο κόστος υλικών) και η χρήση των συσκευών ανάκτησης πίεσης. Η RO έχει γίνει επίσης λιγότερο ακριβή από τις θερμικές διεργασίες, οι οποίες απαιτούν 10 φορές την ηλεκτρική ενέργεια της RO, τη στιγμή που οι τιμές του αργού πετρελαίου έχουν αυξηθεί από 20 US \$/bbl (ανά βαρέλι) το 1997, σε περίπου 70 US \$/bbl το 2007 και 108 US \$/bbl σήμερα. Ενώ οι τιμές του πετρελαίου αυξάνονται, πολλές προσφορές έργων εξακολουθούν να βασίζονται στο προβλεπόμενο κόστος της ενέργειας σε μία τιμή 5 US \$/bbl. Αυτή η ασυνέπεια στη πρόβλεψη του πραγματικού κόστους της ενέργειας επιτρέπει στις θερμικές μονάδες αφαλάτωσης να συγκριθούν με τις μονάδες αφαλάτωσης RO ως οικονομικές επιλογές. Ωστόσο, η αφαλάτωση RO είναι περισσότερο αποδοτική ενεργειακά και η διεργασία θα συνεχίσει να βελτιώνεται με νέα υλικά μεμβρανών και τροποποιήσεις. Ενώ οι πολλές μονάδες RO εξακολουθούν να χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα ως πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι μελλοντικές εγκαταστάσεις RO μπορούν να επωφεληθούν από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τη πυρηνική ενέργεια για την περαιτέρω μείωση του κόστους.

Τόσο το σχετικό κόστος κεφαλαίου όσο και το κόστος της ενέργειας (ανά μονάδα της παραγωγικής ικανότητας των μονάδων RO) μίας μονάδας RO μειώνεται καθώς αυξάνεται το μέγεθος των μονάδων. Η ενέργεια που απαιτείται από ένα σύστημα RO κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται για τις αντλίες. Όσο μεγαλύτερη είναι η εγκατάσταση, τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς που απαιτείται για τα μεγαλύτερα συστήματα άντλησης. Για τις μονάδες RO θαλασσινού νερού, το κόστος ενέργειας μπορεί να αντιπροσωπεύει έως και το 50% του συνολικού κόστους λειτουργίας και συντήρησης των εγκαταστάσεων. Το δεύτερο μεγαλύτερο κόστος είναι συνήθως το πάγιο κόστος (περίπου 37%), συμπεριλαμβανομένου του κεφαλαίου απόσβεσης της επένδυσης και την ασφάλιση. Άλλες δαπάνες, όπως παρουσιάζονται και στο Σχήμα

37, περιλαμβάνουν τη συντήρηση και ανταλλακτικά (7%), την αντικατάσταση των μεμβρανών (5%), της εργασίας (4%) και χημικά προϊόντα και αναλώσιμα (3%).



Σχήμα 37. Κατανομή δαπανών μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού [28].

Για ένα συγκεκριμένο μέγεθος μονάδων, η επιλογή της ζητούμενης ανάκτησης μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό το κόστος της μονάδας. Οι περισσότερες μονάδες έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να έχουν ως στόχο συγκεκριμένη διαπερνούσα ροή ή αλλιώς, παραγόμενη (ογκομετρική) ροή. Για μια σταθερή ροή προϊόντος διαπέρασης, καθώς αυξάνεται η ανάκτηση, η απαιτούμενη ροή τροφοδοσίας μειώνεται διότι περισσότερο μέρος της ροής τροφοδοσίας διέρχεται μέσα από τις μεμβράνες ως προϊόν διαπέρασης. Έτσι, για υψηλότερη ανάκτηση, το σύνολο του σχετικού εξοπλισμού (δηλαδή, σωληνώσεις, αντλίες, δεξαμενές αποθήκευσης, εξοπλισμός προεπεξεργασίας, συστήματα δοσολογίας χημικών, σημείο εκβολής συμπυκνώματος) μπορεί να έχει μέγεθος μικρότερο με αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους. Ωστόσο, η αύξηση της οσμωτικής πίεσης με την αύξηση της ανάκτησης προσπερνά τελικά το όφελος της μικρότερης τροφοδοτούμενης ροής, και στην RO θαλασσινού νερού για ανακτήσεις πάνω από 55-60%, το συνολικό κόστος του νερού αρχίζει να αυξάνεται. Το εύρος του βέλτιστου ποσοστού ανάκτησης αυξάνεται για νερό τροφοδοσίας λιγότερο αλμυρό.

