



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΒΟΛΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

«ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ»

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΚΟΛΕΣΙΔΟΥ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΜΠΟΝΤΟΖΟΓΛΟΥ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ**

ΒΟΛΟΣ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2020

Περίληψη

Η λειψυδρία αποτελεί ένα κρίσιμο πρόβλημα για αρκετές περιοχές του πλανήτη, το οποίο κλιμακώνεται υπό την επίδραση της αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού και της κλιματικής αλλαγής. Οι τεχνολογίες των μεθόδων αφαλάτωσης για την άμεση παραγωγή γλυκού νερού αναπτύσσονται ραγδαία. Ανάμεσά τους κυριαρχεί η μέθοδος της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση ως η πιο αξιόπιστη και ενεργειακά αποδοτική τεχνική. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, στη σύγκρισή της με άλλες τεχνικές αφαλάτωσης και στην ανάλυση των παραγόντων που επηρεάζουν την οικονομική και ενεργειακή της απόδοση. Παράλληλα, αναδεικνύει τα πιο σύγχρονα τεχνολογικά επιτεύγματα που σχετίζονται με τη βελτίωση των διατάξεων μικρής και μεγάλης κλίμακας. Η γρήγορη εξέλιξη της τεχνικής της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση επιτρέπει τη σταθερή μείωση του κόστους παραγωγής γλυκού νερού και προσδίδει στη μέθοδο αυτή τη δυναμική εξάπλωσης σε ακόμη περισσότερες περιοχές του πλανήτη.

Λέξεις Κλειδιά: Λειψυδρία, Νερό, Αφαλάτωση, Αντίστροφη Ωσμωση, Μembrάνες RO, SWRO

Abstract

Water scarcity is a critical problem for several parts of the world, which is escalating under the influence of global population growth and climate change. The technologies of desalination methods for the immediate production of fresh water are developing rapidly. The most dominant among these methods, is the method of desalination with reverse osmosis, as it is the most reliable and energy efficient technique. The present work focuses on the detailed presentation of the method of desalination with reverse osmosis, comparing it with other desalination techniques, and on the analysis of the factors that affect its economic and energy efficiency. At the same time, the present paper highlights the most modern technological advances related to the improvement of water desalination plants, from small to large scale. The rapid evolution of the reverse osmosis desalination technique allows for a steady reduction in the cost of freshwater production and offers this method the potential for spread to even more parts of the world.

Keywords: Water Leakage, Water, Desalination, Reverse Osmosis, RO Membranes, SWRO

Πίνακας Περιεχομένων

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Εισαγωγή | 6 |
| 1.1 | Το νερό και η σημασία του | 6 |
| 1.2 | Πηγές νερού και υδατικό στρες | 7 |
| 1.3 | Ζήτηση νερού | 11 |
| 1.4 | Η κλιματική αλλαγή επιβαρύνει το υδατικό στρες | 12 |
| 1.5 | Η λειψυδρία στον ελλαδικό χώρο | 13 |
| 1.6 | Τρόποι αντιμετώπισης..... | 15 |
| 1.6.1 | Μεταφορά νερού..... | 15 |
| 1.6.2 | Διατήρηση και επαναχρησιμοποίηση | 20 |
| 1.6.3 | Ανάπτυξη νέων πηγών γλυκού νερού..... | 23 |
| 2 | Αφαλάτωση | 26 |
| 2.1 | Ορισμός Αφαλάτωσης..... | 26 |
| 2.2 | Ιστορικά στοιχεία | 26 |
| 2.3 | Μέθοδοι αφαλάτωσης | 30 |
| 2.3.1 | Πολυβάθμια ακαριαία εκτόνωση (Multiple Stage Flashing, MSF)..... | 31 |
| 2.3.2 | Πολυβάθμια απόσταξη (Multiple-Effect Distillation, MED) | 32 |
| 2.3.3 | Εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών (Vapor Compression, VC ή MVC) | 32 |
| 2.3.4 | Ηλιακή απόσταξη (Solar distillation) | 34 |
| 2.3.5 | Αντίστροφη Ώσμωση (Reverse osmosis) | 35 |
| 2.3.6 | Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis, ED) | 36 |
| 2.4 | Σύγκριση τεχνολογιών αφαλάτωσης..... | 37 |
| 2.5 | Εφαρμογή της αφαλάτωσης σε παγκόσμιο επίπεδο..... | 39 |
| 2.6 | Εφαρμογή της αφαλάτωσης στον ελλαδικό χώρο | 43 |
| 2.7 | Κόστος..... | 47 |
| 3 | Αφαλάτωση με Αντίστροφη Ώσμωση..... | 50 |
| 3.1 | Αρχές λειτουργίας | 50 |
| 3.1.1 | Σύντομη ιστορική αναδρομή | 52 |
| 3.1.2 | Αφαλάτωση θαλασσινού νερού με αντίστροφη ώσμωση (SWRO) | 54 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.1.3 | Αφαλάτωση υφάλμυρου νερού με αντίστροφη ώσμωση (BWRO)..... | 54 |
| 3.2 | Ταξινόμηση υλικών και δομής των μεμβρανών | 55 |
| 3.2.1 | Συμβατικές μεμβράνες λεπτού συνθετικού υμένα..... | 55 |
| 3.2.2 | Μεμβράνες λεπτού νανο-συνθετικού υμένα..... | 56 |
| 3.2.3 | Μεμβράνες αρωματικού πολυαμιδίου (PA) | 57 |
| 3.2.4 | Μεμβράνες οξικής κυτταρίνης (CA) | 57 |
| 3.2.5 | Μεμβράνες με σπειροειδές μέσο | 58 |
| 3.2.6 | Μεμβράνες με κοίλες ίνες..... | 59 |
| 3.2.7 | Μεμβράνες με επίπεδα φύλλα | 60 |
| 3.3 | Άλλα πεδία εφαρμογής της μεθόδου..... | 61 |
| 3.3.1 | Φορητές συσκευές νερού με αντίστροφη ώσμωση..... | 61 |
| 3.3.2 | Παραγωγή εμφιαλωμένου μεταλλικού νερού..... | 62 |
| 3.3.3 | Καθαρισμός υδάτινων λυμάτων | 62 |
| 3.3.4 | Επεξεργασία του νερού των ενυδρείων | 63 |
| 3.3.5 | Επεξεργασία τροφίμων | 63 |
| 3.4 | Οικονομικά στοιχεία | 63 |
| 3.5 | Υβριδικά συστήματα αντίστροφης ώσμωσης με τη χρήση ΑΠΕ | 67 |
| 4 | Σχεδιασμός/Υπολογισμοί συστήματος Αντίστροφης Ώσμωσης..... | 71 |
| 4.1 | Προεργασία του αλατούχου νερού..... | 73 |
| 4.2 | Βασικές παράμετροι λειτουργίας συστημάτων Αντίστροφης Ώσμωσης..... | 75 |
| 4.3 | Είδη συστημάτων Αντίστροφης Ώσμωσης – Διάταξη μεμβρανών..... | 79 |
| 4.4 | Βήματα σχεδιασμού - Εξισώσεις | 84 |
| 4.4.1 | Εφαρμογή βημάτων σχεδιασμού για το νησί της Πάτμου..... | 90 |
| 4.5 | Τρέχοντα Προγράμματα..... | 94 |
| 4.5.1 | Περιβάλλον λογισμικού WAVE..... | 95 |
| 4.5.2 | Εφαρμογή του προγράμματος για το νησί της Πάτμου | 97 |
| 4.5.3 | Αποτελέσματα ανάλυσης..... | 102 |
| 5 | Συμπεράσματα: Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα..... | 108 |
| | Παράρτημα..... | 111 |
| | Βιβλιογραφία | 116 |

1 Εισαγωγή

1.1 Το νερό και η σημασία του

Η Γη είναι ο πιο πλούσιος σε νερό πλανήτης του ηλιακού μας συστήματος. Το νερό, ή οξειδάνιο κατά χημική ονοματολογία (H_2O), είναι η περισσότερο διαδεδομένη ανόργανη χημική ένωση στην επιφάνεια της Γης, αφού καλύπτει το 70,9% του πλανήτη μας (Central intelligence agency,2019), στο περιβάλλον του οποίου, το νερό υπάρχει στην αέρια κατάσταση (οπότε ονομάζεται υδρατμός), στην υγρή κατάσταση και στη στερεή κατάσταση (οπότε ονομάζεται πάγος) και χωρίς αυτό δεν μπορεί να υπάρξει ζωή όπως τη γνωρίζουμε. Το νερό είναι η μόνη συνηθισμένη ουσία που βρίσκεται με φυσικό τρόπο και στις τρεις κανονικές καταστάσεις της ύλης και είναι απαραίτητο σε όλες τις γνωστές μορφές ζωής (Ebbing,2011) στον πλανήτη μας. Οι άνθρωποι και τα ζώα έχουν στο σώμα τους 55-78% νερό (κατά βάρος), ενώ φθάνει μέχρι και το 90% εκείνου των κυττάρων. Το νερό στη Γη κινείται συνέχεια μέσω του «κύκλου του νερού» (Εικόνα 1). Καθώς το αλμυρό νερό των ωκεανών εξατμίζεται, το αλάτι μένει πίσω και το νερό μετακινείται στην ατμόσφαιρα. Έτσι, το νερό στα σύννεφα που τελικά πέφτει ως βροχή είναι γλυκό νερό. Ο υδρολογικός κύκλος παίζει έναν αναντικατάστατο ρόλο, όχι μόνο σε κάθε φάση της ανάπτυξης των φυτών και των ζώων, αλλά και σε όλα τα επίπεδα του πολιτισμού του ανθρώπου.