Η προεπεξεργασία RO συμβάλλει σημαντικά στο συνολικό κόστος του εξοπλισμού μίας μονάδας. Η συμβατική προεπεξεργασία (διήθηση πολλαπλών μέσων) κοστίζει παραδοσιακά λιγότερο από άλλες πρόσφατες εναλλακτικές τεχνικές προεπεξεργασίας (διήθηση με μεμβράνες MF, UF, ή NF). Ωστόσο, η επένδυση κεφαλαίου που απαιτείται για τα συστήματα μεμβρανών προεπεξεργασίας έχει μειωθεί. Ενώ το κόστος κεφαλαίου μεμβρανών παραμένει ελαφρώς υψηλότερο από το κόστος κεφαλαίου διήθησης πολλαπλών μέσων, η διαμεμβρανική προεπεξεργασία μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος λειτουργίας και συντήρησης της RO, και ιδίως το κόστος της αντικατάστασης μεμβρανών RO. Ωστόσο, η διαμεμβρανική προεπεξεργασία εξακολουθεί να είναι πιο ακριβή από τη συμβατική προεπεξεργασία, λόγω του υψηλότερου κόστους της αντικατάστασης των μεμβρανών σε σχέση με τις δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης των μέσων filtraρίσματος. Καθώς όλο και περισσότερες μονάδες RO θαλασσινού νερού αναγκάζονται να χρησιμοποιούν ανοικτής πρόσληψης νερό τροφοδοσίας, η διαμεμβρανική προεπεξεργασία είναι η κύρια μέθοδος που επιλέγεται για την προεπεξεργασία.

Μερικές από τις πολύ μεγάλες μονάδες, κυρίως στη Μέση Ανατολή και την Ασία, έχουν ήδη αρχίσει να χρησιμοποιούν διαμεμβρανική προεπεξεργασία. Αυτές οι μονάδες, συμπεριλαμβανομένων των Addur στο Μπαχρέιν, Kindasa στη Σαουδική Αραβία, Fukuoka στην Ιαπωνία και Yu-Han στη Κίνα, έχουν όλες διαπιστώσει τη βελτίωση της ποιότητας του νερού, ως αποτέλεσμα της χρήσης διαμεμβρανικής προεπεξεργασίας. Ο Bartels και άλλοι, διαπίστωσαν ότι το κόστος κεφαλαίου μίας μονάδα RO που χρησιμοποιεί διαμεμβρανική προεπεξεργασία θα μπορούσε να είναι τόσο μεγάλο όσο 30% υψηλότερο από ότι εάν η συμβατική προεπεξεργασία είχε επιλεγεί [29]. Οι συγγραφείς δηλώνουν ότι η μείωση του λειτουργικού κόστους και του κόστους των χημικών μπορούν να μειώσουν τη συνολική διαφορά μεταξύ του 2 και 3%. Ο Pearce (2007) περιέγραψε πιθανές περιοχές της μείωσης του κόστους λόγω των βελτιώσεων στη λειτουργία της RO. Η προεπεξεργασία μέσω μεμβρανών μπορεί να μειώσει το κόστος που συνδέεται με την έκταση των μονάδων, την αντικατάσταση των μεμβρανών RO, τα προ-RO φίλτρα φυσιγγίων και το κόστος χημικών, καθώς και να επιτρέψει αυξήσεις στην ανάκτηση και διαπερνούσα ροή (λόγω των χαμηλότερων ποσοστών ρύπανσης). Στην περίπτωση της μελέτης που παρουσίασε ο Pearce, τα στοιχεία βασίζονται σε νερό τροφοδοσίας από μια θάλασσα της Ανατολικής Μεσογείου και οι εκτιμήσεις δίνονται για μειώσεις δαπανών για καθεμία από τις παραμέτρους που αναφέρονται παραπάνω. Η παραγόμενη ροή RO μπορεί να αυξηθεί κατά 25%, ενώ η έκταση των εγκαταστάσεων και αντικατάσταση των μεμβρανών RO μπορεί να μειωθεί κατά 33%. Το κόστος των χημικών μπορεί να μειωθεί κατά 45-65% για τα προ-RO φίλτρα φυσιγγίων δεν είναι απαραίτητα. Το συνολικό κόστος του νερού τόσο για το συμβατικό σύστημα προεπεξεργασίας RO όσο και για το σύστημα προεπεξεργασίας RO μέσω μεμβρανών είναι 0,90 \$ /m³. Ενώ η Μεσόγειος Θάλασσα έχει σχετικά καλή ποιότητα νερού τροφοδοσίας και απαιτεί μόνο ένα στάδιο επεξεργασίας από τα μέσα διήθησης (για τη συμβατική προεπεξεργασία), άλλες πηγές τροφοδοσίας, όπως αυτές στη Μέση Ανατολή (Περσικός Κόλπος), είναι χαμηλότερης ποιότητας και απαιτούν πιο εκτεταμένη προεπεξεργασία.