Εικόνα 1: Ο υδρολογικός κύκλος (<https://www.usgs.gov/media/images/water-cycle-greek>)

Το νερό συνδέεται στενά με την εξέλιξή μας, τον πολιτισμό μας και το πεπρωμένο μας. Το νερό συχνά φτιάχνει ή σπάει το πεπρωμένο μιας κοινότητας, μιας μητρόπολης ή ενός έθνους. Το άφθονο και υψηλής ποιότητας νερό προσκαλεί τον οικισμό, τις γεωργικές επιδιώξεις και τη βιομηχανική δραστηριότητα. Το νερό προωθεί το εμπόριο και παρέχει ενέργεια.

Η σημερινή ανάπτυξη του πολιτισμού, οι αλλαγές στις συνήθειες, αλλά και οι αυξημένες ανάγκες των κατοίκων των μικρών και μεγάλων αστικών κέντρων έχει δημιουργήσει τρομακτική ζήτηση βιομηχανικού και πόσιμου νερού. Η συνεχής αύξηση της ζήτησης σε νερό κατάλληλης ποιότητας οφείλεται στους εξής λόγους :

- Αύξηση του μόνιμου πληθυσμού και του βιοτικού επιπέδου
- Μεγάλες μετακινήσεις πληθυσμών σε μικρές χρονικές περιόδους (τουρισμός)
- Ανάπτυξη των αρδευόμενων καλλιεργουμένων εκτάσεων
- Χρήση μεγάλων ποσοτήτων στη βιομηχανία χωρίς εφαρμογή τεχνικών ανακύκλωσης ή επαναχρησιμοποίησης

Έτσι οι υπάρχοντες υδατικοί πόροι σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι επαρκείς για την κάλυψη της κατανάλωσης. Ακόμη κι αν είναι το νερό διαθέσιμο σε επαρκείς ποσότητες, δεν έχει τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά για τη χρήση που επιθυμείται. Συνεπώς απαιτείται κατεργασία ακόμη και του γλυκού νερού. Λαμβάνοντας υπόψη την τεράστια ποσότητα του θαλασσινού νερού και των υφάλμυρων υδατικών πόρων είναι λογική η προσπάθεια παραγωγής νερού κατάλληλης ποιότητας για συγκεκριμένη χρήση από τα θαλασσινά ή υφάλμυρα νερά.

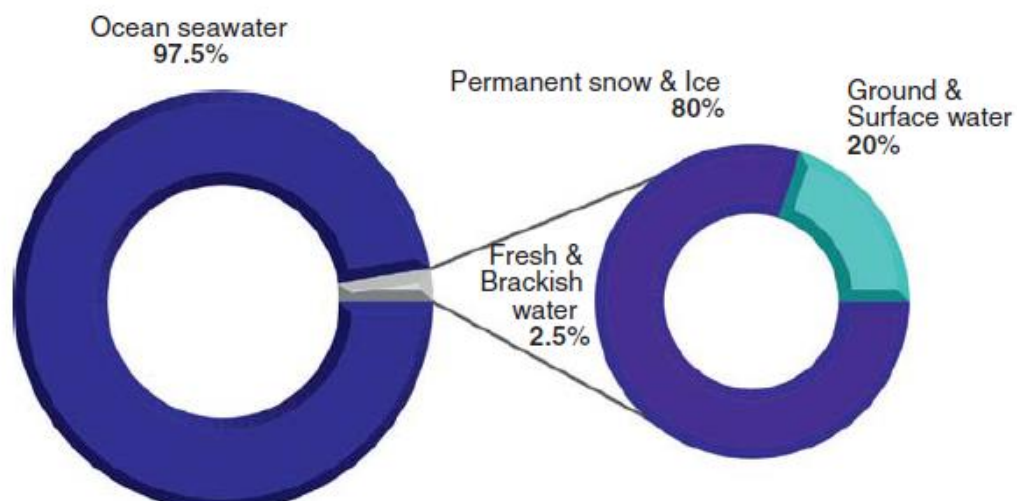
1.2 Πηγές νερού και υδατικό στρες

Η κατανομή του νερού στον κόσμο φαίνεται στην Εικόνα 2. Περισσότερο από το 97%, ή περίπου 1338 εκατομμύρια km³, του νερού του πλανήτη είναι θαλασσινό νερό (Maxwell, et al., 1998, Culp, 1991). Το ογδόντα τοις εκατό του υπόλοιπου νερού δεσμεύεται ως χιόνι σε μόνιμους παγετώνες ή ως παγωμένο νερό (Culp, 1991). Ως εκ τούτου, μόνο το 0,5% του ύδατος του πλανήτη είναι άμεσα διαθέσιμο ως υπόγεια ύδατα χαμηλής αλατότητας ή σε λίμνες ή ποτάμια για «άμεση» χρήση από τον άνθρωπο.

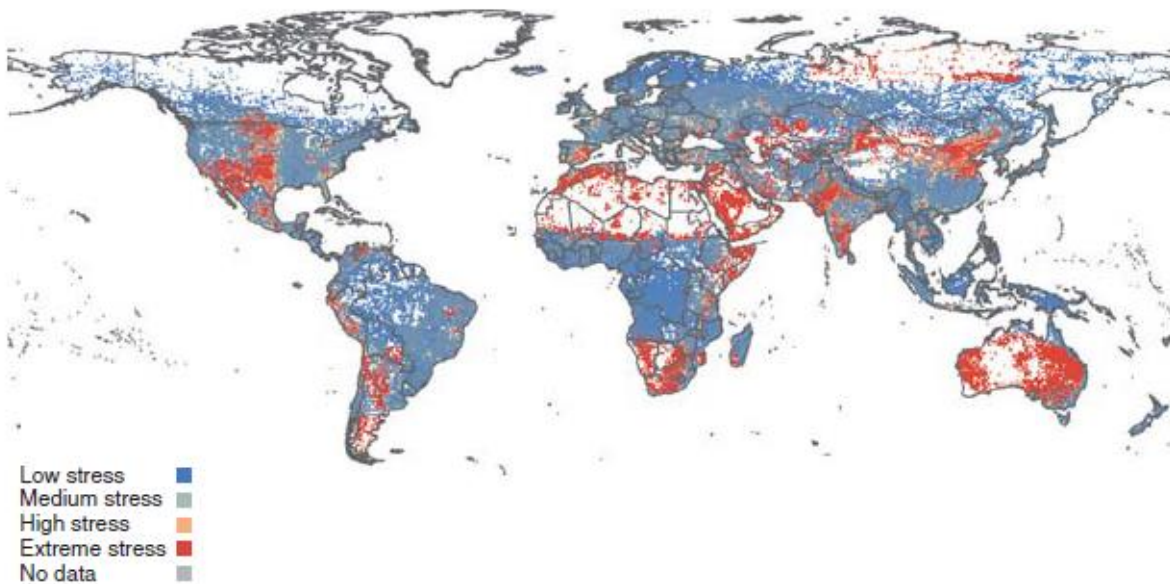
Στον παρακάτω Πίνακα 1 παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα στοιχεία της εικόνας 2:

Πίνακας 1: Εκτίμηση της παγκόσμιας κατανομής νερού (Πηγή: Gleick, P. H., 1996: Water resources. In Encyclopedia of Climate and Weather, ed. by S. H. Schneider, Oxford)

| Εκτίμηση της παγκόσμιας κατανομής νερού | | | |
|---|----------------------------------|----------------------|-------------------------|
| Μορφή Νερού | Όγκος νερού σε κυβικά χιλιόμετρα | Ποσοστό γλυκού νερού | Ποσοστό συνολικού νερού |
| Ωκεανοί, Θάλασσες & Κόλποι | 1.338.000.000 | -- | 96,5 |
| Παγόβουνα, Παγετώνες & Μόνιμο χιόνι | 24.064.000 | 68,7 | 1,74 |
| Υπόγειο Νερό | 23.400.000 | -- | 1,7 |
| Γλυκό | 10.530.000 | 30,1 | 0,76 |
| Αλμυρό | 12.870.000 | -- | 0,94 |
| Εδαφική Υγρασία | 16.500 | 0,05 | 0,001 |
| Εδαφικός πάγος & Μόνιμα παγωμένο έδαφος | 300.000 | 0,86 | 0,022 |
| Λίμνες | 176.400 | -- | 0,013 |
| Γλυκές | 91.000 | 0,26 | 0,007 |
| Αλμυρές | 85.400 | -- | 0,006 |
| Ατμόσφαιρα | 12.900 | 0,04 | 0,001 |
| Έλη | 11.470 | 0,03 | 0,0008 |
| Ποταμοί | 2.120 | 0,006 | 0,0002 |
| Βιολογικό Νερό | 1.120 | 0,003 | 0,0001 |
| Σύνολο | 1.386.000.000 | - | 100 |



Εικόνα 2: Κατανομή των υδάτινων πόρων στον κόσμο. (Πηγή: Kucera Jane, Desalination Water from water, 2014 by Scrivener Publishing LLC.)