16.3 Κόστους μονάδας αφαλάτωσης RO υφάλμυρου νερού.

Η βασική διαφορά στην κατανομή του κόστους μεταξύ των μονάδων RO θαλασσινού νερού και των μονάδων RO υφάλμυρου νερού είναι η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια. Οι μονάδες RO υφάλμυρου νερού απαιτούν μια πολύ χαμηλότερη υδροστατική πίεση για την παραγωγή διηθήματος λόγω της χαμηλότερης περιεκτικότητας σε αλάτι του νερού τροφοδοσίας. Επιπλέον, οι μεμβράνες RO υφάλμυρου νερού συχνά έχουν χαμηλότερη απόρριψη άλατος και είναι πιο διαπερατές από τις μεμβράνες RO θαλασσινού νερού. Το ενεργειακό κόστος μίας τυπικής μονάδας RO υφάλμυρου νερού αντιπροσωπεύει μόνο το 11% του συνολικού κόστους (44% για RO θαλασσινού νερού), και οι μεγαλύτερες δαπάνες είναι τα πάγια έξοδα (απόσβεση του κεφαλαίου και ασφάλισης) που αντιπροσωπεύουν το 54%. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 38, λόγω της μειωμένης συμβολής της ενέργειας στη συνολική κατανομή του κόστους, άλλοι παράγοντες όπως η συντήρηση (9%), η αντικατάσταση των μεμβρανών (7%), η εργασία (9%) και τα χημικά προϊόντα και τα αναλώσιμα (10%), αυξάνονται.



Σχήμα 38. Κατανομή δαπανών μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης υφάλμυρου νερού [30].

Η τιμή του νερού ανά παραγόμενη μονάδα για RO υφάλμυρου νερού κυμαίνεται μεταξύ $0,10 \text{ \$/m}^3$ και $1,00 \text{ \$/m}^3$ και αυτό το εύρος τιμών είναι χαμηλότερο από εκείνο της RO θαλασσινού νερού ($0,53 \text{ \$/m}^3$ - $1,50 \text{ \$/m}^3$). Το κόστος μπορεί να αυξηθεί λόγω των απαιτήσεων της άντλησης (δηλαδή την άντληση των υπόγειων υδάτων από γεωτρήσεις). Παράγοντες που απορρέουν από τη χαμηλότερη αλατότητα του νερού τροφοδοσίας, συμπεριλαμβανομένων των χαμηλότερων απαιτήσεων ενέργειας, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, και της λιγότερο συχνής αντικατάστασης των μεμβρανών, βοηθούν στη μείωση του κόστους του νερού. Όπως και στην RO θαλασσινού νερού, το κόστος προεπεξεργασίας μπορεί να αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό τμήμα του κόστους κεφαλαίου, ιδιαίτερα εάν επιλέγεται η διαμεμβρανική προεπεξεργασία. Ωστόσο, συχνά χρησιμοποιείται η συμβατική προεπεξεργασία πολλαπλών μέσων διήθησης επειδή πολλά υφάλμυρα νερά τροφοδοσίας είναι υπόγεια.

Ένα βασικό κόστος για τα συστήματα RO υφάλμυρου νερού, είναι η διάθεση του συμπυκνώματος. Για τις μονάδες RO υφάλμυρου νερού, η επιφανειακή εκβολή του νερού (συνήθως βρίσκεται στο ίδιο σώμα νερού που παρέχει το νερό τροφοδοσίας) είναι η λιγότερο δαπανηρή λύση διάθεσης. Αν και εξακολουθεί να θεωρείται ένα σημαντικό κόστος για τις μονάδες RO θαλασσινού νερού, λόγω των χαμηλότερων ανακτήσεων, η επιφανειακή διάθεση του νερού είναι σχετικά φθηνή για τα συστήματα υφάλμυρου νερού. Εκτός από την επιφανειακή διάθεση, ένα συνδυασμένο σύστημα αποχέτευσης είναι συχνά η επόμενη σχετικά χαμηλού κόστους επιλογή διάθεσης. Ωστόσο, αυτή η επιλογή είναι συχνά δεν είναι διαθέσιμη, και οι μονάδες πρέπει να επιλέξουν από τις πιο ακριβές επιλογές, ανάλογα με τους τοπικούς κανονισμούς και τις διαθέσιμες εκτάσεις. Μια σύνοψη των εξόδων για τη διάθεση συμπυκνώματος και το σύστημα μεμβρανών RO φαίνεται στον Πίνακα 13.

Κόστος	Κόστος (\$/m ³)	Κρίσιμοι παράγοντες
Αντικατάσταση μεμβρανών	0,008 – 0,05	Κλιμάκωση, Ρύπανση
Χημικά	0,008 – 0,05	Συχνότητα καθαρισμού
Διάθεση Συμπυκνώματος*		
Επιφανειακά Ύδατα	0,03 – 0,30	Σωληνώσεις, Άντληση, Κατασκευή υποθαλάσσιου αγωγού
Λίμνη Εξάτμισης	1,18 – 10,04	Μέγεθος και Βάθος λίμνης, Συγκέντρωση άλατος, Ποσοστό εξάτμισης, Ποσοστό διάθεσης, Ναυτιλιακό κόστος λίμνης
Υπόγεια Έγχυση Πηγαδιού	0,33 – 2,64	Διάμετρος σωλήνωσης, Βάθος, Ρυθμός έγχυσης, Κόστος χημικών
Αποχέτευση	0,30 – 0,66	Ποσοστό διάθεσης, Αλατότητα, Χωρητικότητα αποχέτευσης, Δικαιώματα
Συμπυκνωτής Άλμης (ZLD)	0,66 – 26,41	Ποσοστό διάθεσης, Ενεργειακό κόστος, Αλατότητα
*Το κόστος της επιλογής διάθεσης συμπυκνώματος περιλαμβάνεται στο κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας και συντήρησης.		

Πίνακας 13. Σύγκριση του κόστους των μονάδων μεμβρανών και της επιλογής διάθεσης συμπυκνώματος.

Καθώς το κόστος διάθεσης συμπυκνώματος αυξάνεται, το κόστος παραγωγής του αφαλατωμένου νερού γίνεται όλο και πιο δαπανηρό. Η διάθεση σε επιφανειακά ύδατα είναι μακράν η λιγότερο δαπανηρή λύση, αν και το κόστος σωληνώσεων και άντλησης μπορεί να αυξηθεί σημαντικά όταν η μονάδα δεν βρίσκεται σε ακτή. Οι λίμνες εξάτμισης και οι συμπυκνωτές άλμης είναι οι πιο ακριβές επιλογές λόγω των αυστηρών κανονισμών που αφορούν τα υπόγεια ύδατα και των ενεργειακών απαιτήσεων, αντίστοιχα.

17. Τεχνολογικές προκλήσεις και το μέλλον της RO.

Μια αναδυόμενη εφαρμογή των μεμβρανών RO αποτελεί η επεξεργασία των λυμάτων και η αφαίρεση ιχθών οργανικών προσμίξεων. Μια σειρά νέων οργανικών ρύπων έχει εντοπιστεί και η τεχνολογία RO είναι μια πιθανή υποψήφια επεξεργασία. Ιδιαίτερα για τις υδρόφιλες οργανικές ενώσεις, συμπεριλαμβανομένων πολλών υποπροϊόντων απολύμανσης και φαρμακευτικών ενώσεων, οι παραδοσιακές διαδικασίες επεξεργασίας (πήξη και θρόμβωση) δεν είναι αποτελεσματικές στην αφαίρεση. Ωστόσο, οι μεμβράνες RO μπορούν να αφαιρέσουν αυτές τις ενώσεις τόσο μέσω της απώθησης του φορτίου όσο και μέσω των φαινομένων αποκλεισμού μεγέθους. Η χρησιμοποίηση των μεμβρανών RO στην επεξεργασία των λυμάτων παρουσιάζει μοναδικές προκλήσεις: μπορεί να εμφανιστεί καθίζηση φωσφορικού ασβεστίου και τα αστικά λύματα τείνουν να έχουν πολύ υψηλότερη περιεκτικότητα σε οργανικό άνθρακα από τα ρεύματα τροφοδοσίας πόσιμου νερού. Καθώς τα συστήματα RO αναπτύσσονται για την επεξεργασία λυμάτων, η ρύπανση των μεμβρανών και ο σχεδιασμός της προεπεξεργασίας θα είναι η κύρια ανησυχία.

Η ανάπτυξη των συσκευών ανάκτησης ενέργειας και οι υβριδικές μονάδες αφαλάτωσης/σταθμών ηλεκτροπαραγωγής επέτρεψαν σημαντικές προόδους στην ανάκτηση ενέργειας. Επιπλέον, ο σχεδιασμός των νέων μεμβρανών RO, περιλαμβανομένων των μεμβρανών σπειροειδούς περιέλιξης μεγαλύτερων διαμέτρων και των μεμβρανών υψηλής ροής, παρέχει βελτίωση στο κόστος και την ενεργειακή απόδοση στον τυπικό σχεδιασμό του συστήματος RO. Η περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη της τεχνολογίας στην ανάκτηση ενέργειας και το σχεδιασμό του συστήματος θα επιτρέψει πρόσθετα κέρδη στην ανάκτηση ενέργειας και τη μείωση του κόστους.