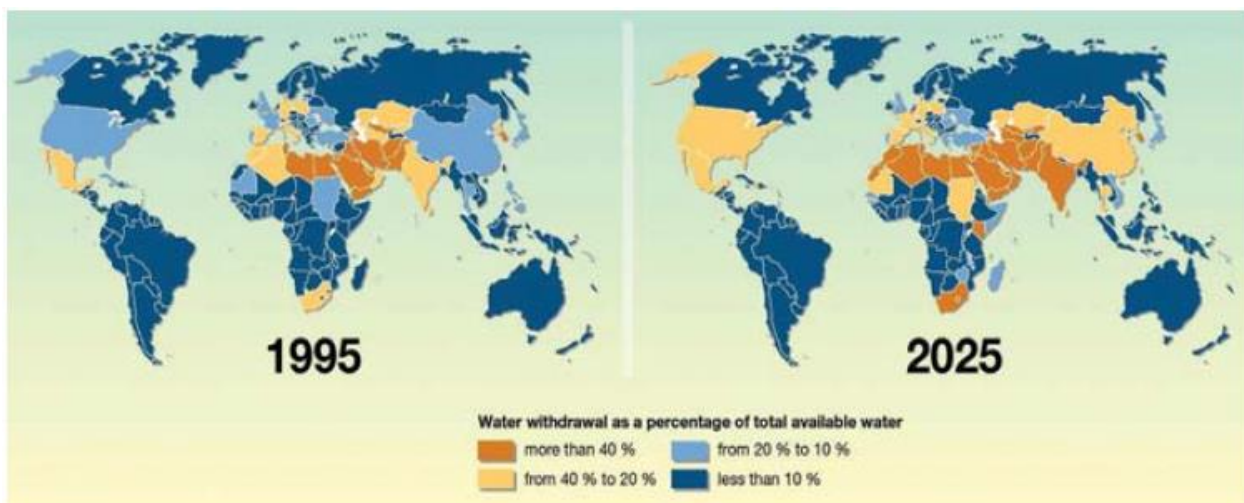
Εικόνα 3: Διαθεσιμότητα υδάτων για το 2011. (Water Stress Index 2011 by Maplecroft)

Ορισμένες περιοχές του κόσμου είναι ευλογημένες με αφθονία φρέσκου νερού. Αυτό περιλαμβάνει περιοχές με σχετικά χαμηλό πληθυσμό και εύκολη πρόσβαση στα επιφανειακά ύδατα, όπως η βόρεια Ρωσία, η Σκανδιναβία, η κεντρική και τις νότιες παράκτιες περιοχές της Νότιας Αμερικής και βόρεια Βόρεια Αμερική (Καναδάς, Αλάσκα) (Sandia National Laboratories, 2009, Mattson, 1979). Οι πιο πυκνοκατοικημένες περιοχές και οι περιοχές με αποπληρωμένη βιομηχανοποίηση αντιμετωπίζουν περισσότερο το υδατικό στρες (water stress), ιδιαίτερα όταν βρίσκονται σε ξηρές περιοχές. (Το υδατικό στρες μετριέται συνήθως με τη σύγκριση της ποσότητας νερού που χρησιμοποιείται με αυτό που είναι άμεσα διαθέσιμο.) Υπάρχουν πολλοί διαθέσιμοι χάρτες νερού που μετρούν και προβλέπουν τη μελλοντική υδάτινη καταπόνηση. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται ο δείκτης Water Stress Index 2011 από τον Maplecroft (Mattson, 1979), ο οποίος εκτιμά το υδατικό στρες, συγκρίνοντας τη χρήση του νερού με τις διαθέσιμες ανανεώσιμες πηγές σε περιοχές ανά τον κόσμο:

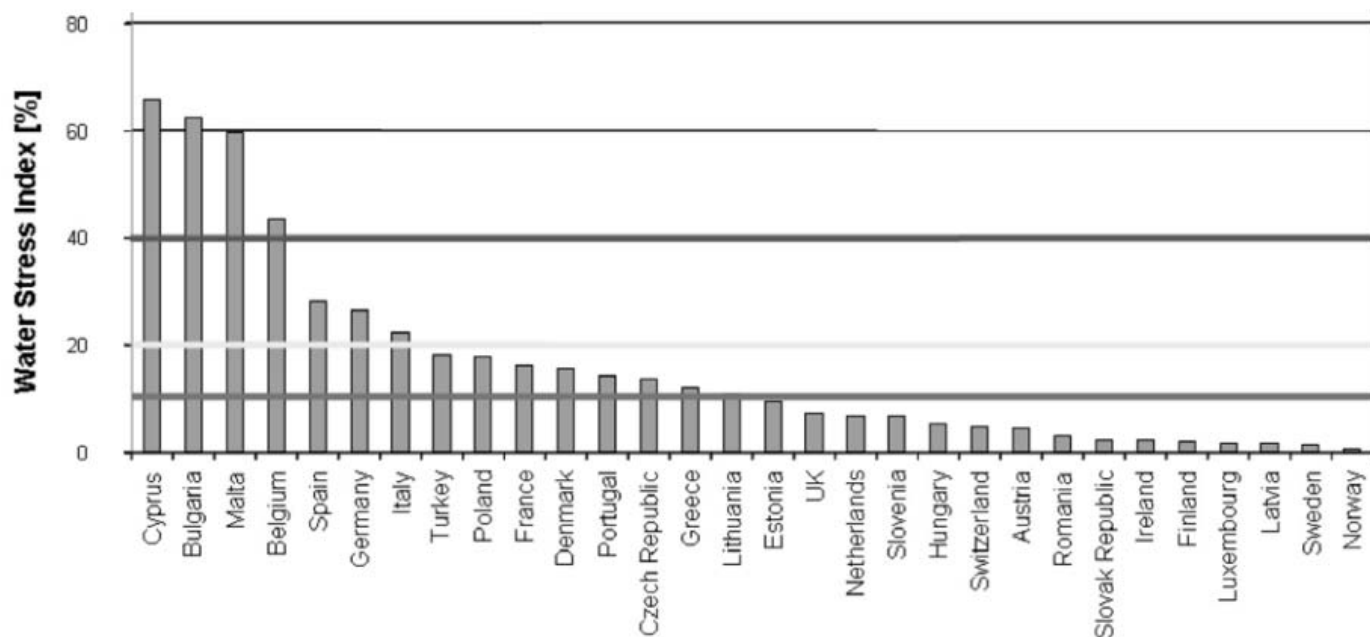
“Ο Δείκτης Υδατικού Στρες εκτιμά τον λόγο της συνολικής χρήσης του νερού (άθροισμα οικιακής, βιομηχανικής και γεωργικής ζήτησης) προς την ανανεώσιμη παροχή ύδατος, η οποία είναι η διαθέσιμη τοπική απορροή (βροχοπτώσεις λιγότερη εξάτμιση) όπως διανέμεται μέσω ρευμάτων, ποταμών και ρηχών υπόγειων υδάτων. Δεν περιλαμβάνει την πρόσβαση σε βαθείς υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες που συσσωρεύονται για αιώνες και χιλιετίες. Η εφαρμογή του δείκτη είναι μια στρατηγική επισκόπηση της τρέχουσας κατάστασης του φυσικού, υδατικού

στρες σε παγκόσμιο, ηπειρωτικό, περιφερειακό και εθνικό επίπεδο. Δεν λαμβάνει υπόψη οποιαδήποτε μελλοντική προβολή, πολιτικές διαχείρισης των υδάτων, όπως αφαλάτωση, ή την έκταση της επαναχρησιμοποίησης του νερού "(Mattson, 1979).

Οι περιοχές του κόσμου που δεν είναι πλούσιες σε υδάτινους πόρους και οι οποίες επίσης αντιμετωπίζουν μη σταθερή και ταχεία πληθυσμιακή ανάπτυξη και εκβιομηχάνιση, θα δουν το υδατικό στρες να αυξάνεται σημαντικά στο μέλλον. Η Εικόνα 4 συγκρίνει το παγκόσμιο υδατικό στρες το 1995 με αυτό που προβλέπεται για το 2025 (Altman et al., 2011). Μέχρι το 2025 θα αντιμετωπίσουν προβλήματα υδατικού στρες ή λειψυδρίας, 2,8 δισεκατομμύρια άνθρωποι. Έως το 2050, ο αριθμός αυτός θα μπορούσε να φθάσει τα 4 δισεκατομμύρια άτομα (Altman, et al., 2011). Οι περιοχές που έχουν υποστεί ζημιά στο νερό θα περιλαμβάνουν τις νότιες κεντρικές Ηνωμένες Πολιτείες, την Ανατολική Ευρώπη και την Ασία, ενώ η έλλειψη νερού θα βιωθεί στις Νοτιοδυτικές Ηνωμένες Πολιτείες, Βόρεια, Νότια και Ανατολική Αφρική, η Μέση Ανατολή και το μεγαλύτερο μέρος της Ασίας (Sandia National Laboratories, 2009).



Εικόνα 4: Παγκόσμιο υδατικό στρες και πρόβλεψη για το 2025.(Philippe Rekacewicz (Le Monde diplomatique), February 2006.)

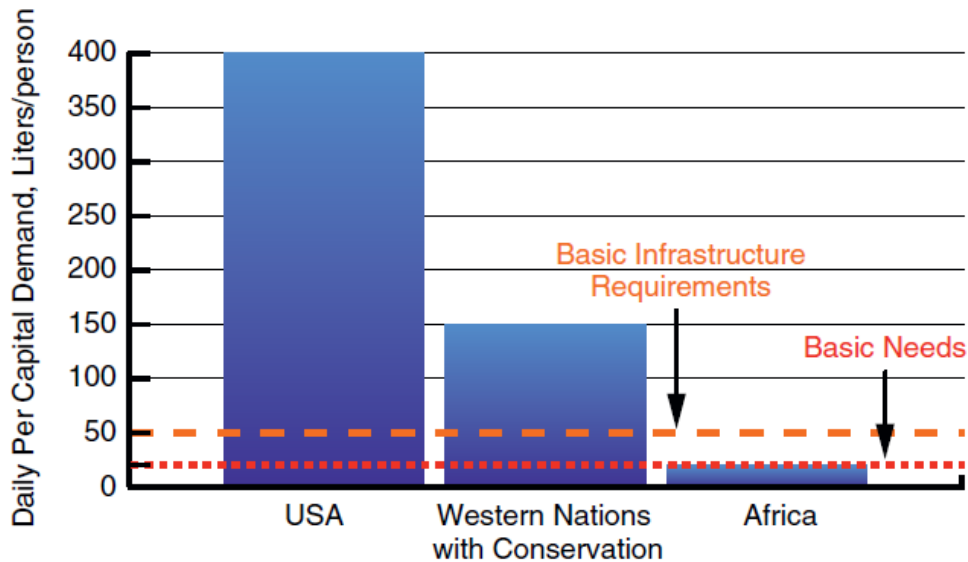


Εικόνα 5: Δείκτης υδάτινου στρες για τις ευρωπαϊκές χώρες. Οι ετήσιες εκτιμήσεις για το έτος 2000 (ή τα τελευταία διαθέσιμα στοιχεία) διαιρούνται με τη μακροχρόνια μέση ετήσια διαθεσιμότητα (Hochstrat. and Wintgen, 2003)