Ένα βασικός περιορισμός στις εμπορικές μεμβράνες RO πολυαμιδίου και στο σχεδιασμό του συστήματος επεξεργασίας είναι η αποδόμηση της μεμβράνης μέσω της επαφής με το χλώριο, ένα από τα κοινά απολυμαντικά που χρησιμοποιούνται στο νερό και την επεξεργασία των λυμάτων. Η πρόσφατη έρευνα σε νέα υλικά μεμβρανών και στη χημεία πολυμερών έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη των σύνθετων μεμβρανών σουλφονωμένης πολυσουλφόνης που είναι ιδιαίτερα ανθεκτικές στην αρνητική επίδραση του χλωρίου. Η εμπορική ανάπτυξη των ανθεκτικών στο χλώριο μεμβρανών θα εξαλείψει την ανάγκη για την αποχλωρίωση του νερού τροφοδοσίας της RO και την επαναχλωρίωση μετά από το σύστημα μεμβρανών, μειώνοντας το συνολικό κόστος της RO.

Η ανάγκη για αφαλάτωση RO υφάλμυρου νερού στην ενδοχώρα θα συνεχίσει να αυξάνεται στο μέλλον και οι κύριοι περιορισμοί για περαιτέρω εφαρμογή της RO στην ενδοχώρα είναι το κόστος και η διάθεση του συμπυκνώματος. Η έρευνα σχετικά με τις νέες επιλογές επεξεργασίας του συμπυκνώματος βρίσκεται σε εξέλιξη και οι επιδείξεις πιλοτικών μονάδων έχουν δείξει ότι είναι εφικτές σημαντικές αυξήσεις στην ανάκτηση RO. Η βελτιστοποίηση στη δοσολογία των αντικαθαλωτικών, τη προσθήκη χημικών και τον έλεγχο του pH είναι αναγκαία για τη βελτίωση του κόστους της επεξεργασίας του συμπυκνώματος. Η μεγάλης κλίμακας χρήση της επεξεργασίας του συμπυκνώματος είναι σε ανάπτυξη και θα μπορέσει να επιτρέψει την οικονομική χρήση υφάλμυρων υδάτινων πόρων στην ενδοχώρα.

Οι ολοένα και αυστηρότερες προδιαγραφές της ποιότητας των υδάτων θα προκαλέσει περαιτέρω βελτιστοποίηση και ανάπτυξη στη τεχνολογία μεμβρανών RO. Ειδικότερα, τα πρότυπα για το βόριο έχουν μειωθεί και οι μονάδες RO θαλασσινού νερού μπορεί να χρειάζονται περισσότερα από ένα πέρασμα RO για να επιτευχθεί η απαιτούμενη ποιότητα του νερού. Οι κατασκευαστές μεμβρανών αναπτύσσουν νέες

μεμβράνες RO με υψηλότερες απορρίψεις βορίου. Η μελλοντική τεχνολογία μπορεί να επικεντρωθεί σε άλλους ελεγχόμενους και αναδύομενους ρύπους, συμπεριλαμβανομένων των παραπροϊόντων απολύμανσης, των φαρμακευτικά προϊόντων και τις ενδοκρινικών διαταραχών ενώσεων.

Η εκτεταμένη ανάπτυξη των παράκτιων εγκαταστάσεων αφαλάτωσης που χρησιμοποιούν ως επιλογή διάθεσης συμπυκνώματος την απόρριψη σε επιφανειακά ύδατα έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει αρνητικά το λαμβανόμενο νερό της περιοχής και το ευρύτερο θαλάσσιο περιβάλλον. Ειδικότερα, η έρευνα και η μοντελοποίηση σχετικά με τις τροποποιήσεις αλατότητας στο Περσικό Κόλπο δείχνουν ότι μια αύξηση στις παράκτιες εγκαταστάσεις αφαλάτωσης είναι πιθανό να αυξήσει την αλατότητα στον Κόλπο και να προκαλέσει τοπικές διακυμάνσεις στη περιεκτικότητα σε οξυγόνο και στη θερμοκρασία. Δεδομένου ότι η χρήση της αφαλάτωσης συνεχίζει να αυξάνεται, οι επιπτώσεις των μονάδων αφαλάτωσης σε τοπικούς φορείς νερού πρέπει να αξιολογηθούν και οι αρνητικές επιπτώσεις θα πρέπει να ελαχιστοποιηθούν.

Η χρήση της διήθησης μέσω μεμβρανών στη προεπεξεργασία RO θα συνεχίσει να διερευνάται και καθώς το κόστος μεμβρανών μειώνεται, η χρήση της διαμεμβρανικής προεπεξεργασίας μεμβράνη θα γίνει μια πιο βιώσιμη ως εναλλακτική λύση της συμβατικής προεπεξεργασίας. Ιδιαίτερα για τις πηγές των επιφανειακών υδάτων, η διαμεμβρανική προεπεξεργασία είναι ένα σταθερό εμπόδιο για τα σωματίδια και τα κολλοειδή που ρυπαίνουν τις μεμβράνες RO και μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας RO. Οι έρευνες πάνω στις τιμές του SDI και τη ρύπανση των μεμβρανών έχουν δείξει ότι το SDI δεν είναι πάντα ο κατάλληλος δείκτης ρύπανσης της RO. Μία βελτιωμένη μέθοδος για την πρόβλεψη της πιθανής ρύπανσης είναι απαραίτητη.

18. Συμπεράσματα

Το πεδίο της αφαλάτωσης μέσω μεμβρανών RO έχει αναπτυχθεί ταχύτατα τα τελευταία 40 χρόνια και η RO έχει γίνει η κύρια επιλογή για τις νέες εγκαταστάσεις μονάδων. Η τεχνολογία μεμβρανών έχει βελτιωθεί, επιτρέποντας σημαντικές αυξήσεις στη ποσότητα παραγόμενου προϊόντος και την εξοικονόμηση του κόστους. Ενώ οι βασικές αρχές λειτουργίας παραμένουν οι ίδιες για όλες τις εφαρμογές RO, εξατομικευμένες εφαρμογές έχουν αναπτυχθεί με βάση την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας. Ειδικότερα, τα δύο βασικά είδη του νερού τροφοδοσίας, το θαλασσινό νερό και το υφάλμυρο νερό, έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που απαιτούν ειδική προσαρμογή των παραμέτρων και του σχεδιασμού του συστήματος. Η ανάκτηση RO θαλασσινού νερού περιορίζεται κυρίως από την αύξηση της οσμωτικής πίεσης και τη ρύπανση από τις οργανικές ύλες· ο τυπικός σχεδιασμός του συστήματος περιλαμβάνει χημική και διαμεμβρανική προεπεξεργασία και ένα πέρασμα RO. Εντούτοις, προβληματικά συστατικά, όπως το βόριο, μπορεί να απαιτούν περισσότερο σύνθετο σχεδιασμό περασμάτων RO. Τα συστήματα μεμβρανών RO υφάλμυρου νερού συνήθως αποτελούνται από δύο RO πέρασματα σε σειρά και τα βασικά ζητήματα περιλαμβάνουν τη καθίζηση αλάτων και τη διαχείριση του συμπυκνώματος. Ενώ και οι δύο τύποι RO, θαλασσινού νερού και υφάλμυρου νερού, έχουν αναπτυχθεί επαρκώς για να χρησιμοποιηθούν σε πάμπολλες εμπορικές εγκαταστάσεις, πολλές σημαντικές προκλήσεις για τον τομέα της RO παραμένουν. Περαιτέρω βελτιώσεις στην τεχνολογία μεμβρανών, τη χρήση ενέργειας και την επεξεργασία συμπυκνώματος θα επιτρέψει την ευρύτερη εφαρμογή της RO στην ενδοχώρα και τις αγροτικές κοινότητες.



Εικόνα 4. Μονάδα αντίστροφης όσμωσης [31].

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

CA:	Οξική κυτταρίνη
CAPS:	Αποσκήρυνση συμπαγούς ταχείας καθίζησης
DOC:	Διαλυμένοι οργανικοί άνθρακες
ED:	Ηλεκτροδιάλυση
EDR:	Αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση
MED:	Πολυβάθμια εξάτμιση
MF:	Μικροδιήθηση
MFI:	Τροποποιημένος δείκτης ρυπάνσεως
MSF:	Πολυβάθμια εκρηκτική απόσταξη.
MWCO:	Μοριακό βάρος αποκοπής
NF:	Νανοδιήθηση
PA:	Πολυμερή πολυαμιδίου
RO:	Αντίστροφη όσμωση
TDS:	Συνολικά διαλυμένα στερεά
TFC:	Μεμβράνες λεπτού συνθετικού στρώματος
UF:	Υπερδιήθηση
VC:	Αφαλάτωση με συμπίεση ατμών
ZLD:	Μηδενική απόρριψη υγρών
ΑΠΕ:	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