1.3 Ζήτηση νερού

Εκτός από την αύξηση του πληθυσμού, μια άλλη πίεση που ασκείται στην παροχή νερού είναι ότι η ζήτηση νερού κατά κεφαλήν αυξάνεται ταχύτερα από ότι ο ρυθμός αύξησης του πληθυσμού (Tripathi, et al., 2005). Σύμφωνα με την Global Water Intelligence (Singh, 2004), η ζήτηση νερού ανά κεφαλή ξεπέρασε την αύξηση του πληθυσμού κατά 2 φορές. Η ζήτηση νερού στα ανεπτυγμένα κράτη είναι σχετικά υψηλή. Η ζήτηση στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι περίπου 400 λίτρα (105 γαλόνια) ανά άτομο την ημέρα (Culp, 1991). Ορισμένες δυτικές χώρες που έχουν επιτύχει στην εφαρμογή μέτρων διατήρησης και επαναχρησιμοποίησης, έχουν δει την πτώση ζήτησης νερού στα περίπου 150 λίτρα (40 γαλόνια) ανά άτομο την ημέρα (Kalogirou, 1997) Ωστόσο, η περιορισμένη διαθεσιμότητα και η πρόσβαση σε νερό σε ορισμένα μέρη του κόσμου, έχει ως αποτέλεσμα πολύ χαμηλότερη κατανάλωση σε αυτές τις περιοχές. Για παράδειγμα, η κατά κεφαλήν κατανάλωση γλυκού νερού στην Αφρική είναι μόνο περίπου 20 λίτρα (5,3 γαλόνια) ημερησίως λόγω της έλλειψης κατάλληλου νερού (Kalogirou, 1997). Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (Π.Ο.Υ.) εκτιμά ότι 15 έως 20 λίτρα (4 - 5,3 γαλόνια) ανά άτομο ημερησίως είναι απαραίτητοι για την επιβίωση ενώ 50 λίτρα (13 γαλόνια) ανά άτομο ανά ημέρα εκτιμάται ότι χρειάζονται για τη λειτουργία βασικής υποδομής τα νοσοκομεία και τα

σχολεία (βλ. Εικόνα 5) (Culp, 1991). Ο Π.Ο.Υ. εκτιμά ότι μέχρι το 2025 η παγκόσμια ζήτηση για γλυκό νερό θα υπερβεί την προσφορά κατά 56% (Kalogirou, 1997).



Εικόνα 6: Παγκόσμια Ζήτηση Νερού και βασικές απαιτήσεις νερού από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας

1.4 Η κλιματική αλλαγή επιβαρύνει το υδατικό στρες

Ενώ η αύξηση του πληθυσμού και η κατά κεφαλήν αύξηση της ζήτησης είναι δύο παράγοντες που επιβαρύνουν το υδατικό στρες, δεν μπορεί να αγνοηθεί ο αντίκτυπος της κλιματικής αλλαγής στο παγκόσμιο υδατικό στρες. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής λειτουργούν ουσιαστικά συνεργατικά με την αύξηση του πληθυσμού και την αυξανόμενη ζήτηση για παροχή νερού καθώς ο πληθυσμός και η βιομηχανοποίηση αυξάνονται, η κλιματική αλλαγή επιταχύνεται, οδηγώντας σε πιο δραματικά κλιματικά φαινόμενα όπως η ξηρασία. Μια μελέτη του Εθνικού Κέντρου για την Ατμοσφαιρική Έρευνα (NCAR) δείχνει ότι η σοβαρή ξηρασία είναι μια πραγματική δυνατότητα για πολλές πολυπληθείς χώρες [10]. Οι περιοχές που αναμένεται να παρουσιάσουν σημαντική ξηρασία περιλαμβάνουν τις περισσότερες χώρες της Λατινικής Αμερικής, τις περιοχές της Μεσογείου, τη Νοτιοανατολική και Νοτιοδυτική Ασία, την Αφρική, τις Νοτιοδυτικές Ηνωμένες Πολιτείες και την Αυστραλία (Featherstone, 1984). Συμπτωματικά, πολλές από αυτές τις περιοχές θα παρουσιάσουν επίσης αύξηση του πληθυσμού και της εκβιομηχάνισης και της αστικοποίησης και την αντίστοιχη αύξηση της ζήτησης νερού κατά κεφαλήν. Τα Ηνωμένα Έθνη προβλέπουν ότι ο κόσμος θα έχει 27 πόλεις με πληθυσμό άνω

των 10 εκατομμυρίων μέχρι το 2020 και όλοι εκτός από τους 3, τη Νέα Υόρκη, τη Μόσχα και το Παρίσι, θα βρίσκονται σε περιοχές που απειλούνται με σημαντική ξηρασία (Featherstone, 1984).

1.5 Η λειψυδρία στον ελλαδικό χώρο

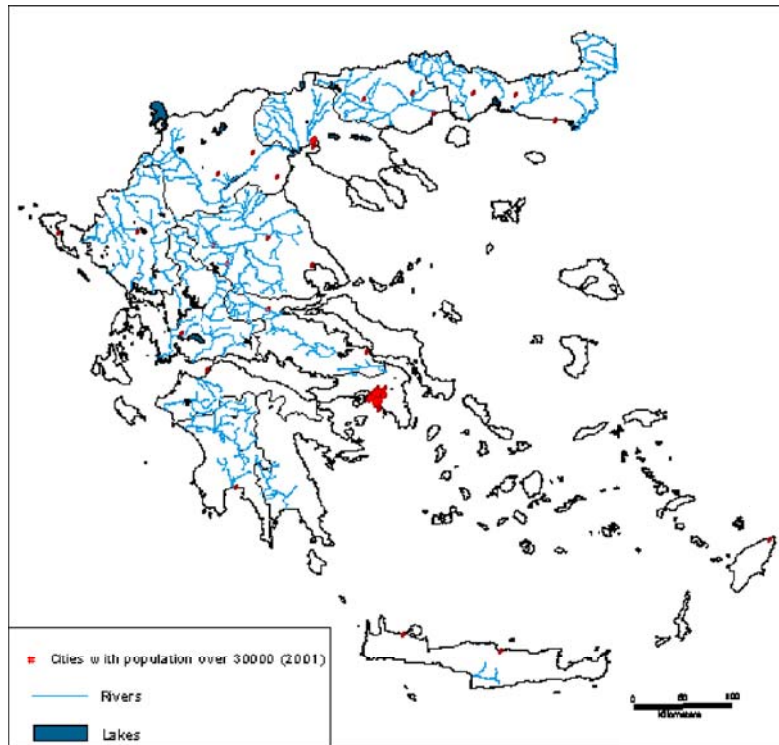
Η Ελλάδα, όπως εξάλλου και ολόκληρος ο πλανήτης, βρίσκεται τα τελευταία χρόνια αντιμέτωπη με το μείζον πρόβλημα της λειψυδρίας. Αν και διαθέτει το περισσότερο νερό από όλες τις χώρες της Μεσογείου, το πρόβλημα της λειψυδρίας εμφανίστηκε μετά από διαδοχικούς χειμώνες με ελάχιστες βροχές. Το 85% με 90% των υδατικών πόρων της χώρας είναι επιφανειακά νερά και το 10 με 15% υπόγεια νερά (Εικόνα 8). Στην Ελλάδα αξιοποιούνται κυρίως τα υπόγεια νερά με γεωτρήσεις. Η κατάσταση της λειψυδρίας οφείλεται σε μια σειρά από αίτια όπως: η έλλειψη σχεδιασμού, η κακή διαχείριση των υδατικών αποθεμάτων-πόρων, η καταστροφή των δασών και η μείωση των βροχοπτώσεων λόγω κλιματικών αλλαγών. Έως το 2100 προβλέπεται αύξηση της θερμοκρασίας έως και 2 βαθμούς Κελσίου και για τις βροχοπτώσεις σημαντική μείωση ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες, ενώ θα υπάρχει αστάθεια στην ένταση και τη συχνότητά τους. Αυτό θα οδηγήσει σε μείωση της γεωργικής παραγωγής, αποδυνάμωση του αγροτικού πληθυσμού και διαμάχες για τη χρήση του νερού. Η γεωργία χρησιμοποιεί στην Ελλάδα το 86% του νερού (11% για βιομηχανική χρήση και 3% για οικιακή), γεγονός που επηρεάζει τόσο την ποιότητα όσο και την ποσότητα των αποθεμάτων. Περίπου 13 εκατομμύρια στρέμματα αρδεύονται στη χώρα μας. Στα 7 εκατομμύρια από αυτά οι καλλιεργητές έχουν απόλυτη ελευθερία να ξοδεύουν νερό κατά βούληση. Στα υπόλοιπα το νερό για άρδευση ελέγχεται από τις αρμόδιες κεντρικές υπηρεσίες, αλλά διοχετεύεται μέσω παλαιών αρδευτικών δικτύων με αποτέλεσμα οι απώλειες νερού να φτάνουν το 40%. Το μέλλον φαίνεται άνυδρο τουλάχιστον με τα μέχρι στιγμής δεδομένα.

Η υπερβολική χρήση νερού προερχόμενου από γεωτρήσεις, για άρδευση αποτελεί κατασπατάληση και υπερεκμετάλλευση πολύτιμων και δύσκολα ανανεώσιμων πόρων. Σύμφωνα με εκτιμήσεις λειτουργούν στη χώρα μας περίπου 300.000 γεωτρήσεις (35-40% των οποίων παράνομες) αριθμός υπερβολικός για τις δυνατότητες των υπεδαφικών υδροφορέων. Η ανεξέλεγκτη εκμετάλλευση έχει σαν συνέπεια την μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και κυρίως την υφαλμύρωση τεράστιων παραθαλάσσιων εκτάσεων σε επίπεδα επικίνδυνα όχι μόνο για πόση αλλά και για γεωργικές χρήσεις. Εκτιμάται ότι η υφαλμύρωση υπερβαίνει τα 2.000.000 στρέμματα γεωργικής γης με οξυμμένα προβλήματα σε πολλές παράκτιες περιοχές του Αιγαίου (βλ. Εικόνα 7). Από τις περιοχές που κινδυνεύουν περισσότερο είναι η Θεσσαλία,

όπου καλλιεργούνται περίπου 5 εκατομμύρια στρέμματα και αρδεύονται τα μισά, το 70% των οποίων (περίπου 1.770.000 στρέμματα) από γεωτρήσεις, δηλαδή από τα υπόγεια νερά της. Ο υδροφόρος ορίζοντας της Θεσσαλίας έχει υποβαθμιστεί και η στάθμη του έχει πέσει δραματικά. Στον ταμιευτήρα Ταυρωπού υπάρχουν 175 εκατομμύρια κυβικά μέτρα νερό την ίδια στιγμή που πέρυσι υπήρχαν 200 εκατομμύρια κυβικά μέτρα. Η άρδευση των πεδιάδων στην Κεντρική Μακεδονία εξαρτάται από τα αποθέματα του ταμιευτήρα Πολυφύτου, που όμως είναι πολλαπλών χρήσεων: άρδευση των πεδιάδων Ημαθίας και Πέλλας, μέρους της πεδιάδας Θεσσαλονίκης, ύδρευση της Θεσσαλονίκης, για την ψύξη του λιγνιτικού κέντρου Πτολεμαΐδας και την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 7: Ζώνη υφαλμύρωσης στην Ελλάδα (Πηγή: www.geo.auth.gr)



Εικόνα 8: Επιφανειακά νερά στην Ελλάδα

1.6 Τρόποι αντιμετώπισης

1.6.1 Μεταφορά νερού

Η μετακίνηση των υδάτων από περιοχές πλούσιες σε νερό σε περιοχές με έλλειψη, ενώ ακούγεται ακραία, δεν είναι μια καινούρια ιδέα. Σημαντικό παράδειγμα η εκτροπή του νερού στην έρημο νοτιοδυτικά των Ηνωμένων Πολιτειών για πόση, ενέργεια και αρδευτικές χρήσεις. Το Λος Άντζελες εισάγει σήμερα το 85% της ζήτησης νερού από εξωτερικές πηγές: τα βουνά της Σιέρα Νεβάδα, το Δέλτα στη Βόρεια Καλιφόρνια, το Υδραγωγείο του Λος Άντζελες και το Υδραγωγείο του ποταμού Κολοράντο (Roulson, 2003).

Ωστόσο, το μετακινούμενο νερό δεν είναι πάντοτε ευχάριστο. Η δημόσια κατακραυγή από τη μετακίνηση του νερού από μια πλούσια σε νερό περιοχή μπορεί να αποτελέσει ένα τρομερό εμπόδιο. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί ο ποταμός Κολούμπια που βρίσκεται βορειοδυτικά στις Ηνωμένες Πολιτείες. "Το νερό είναι το πετρέλαιο του Όρεγκον", δήλωσε ο Ντέιβιντ Νέλσον, μέλος του γερουσιακού συμβουλίου του Όρεγκον, στη δημοσίευσή του το 2007, "ο Ποταμός Κολούμπια ως πηγή δημόσιων εσόδων." Η εκτροπή του ποταμού Κολούμπια σε άλλα δυτικά κράτη υπήρξε θέμα συζήτησης στην πολιτεία του Όρεγκον για πάνω από 35

χρόνια. Ωστόσο, μέχρι στιγμής, δεν έχουν προκύψει πολλά από τη συζήτηση αυτή, καθώς οι περιοχές με φτωχές υδάτινες πηγές στην περιοχή έχουν βρει άλλες πηγές για το νερό και οι κάτοικοι του Όρεγκον έχουν επανειλημμένα αρνηθεί να εγκαταλείψουν τα αποθέματα φθηνού γλυκού νερού που χρησιμεύουν επίσης ως πηγή για σχετικά φθηνή υδροηλεκτρική ενέργεια.

Η πολιτική μπορεί επίσης να διαδραματίσει κάποιο ρόλο στο πώς διαμοιράζεται το νερό. Στην Ισπανία, διάφορα πολιτικά κόμματα έχουν ανταγωνισμό για το πώς να προμηθεύουν τη νοτιοανατολική περιοχή της Ισπανίας με νερό. Το συντηρητικό κόμμα στην Ισπανία τάσσεται υπέρ της μεταφοράς νερού από τον ποταμό Έμπρο (ανατολικό ποτάμι του οποίου το δέλτα καταλήγει στη Μεσόγειο και είναι περίπου στο ήμισυ μεταξύ της Βαρκελώνης και της Βαλένθια) στην Κοινότητα της Βαλένθια, η οποία απέχει περίπου 200 χιλιόμετρα από το δέλτα. Το Σοσιαλιστικό Κόμμα στην εξουσία ανέθεσε την εγκατάσταση Μονάδας Αφαλάτωσης Θαλασσινού νερού Αντίστροφης Ώσμωσης (SWRO) στην Torrevieja (Torrevieja Seawater Reverse Osmosis), την 6η μεγαλύτερη εγκατάσταση SWRO στον κόσμο, η οποία βρίσκεται στο Αλικάντε του Δήμου Torrevieja, περίπου 75 χλμ. από τη Βαλένθια. Οι υποστηρικτές του έργου του ποταμού Έμπρο αρνήθηκαν την άδεια για την απόρριψη συμπυκνωμάτων από τη μονάδα SWRO, εμποδίζοντας έτσι την κατασκευή των αγωγών εισαγωγής και εκροής θαλασσινού νερού (Poulson, 2003). Η περιοχή της Βαλένθια έχει πάνω από 1.5 εκατομμύρια ανθρώπους με 4 ακόμη έργα SWRO που βρίσκονται σε εξέλιξη και ενδέχεται να αντιμετωπίσουν το ίδιο πολιτικό αδιέξοδο. (Kucera, 2014)

Στην Ελλάδα, η μεταφορά νερού με υδροφόρα πλοία, χρησιμοποιείται για την υδροδότηση των άνυδρων νησιών. Τα νησιά που συνήθως αναφέρονται ως άνυδρα ανήκουν στις Νομαρχίες Κυκλάδων και Δωδεκανήσου. Στις Κυκλάδες υδροδοτούνται με πλωτά μέσα τα νησιά Αμοργός, Κουφονήσια, Κίμωλος, Ηρακλεία, Σχοινούσα, Φολέγανδρος, Τήνος, Σίκινος, Θηρασιά και Δονούσα με προμήθεια νερού από το δίκτυο της Ε.ΥΔ.Α.Π. στην Αττική. Στα Δωδεκάνησα υδροδοτούνται με πλωτά μέσα τα νησιά Αγαθονήσι, , Μεγίστη, Νίσυρος, Πάτμος, Σύμη, Χάλκη, Παληόνησος, Πλάτυ, Φαρμακονήσια, Γρίγος, Αρκοί, Μαράθι, Ψέριμος, και Λέρος με προμήθεια νερού από τις Νομαρχιακές γεωτρήσεις της περιοχής Καλάθου Ρόδου ή σε περίπτωση αντίξοων συνθηκών από τη ΔΕΥΑ Ρόδου. Τα λεγόμενα άνυδρα νησιά είναι αυτά όπου η μικρή τους έκταση και οι γεωμορφολογικές συνθήκες που επικρατούν, δεν δημιουργούν ευνοϊκές προϋποθέσεις για την ύπαρξη ικανού νερού ποιοτικά και ποσοτικά από τοπικές πηγές για την κάλυψη των αναγκών τους. Οι αιτίες της λειψυδρίας είναι: τα μικρά ετήσια

Πίνακας 2: Συγκεντρωτικός πίνακας δαπανών και ποσοτήτων μεταφερόμενων ποσοτήτων νερού ανά έτος στις Ν.Α Κυκλάδες και τη Δωδεκάνησο

| ΕΤΟΣ | Ποσότητες κ.μ | Δαπάνες € (με ΦΠΑ) | Δαπάνη ανά κ.μ. | Ποσότητες κ.μ | Δαπάνες € (με ΦΠΑ) | Δαπάνη ανά κ.μ. | Ποσότητες κ.μ | Δαπάνες € |
|---------------|------------------|--------------------|-----------------|------------------|--------------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| 2002 | 329.343 | 2.561.278 36 | 7 78 | 617.745 | 3.109.358 65 | 5 03 | 947.088 | 5.670.637 01 |
| 2003 | 336.777 | 2.772.718 04 | 8 23 | 605.019 | 3.214.680 89 | 5 31 | 941.796 | 5.987.398 93 |
| 2004 | 338.812 | 2.787.235 66 | 8 23 | 759.737 | 4.034.203 29 | 5 31 | 1.098.549 | 6.821.438 95 |
| 2005 | 464.562 | 4.006.916 45 | 8 63 | 969.676 | 5.082.935 63 | 5 24 | 1.434.238 | 9.089.852 08 |
| 2006 | 567.719 | 4.677.686 54 | 8 24 | 1.005.338 | 4.905.044 06 | 4 88 | 1.573.057 | 9.582.730 60 |
| 2007 | 697.117 | 5.802.509 26 | 8 32 | 1.101.628 | 5.403.900 34 | 4 91 | 1.798.745 | 11.206.409 60 |
| 2008 | 687.731 | 5.721.921 92 | 8 32 | 1.141.724 | 5.765.706 20 | 5 05 | 1.829.455 | 11.487.628 12 |
| 2009 | 429.075 | 3.569.904 00 | 8 32 | 826.910 | 4.175.895 50 | 5 05 | 1.255.985 | 7.745.799 50 |
| 2010* | 263.241 | 2.590.291 44 | 9 84 | 340.426 | 3.349.791 84 | 9 84 | 603.667 | 5.940.083 28 |
| ΣΥΝΟΛΑ | 4.114.377 | 34.490.462 | | 7.368.203 | 39.041.516 | | 10.878.913 | 73.531.978 |