ΣΥΜΒΟΛΑ

B:	Σταθερά διαπερατότητας μεμβράνης
C:	Συγκέντρωση ιόντων
$C_{\text{concentrate}}$:	Συγκέντρωση ιόντων στο συμπύκνωμα
CF:	Συντελεστή συγκέντρωσης
C_{feed} :	Συγκέντρωση ιόντων στο διάλυμα τροφοδοσίας
C_{permeate} :	Συγκέντρωση ιόντων στο διήθημα
D:	Ικανότητα διάχυσης νερού
D_{AB} :	Συντελεστής διάχυσης για τη διάδοση του A στο B (μεμβράνη)
dp/dx :	Μεταβολή πίεσης κατά τη διεύθυνση x
D_s :	Ικανότητα διάχυσης άλατος διαμέσου της μεμβράνης
IAP:	Γινόμενο ενεργοτήτων των κατιόντων και των ανιόντων του άλατος
K_a :	Συντελεστής κατανομής άλατος
K_s :	Συντελεστής κατανομής άλατος
K_{sp} :	Γινόμενο διαλυτότητας στο άλας
l:	Πάχος μεμβράνης
L:	Συντελεστής διαπερατότητας
LSI:	Δείκτης κορεσμού Langelier
N_A :	Ροή νερού
N_s :	Ροή άλατος διαμέσου της μεμβράνης
N_{Ax} :	Ροή μάζας του A στην x-κατεύθυνση
Q_F :	Ογκομετρικός ρυθμός ροής τροφοδοσίας
Q_P :	Ογκομετρικός ρυθμός ροής διαπέρασης
R:	Σταθερά ιδανικών αερίων
R_F :	Αντίσταση ρυπαντή
R_P :	Αντίσταση φίλτρου
R_s :	Απόρριψη άλατος
R_t :	Αντίσταση ροής

R_w :	Ανάκτηση
S :	Διαλυτότητα νερού
SDI :	Δείκτης πυκνότητας ιλύος
SI :	Δείκτης κορεσμού
T :	Θερμοκρασία λειτουργίας
t :	Χρόνος
V :	Μερικός γραμμομοριακός όγκος νερού
Δp :	Διαμεμβρανική διαφορά πίεσης
$\Delta \pi$:	Διαφορά οσμωτικής πίεσης
κ :	Διαπερατότητα
μ :	Ιξώδες
π :	Οσμωτική πίεση
$\pi_{concentrate}$:	Οσμωτική πίεση συμπυκνώματος
ρ_A :	Πυκνότητα του A

Δείκτες

A :	Διάλυμα (νερό)
x :	κατεύθυνση x

ΣΥΜΒΟΛΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

- A_m : Εμβαδόν μεμβράνης για ένα στοιχείο RO (m^2)
- A_s : Εμβαδόν μεμβράνης για ένα στοιχείο RO μετά από ρύπανση scaling (m^2)
- $c_{b,i}$: Συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας στο συμπύκνωμα άλμης (mol/m^3)
- $c_{m,i}$: Συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας στο νερό τροφοδοσίας (mol/m^3)
- $\overline{c_{m,i}}$: Μέση συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας στην επιφάνεια της μεμβράνης (mol/m^3)
- $c_{p,i}$: Συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας στη διαπερνούσα ροή (προϊόν) (mol/m^3)
- d_h : Υδραυλική διάμετρος (m)
- D_i : Συντελεστής διάχυσης διαλυμένης ουσίας (m^2/s)
- E : Κατανάλωση ειδικής ενέργειας ($Joule/m^3$)
- h_m : Ύψος καναλιού άλμης RO (m)
- J : Ροή διαλύματος μέσω μεμβρανών (m/s)
- $J_{s,i}$: Ροή διαλυμένης ουσίας μέσω μεμβρανών (m/s)
- k_i : Συντελεστής μεταφοράς μάζας διαλυμένης ουσίας (m/s)
- l_m : Μήκος καναλιού άλμης RO (m)
- $L_{s,i}$: Παράμετρος μεταφοράς διαλυμένης ουσίας (m/s)
- $L_{s,i,0}$: Ενδογενής παράμετρος μεταφοράς διαλυμένης ουσίας (m/s)
- $L_{v,0}$: Ενδογενής παράμετρος μεταφοράς διαλύματος (m/s)
- L_v : Παράμετρος μεταφοράς διαλύματος (m/s)
- P_b : Πίεση συμπυκνώματος άλμης (Pa)
- P_d : Πτώση πίεσης κατά μήκος ενός στοιχείου RO (Pa)
- P_f : Πίεση τροφοδοτούμενου διαλύματος (Pa)
- P_{loss} : Απώλεια πίεσης σε ένα στοιχείο RO (Pa)
- Q_b : Ρυθμός ροής συμπυκνώματος άλμης (m^3/s)
- Q_f : Ρυθμός ροής τροφοδοτούμενου διαλύματος (m^3/s)