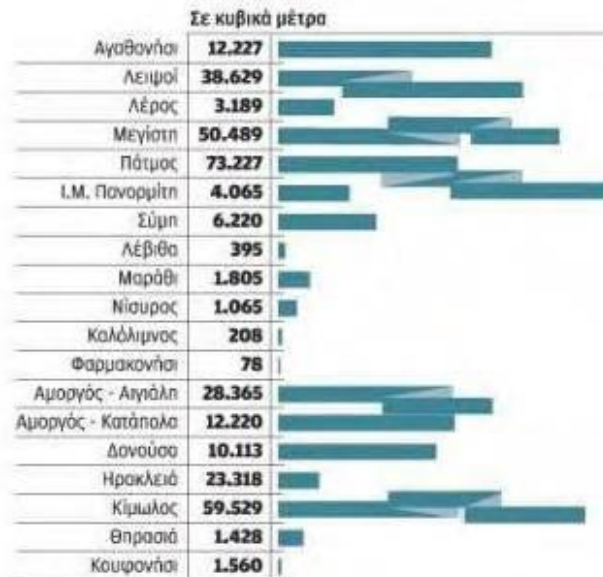
βροχομετρικά ύψη (π.χ., η Αμοργός έχει περίπου 350 χιλιοστά νερού βροχής τον χρόνο), οι υπόγειοι υδροφορείς δεν μπορούν εύκολα να συγκρατήσουν το νερό καθώς είναι μικροί και «ανοιχτοί» προς τη θάλασσα, μεγάλη εξάτμιση που οφείλεται στους ισχυρούς ανέμους και στη μεγάλη ηλιοφάνεια (Γιώργος Τσακίρης, καθηγητής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων στο ΕΜΠ). Με την εντατική άντληση νερού, εισρέει η θάλασσα, αλλοιώνοντας την ποιότητα του νερού και καταστρέφοντας τον υδροφορέα. Τα νησιά δεν είναι επίπεδα, έχουν έντονο ανάγλυφο και επομένως μεγάλες κλίσεις οπότε οι ροές είναι χειμαρρικές και το νερό φεύγει με μεγάλη ταχύτητα προς τη θάλασσα. Δεν υπάρχει φυτοκάλυψη. Το νερό δεν συγκρατείται ψηλά, ρέει, χάνεται. Αποτέλεσμα είναι να υπάρχουν προβλήματα στην κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη των νησιών αυτών και η υδροτροφοδοσία τους να γίνεται με μεταφορά νερού από υδροφόρα πλοία.

Ενδεικτικά παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας δαπανών και ποσοτήτων μεταφερόμενων ποσοτήτων νερού ανά έτος στις Ν.Α Κυκλάδες και τη Δωδεκάνησο όπως αναφέρεται στη σελίδα του υπουργείου Θαλασσίων Υποθέσεων, Νήσων και Αλιείας, Γενική Γραμματεία Αιγαίου και Νησιωτικής Πολιτικής [www.yprai.gr] για την Υδροδότηση Άνυδρων Νήσων.

Στις δαπάνες της Ν.Α. Κυκλάδων περιλαμβάνεται και η δαπάνη προμήθειας νερού από την ΕΥΔΑΠ καθώς και οι επισκευές μικροβλαβών στις παροχές της ΕΥΔΑΠ ποσά που πληρώνονται αυτοτελώς από το ΓΓΑΝΠ.

Όπως προκύπτει και από τον παραπάνω πίνακα το κόστος τις μεταφοράς του νερού από το 2002 έως το 2010 έχει αυξηθεί κατά 25% καθώς μάλιστα αυξάνονται οι απαιτήσεις σε ποσότητες νερού χρόνο με το χρόνο. Αυτός ο τρόπος παροχής νερού πέρα από τη μεγάλη οικονομική επιβάρυνση που επιφέρει στο κράτος (υπολογίζεται ότι την περίοδο 2014 έως 2016 η μεταφορά νερού σε άγονα νησιά Δωδεκανήσων και Κυκλάδων κόστισε στο κράτος 71 εκατομμύρια ευρώ), επιβαρύνει οικονομικά και τους κατοίκους των νησιών. Το υψηλό κόστος της μεταφοράς του νερού, μετακυλύετε στους πολίτες των νησιών πληρώνοντας έως και 10.5 ευρώ το κυβικό της κατανάλωσης, πέντε φορές δηλαδή πάνω από όσο το πληρώνουν οι κάτοικοι της ηπειρωτικής χώρα[5]. Καθίσταται λοιπόν σαφές πως η μεταφορά νερού αποτελεί μια δαπανηρή λύση στο πρόβλημα έλλειψης νερού. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα είναι η περίπτωση του Καστελόριζου όπως φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 8. Κατά μέσο όρο, μέσα στο έτος, μεταφέρονταν στο νησί 50.000 χιλ. κυβικά μέτρα νερού με την ιδιωτική υδροφόρα και η τιμή του κυβικού που πλήρωνε το Ελληνικό Δημόσιο, ήταν 10,30 ευρώ (πλέον ΦΠΑ), ενώ η δαπάνη της Γενικής Γραμματείας Αιγαίου και Νησιωτικής Πολιτικής ξεπερνούσε τις 600.000 ευρώ (με ΦΠΑ), ετησίως. Πλέον, μετά την έναρξη λειτουργίας δύο νέων μονάδων αφαλάτωσης, τον Απρίλιο του 2018, που θα παράγουν 400 κυβικά μέτρα νερού ημερησίως, ποσότητα που θα υπερκαλύπτει τις ημερήσιες ανάγκες των κατοίκων του νησιού, η τιμή προμήθειας, μετά τη λειτουργία των δύο αφαλατώσεων, θα είναι κατά μέσο όρο 2 ευρώ ανά κυβικό μέτρο ενώ η εταιρεία αφαλάτωσης που ανέλαβε, σύμφωνα με τους όρους σύμβασης, θα πληρώσει όλα τα έξοδα των μηχανισμών εγκατάστασης αφαλάτωσης αλλά και τα συνοδά έργα . Με την λειτουργία των νέων μονάδων αφαλάτωσης το Ελληνικό Δημόσιο θα έχει όφελος 80,58%. (Γιαννέλης, 2018)

Συνεπώς η λύση της μεταφοράς νερού έχει ουσιαστικά ένα σημαντικό κοινωνικό και οικονομικό κόστος και αποτελεί λύση προσωρινού μόνο χαρακτήρα.



Εικόνα 9: Ποσότητες νερού σε κυβικά μέτρα που μεταφέρθηκαν με υδροφόρα στα άνυδρα νησιά το 2016



Εικόνα 10: Ποσότητες νερού που μεταφέρθηκαν με υδροφόρα στο Καστελόριζο από το 2012 έως 2016 και κόστος σε ευρώ

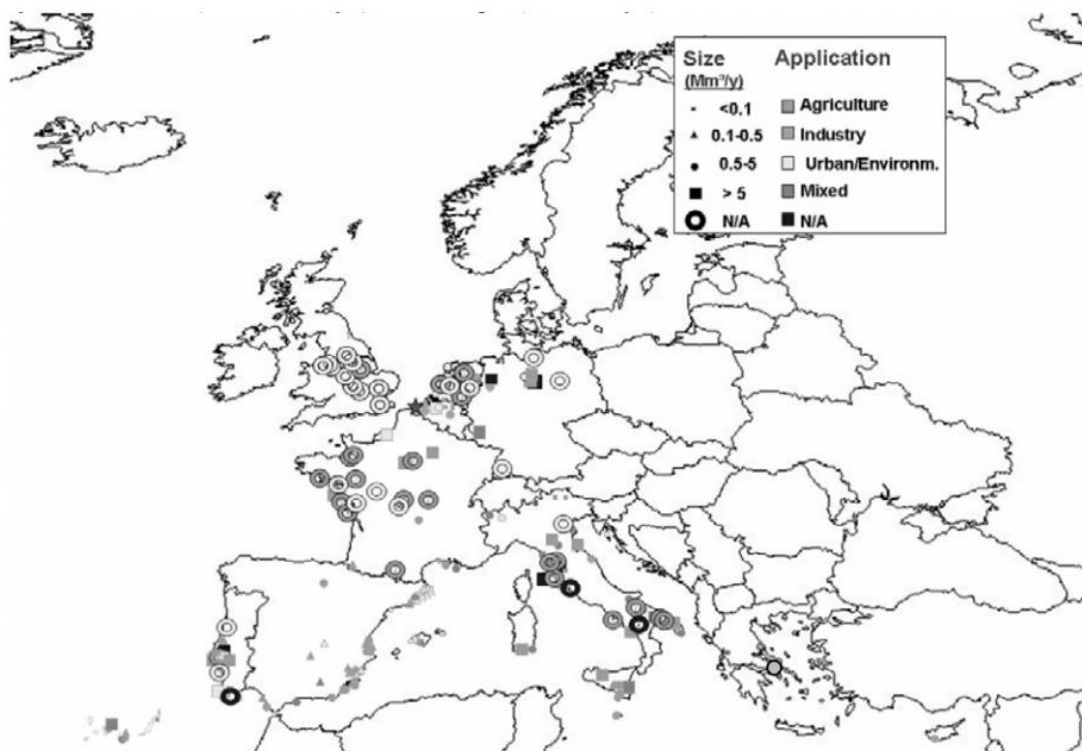
Ενώ οι μετακινήσεις γλυκού νερού έχουν νόημα σε ορισμένες περιπτώσεις, οι δημόσιες και πολιτικές πιέσεις καθώς και τα τεχνικά ζητήματα, όπως η μετακίνηση μεγάλων αποστάσεων στο νερό, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μεταβολές ανύψωσης, καθώς και τα υψηλά κόστη μεταφοράς και παροχής, δεν θα καταστήσουν τη μέθοδο αυτή εφικτή ή ακόμα ικανή να καλύψει όλες τις ανάγκες των περιοχών που χρειάζονται φρέσκο νερό.

1.6.2 Διατήρηση και επαναχρησιμοποίηση

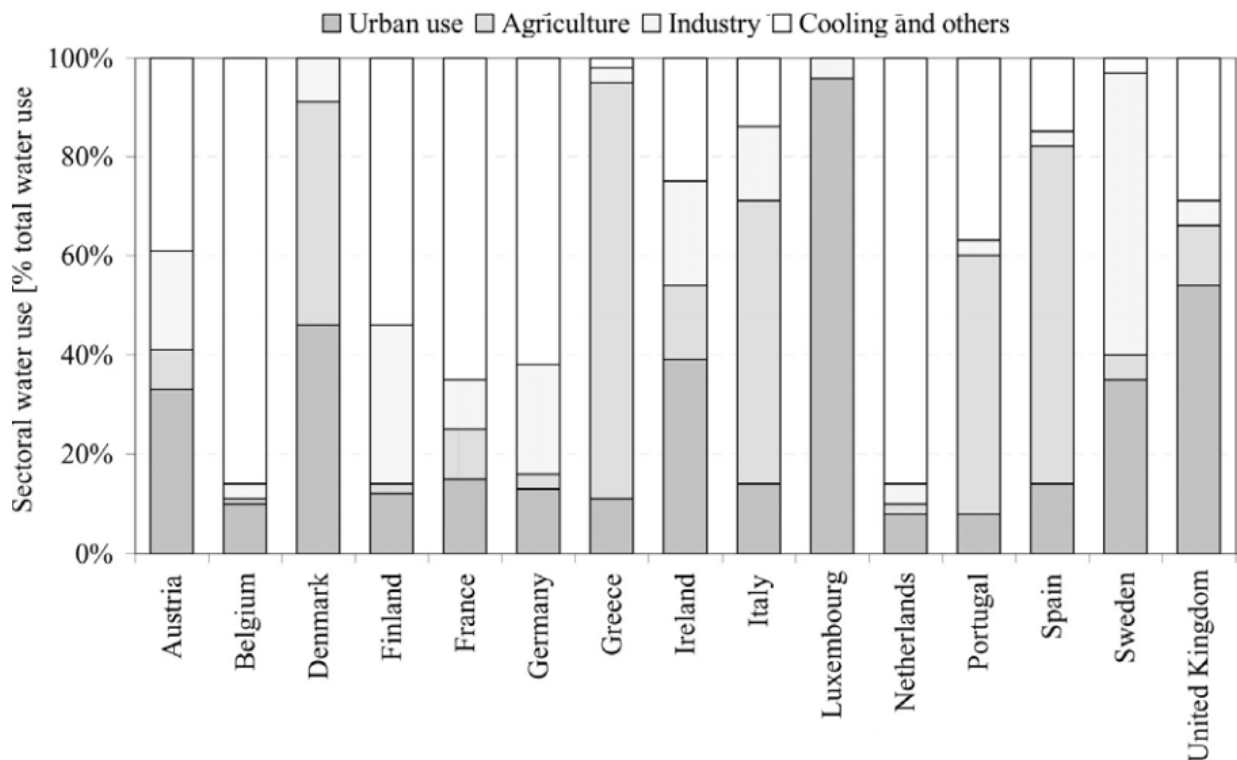
Η διατήρηση των υδάτων περιλαμβάνει όλες τις πολιτικές, τις στρατηγικές και τις δραστηριότητες για τη βιώσιμη διαχείριση των φυσικών πόρων γλυκού νερού, την προστασία της υδρόσφαιρας και την κάλυψη της τρέχουσας και μελλοντικής ανθρώπινης ζήτησης.

Οι στόχοι των προσπαθειών διατήρησης του νερού περιλαμβάνουν:

- Εξασφάλιση της διαθεσιμότητας νερού για τις μελλοντικές γενιές όπου η απόσυρση των γλυκών υδάτων από ένα οικοσύστημα δεν υπερβαίνει το φυσικό ρυθμό αντικατάστασης.
- Η εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς οι εγκαταστάσεις άντλησης, παροχής και επεξεργασίας λυμάτων, καταναλώνουν σημαντική ποσότητα ενέργειας. Σε ορισμένες περιοχές του κόσμου, πάνω από το 15% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας αφιερώνεται στη διαχείριση των υδάτων.
- Η διατήρηση των οικοτόπων, όπου ελαχιστοποιείται η χρήση ανθρώπινων υδάτων, συμβάλλει στη διατήρηση των ενδιαιτημάτων γλυκού νερού για την τοπική άγρια πανίδα και τα μεταναστευτικά υδρόβια πτηνά, αλλά και για την ποιότητα των υδάτων (Hermoso, et al., 2016).



Εικόνα 11: Αναγνωρίσιμα έργα επαναχρησιμοποίησης ύδατος στην Ευρώπη, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους και της προβλεπόμενης χρήσης τους



Εικόνα 12: Χρήση νερού στην Ευρώπη (European Environmental Agency, 1999)

Η εικόνα 11 δείχνει τη γεωγραφική κατανομή των αναγνωρίσιμων έργων επαναχρησιμοποίησης ύδατος στην Ευρώπη, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους και της προβλεπόμενης χρήσης τους. Οι περιοχές εφαρμογής χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες: α) γεωργία, β) βιομηχανία · γ) αστικές, ψυχαγωγικές και περιβαλλοντικές χρήσεις, συμπεριλαμβανομένης της επαναφόρτισης του υδροφόρου ορίζοντα · και δ) συνδυασμοί των παραπάνω (μικτές χρήσεις). Η κλίμακα των έργων χωρίζεται επίσης σε τέσσερις κατηγορίες: πολύ μικρά (<0,1 GL / y), μικρά (0,1-0,5 GL / y), μέσο (0,5-5 GL / y) (> 5 GL / y), μεγάλο. Μέρος της εξέλιξης σημειώθηκε στην ακτογραμμή και στα νησιά των ημίξηρων νότιων περιοχών και στις ιδιαίτερα αστικοποιημένες περιοχές των υγρότερων βόρειων περιοχών. Η εικόνα 11 δείχνει ότι η χρήση των αποκατεστημένων υδάτων είναι πολύ διαφορετική μεταξύ των δύο αυτών περιοχών: στη Νότια Ευρώπη, τα ανακυκλωμένα λύματα επαναχρησιμοποιούνται κυρίως για γεωργική άρδευση (44% των έργων) και για αστικές ή περιβαλλοντικές εφαρμογές (37% των έργων). Στη βόρεια Ευρώπη, οι χρήσεις είναι κυρίως για αστικές ή περιβαλλοντικές εφαρμογές (51% των έργων) ή για βιομηχανικές εφαρμογές (33% των έργων).

Η κατανομή του έργου αντανακλά αρκετά καλά την τομεακή χρήση νερού από τις διάφορες χώρες (εικόνα 12), με εξαίρεση τη Γαλλία. Η εξαίρεση αυτή μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η Γαλλία δημοσίευσε κατευθυντήριες γραμμές μόνο για τη γεωργική άρδευση (Bixio, et al., 2006).

Παρακάτω αναφέρονται πρακτικές ανακύκλωσης νερού που εφαρμόζονται σε κάποιες χώρες της Ευρώπης, σύμφωνα με το Δίκτυο « Μεσόγειος SOS » : (<https://www.watersave.gr/files/PDF/19ekp.pdf>)

- Στη Γαλλία, εδώ κι ένα περίπου αιώνα, τα χρησιμοποιημένα νερά της ευρύτερης περιοχής του Παρισιού ανακυκλώνονται και χρησιμοποιούνται στην άρδευση των καλλιεργειών των γύρω περιοχών. Η διαδικασία αυτή ήταν η μοναδική διαχείριση των χρησιμοποιημένων υδάτων της περιοχής ως το 1940. Στο προσεχές μέλλον, η διαδικασία αυτή αναμένεται να διακοπεί. Ωστόσο, σε άλλες περιοχές της Γαλλίας, 3000 εκτάρια (30 km²) αρδεύονται ήδη με ανακυκλωμένα νερά. Εθνικές προδιαγραφές σχετικά με την ποιότητα του ανακυκλωμένου νερού υπάρχουν από το 1991 και συμπληρώθηκαν το 1996.
- Στην Ιταλία σήμερα αρδεύονται με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα 4000 εκτάρια (40 km²), ενώ απροσδιόριστες είναι οι εκτάσεις στη Νότιο Ιταλία, που αρδεύονται με μη επεξεργασμένα ανακυκλωμένα νερά. Η επεξεργασία βασίζεται στις γενικές προδιαγραφές, που προβλέπει η ιταλική νομοθεσία για την ποιότητα των υδάτων.
- Επεξεργασμένο ανακυκλωμένο νερό χρησιμοποιείται σε πολλές περιοχές της Ισπανίας σε τέσσερις μορφές χρήσεων: πότισμα εγκαταστάσεων γκολφ, άρδευση καλλιεργειών, ενίσχυση του υδροφόρου ορίζοντα των παράκτιων περιοχών για την αποφυγή της εισδοχής θαλασσινού νερού σε αυτόν ή και την αύξηση της ροής των ποταμών, προκειμένου να προστατευτούν τα παραποτάμια οικοσυστήματα. Εθνικές προδιαγραφές δεν υπάρχουν, ωστόσο τρεις τοπικές κυβερνήσεις, η Ανδαλουσία, οι Βαlearίδες και η Καταλονία έχουν θεσπίσει προδιαγραφές.
- Στο Βέλγιο υφίσταται επεξεργασία και ανακυκλώνεται το 38% των χρησιμοποιημένων νερών, για να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικές δραστηριότητες. Στο άμεσο μέλλον αναμένεται το ποσοστό επεξεργασίας των χρησιμοποιημένων υδάτων να ανέλθει στο 60%. Η κυβέρνηση επεξεργάζεται εθνικές προδιαγραφές.
- Η ετήσια ποσότητα χρησιμοποιημένων νερών, στην Πορτογαλία, που υφίστανται επεξεργασία ανέρχεται σε 580 εκατομμύρια κυβικά μέτρα. Αντιστοιχεί στο 10% των αναγκών σε νερό για άρδευση μια χρονιά με πολύ μικρή ποσότητα βροχοπτώσεων.