- Q_p : Ρυθμός ροής προϊόντος (m^3/s)
 R : Παγκόσμια σταθερά αερίων ($\frac{J}{mol \cdot K}$)
 R_c : Συντελεστής ρύπανσης σχηματισμού cake
 Rec : Ανάκτηση
 T : Θερμοκρασία διαλύματος (K)
 u : Ταχύτητα εγκάρσιας ροής σε κανάλι άλμης RO (m/s)
 w_m : Πλάτος καναλιού άλμης RO (m)
 α_1 : Σταθερά για τη μεταφορά διαλυμένης ουσίας
 α_2 : Σταθερά για τη μεταφορά διαλυμένης ουσίας (bar^{-1})
 β_1 : Σταθερά για τη μεταφορά διαλύματος
 γ_1 : Παράμετρος μεμβράνης (bar)
 γ_2 : Παράμετρος μεμβράνης
 $\Delta\Pi_i$: Οσμωτική πίεση διαλυμένης ουσίας (Pa)
 ϵ_{ERD} : Βαθμός απόδοσης συσκευής ανάκτησης ενέργειας
 ϵ_{pump} : Βαθμός απόδοσης αντλίας
 η : Ιξώδες ($Pa \cdot s$)
 ν : Κινηματικό ιξώδες (m^2/s)
 ρ : Πυκνότητα (kg/m^3)

Δείκτες

$i = \text{salt}$: Αλάτι (TDS)

boron: Βόριο

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Dr. Val Frenkel, Pankratz T., «Desalination Methods, Technology, and Economics», 2004
2. Τζεν Ευτυχία, «Αειφόρος Ανάπτυξη των Νησιών του Αιγαίου: Βιώσιμη Διαχείριση Υδατικών Πόρων», Σύρος 2010
3. www.DesalData.com
4. Lauren F. Greenlee, Desmond F. Lawler, Benny D. Freeman, Benoit Marrot, Philippe Moulin, «Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges», 2009
5. National Research Council, «Desalination: a National Perspective», Committee on Advancing Desalination Technology, 2008
6. Φουντουκίδης Γ. Ευάγγελος, «Αφαλάτωση Νερού με Αντίστροφη Όσμωση», 2012
7. Παπαδάκης Κ., «Αφαλάτωση: η Θάλασσα στην Υπηρεσία του Καταναλωτή», Αθήνα 2012
8. www.grahamscutt.co.uk
9. www.RoplanT.org
10. «Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων του έργου Larnaca Golf Resort & Country Club Cyprus», Κύπρος 2007
11. Masahiro Murakami, «Managing Water for Peace in the Middle East: Alternative Strategies», 1995
12. Hatch, «Reverse Osmosis System», 2009
13. David Paul, Abdul Rahman M. Abanmy, «Reverse Osmosis Membrane Fouling – The Final Frontier», 1990
14. Kremen S.S., Tanner M., «Silt density indices (SDI), percent plugging factor (%PF): their relation to actual foulant deposition», 1998
15. Leitz F., Boegli B., «Evaluation of the Port Hueneme Demonstration Plant: An Analysis of 1 MGD Reverse Osmosis, Nanofiltration, and Electrodialysis Reversal Plants Run Under Essentially Identical Conditions», 2001
16. Tran T., Bolto B., Gray S., Hoang M., Ostarcevic E., «An autopsy study of a fouled reverse osmosis membrane element used in a brackish water treatment plant», 2007

17. Reverberi F., Gorenflo A., «Three year operational experience of a spiral-wound SWRO system with a high fouling potential feed water», 2007
18. Wilf M., Klinko K., «Optimization of seawater RO systems design», 2001
19. Gilron J., Folkman Y., Savliev R., Waisman M., Kedem O., «WAIV – wind aided intensified evaporation for reduction of desalination brine volume», 2003
20. Almulla A., Eid M., Cote P., Coburn J., «Developments in high recovery brackish water desalination plants as part of the solution to water quantity problems», 2002
21. Glueckstern P., Priel M., «Boron removal in brackish water desalination systems», 2007
22. Hyun-Je Oh, Tae-Mun Hwang, Sangho Lee, «A simplified simulation model of RO systems for seawater desalination», 2008
23. Abderrahim Abbas, «Simulation and analysis of an industrial water desalination plant», 2005
24. www.spiritofbaraka.com
25. Mohamed A. Eltawil, Zhao Zhengming, Liqiang Yuan, «A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems», 2009
26. Energy, Water & Bioengineering Division Canary Islands Institute of Technology, «Renewable Energies in the Canary Islands: Present and Future», 2005
27. Werner M., Schaefer A.I., «Social aspects of a solar-powered desalination unit for remote Australian communities», 2007
28. Heather Cooley, Peter H. Gleick, Gary Wolff, «Desalination, with a grain of salt: a California Perspective», 2006
29. Bartels C., Rybar S., Franks R., «Integrated membrane desalination systems – potential benefits of combined technology», 2006
30. James E. Miller, «Review of Water Resources and Desalination Technologies», 2003
31. www.qrbiz.com