- Η ανακύκλωση του χρησιμοποιημένου νερού στην Ολλανδία είναι περιορισμένη. Το ανακυκλωμένο νερό χρησιμοποιείται συνήθως, είτε από την Πυροσβεστική Υπηρεσία είτε διοχετεύεται στο έδαφος για την αποτροπή εισόδου θαλασσινού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα.
- Η επεξεργασία και ανακύκλωση των χρησιμοποιημένων νερών στο Ηνωμένο Βασίλειο είναι περιορισμένη. Το ανακυκλωμένο νερό χρησιμοποιείται, κυρίως, για τη διατήρηση της στάθμης των ποταμών και την προστασία των οικοσυστημάτων τους. Επίσης, χρησιμοποιείται για το πότισμα γηπέδων γκολφ και πάρκων ή για το πλύσιμο αυτοκινήτων.
- Στην Αυστρία, η ανακύκλωση των χρησιμοποιημένων νερών, λόγω της αφθονίας νερού υψηλής ποιότητας, περιορίζεται σε ορισμένους εξαιρετικά υδροβόρους τομείς της βιομηχανίας (π.χ. χαρτοβιομηχανίες, βιομηχανίες ζάχαρης), στους οποίους η νομοθεσία απαγορεύει την απεριόριστη κατανάλωση πόσιμου νερού.
- Η ανακύκλωση χρησιμοποιημένων νερών στη Γερμανία γίνεται, μόνο, όπου προκύπτουν λόγοι προστασίας του περιβάλλοντος.
- Η Κύπρος αντιμετωπίζει σοβαρό πρόβλημα νερού. Η εξοικονόμηση νερού μέσω της συλλογής και επαναχρησιμοποίησης νερού από βιολογικούς καθαρισμούς, αλλά και της επαναχρησιμοποίησης χρησιμοποιημένου νερού οικιακής χρήσης είναι μέρος της πολιτικής για την εξασφάλιση του πολύτιμου αυτού αγαθού.

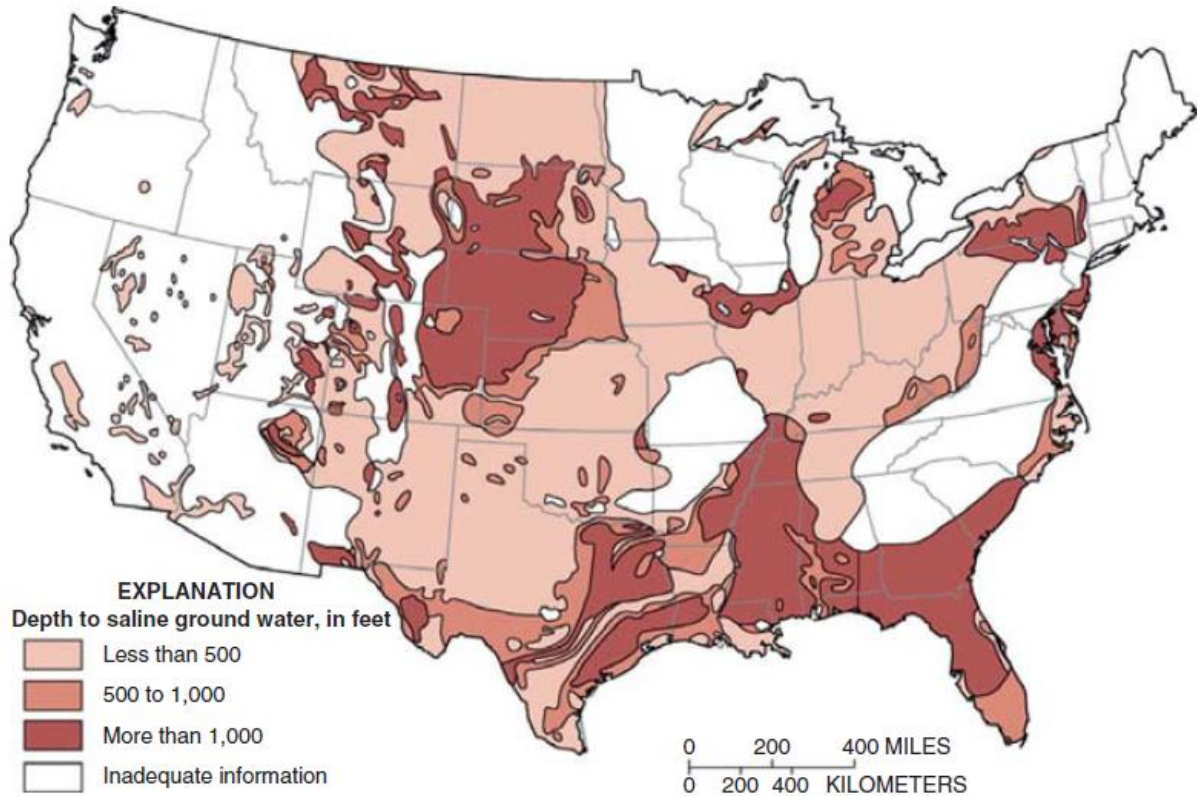
1.6.3 Ανάπτυξη νέων πηγών γλυκού νερού

Η ανάπτυξη πηγών γλυκού νερού, εκτός των παραδοσιακών πηγών, όπως είναι οι λίμνες, τα ποτάμια ή σχετικά ρηχά πηγάδια, είναι μια άλλη μέθοδος για την ικανοποίηση της ζήτησης για περισσότερο γλυκό νερό. Οι πιο λογικές νέες πηγές για την ανάπτυξη νέων παροχών γλυκού νερού είναι το θαλασσίνο νερό και τα βαθιά πηγάδια ή οι υδροφόροι ορίζοντες.

Το θαλάσσιο νερό αντιπροσωπεύει την πηγή τροφοδοσίας για την πλειοψηφία των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης στον κόσμο (58,85%) και η έκρηξη της ανάπτυξης μεγάλων εγκαταστάσεων θαλασσινού νερού είναι υπεύθυνη για την απότομη αύξηση της ικανότητας αφαλάτωσης από το 2003 (Heins, 2010). Οι περισσότερες από αυτές τις εγκαταστάσεις αναπτύχθηκαν στην περιοχή του Αραβικού Κόλπου, στην Αλγερία, στην Αυστραλία και στην Ισπανία. για παραθαλάσσιες και γενικά άνυδρες περιοχές όπως η ακτή του Περσικού Κόλπου και η Αυστραλία, όπου η στροφή προς τη θάλασσα για νερό είναι φυσικό.

Η παροχή θαλάσσιου νερού είναι κατάλληλη μόνο ως πηγή για τις παράκτιες περιοχές. Οι χερσαίες εκτάσεις θα πρέπει να βασίζονται σε πηγές όπως οι υδροφόροι ορίζοντες για νέα

υδροδότηση. Η εικόνα 13 δείχνει έναν χάρτη γεωλογικής έρευνας των Ηνωμένων Πολιτειών των υδροφορέων των ΗΠΑ. Ο χάρτης δημιουργήθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1960 και δεν έχει ενημερωθεί από την αρχική του δημοσίευση.



Εικόνα 13: Γεωλογικός χάρτης των υδροφορέων στις Ηνωμένες Πολιτείες, 1965

Σημειώστε ότι η σημερινή δραστηριότητα που αφορά τους υδροφόρους ορίζοντες επικεντρώνεται στη χρήση τους ως αποθέματος αερίων θερμοκηπίου, κυρίως διοξειδίου του άνθρακα, και όχι ως πηγών γλυκού νερού (Heins, et al., 2005). Αυτό οφείλεται πιθανότατα στην ανάγκη επεξεργασίας του νερού για την παραγωγή γλυκού νερού από το αλατούχο, σε αντίθεση με τη σχετική ευκολία της έγχυσης αερίων θερμοκηπίου, μιας διαδικασίας που δεν απαιτεί επεξεργασία, στους υδροφόρους ορίζοντες.

Πίνακας 3: Ταξινόμηση των υδάτων των πηγών ως συνάρτηση των ολικών διαλυμένων στερεών (TDS).
 * Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (Costa, McCabe,2009)

| Source Water | Total Dissolved Solids (ppm) | Classification |
|-----------------|------------------------------|-----------------------------|
| Drinking Water* | < 500 | Fresh |
| Fresh | < 1,000 | Fresh |
| Brackish | 1,000 – 5,000 | Mildly Brackish |
| | 5,000 – 15,000 | Moderately Brackish |
| | 15,000 – 35,000 | Heavily Brackish / Seawater |
| Seawater | 35,000 | Standard Average Seawater |
| | 35,000 – 45,000 | Seawater |

Το νερό της θάλασσας και άλλων αλατούχων πηγών αποτελούν ευκαιρία για να ικανοποιήσουν τις αυξανόμενες ανάγκες του νερού στον κόσμο. Ο πίνακας 3 παραθέτει την ταξινόμηση των υδάτων ως συνάρτηση της αλατότητας (σημειώστε ότι οι αλατούχοι υδροφορείς γενικά θεωρούνται ότι είναι τουλάχιστον μέτρια υφάλμυροι). Σύμφωνα με αυτές τις προδιαγραφές, ακόμη και το «φρέσκο» νερό με υψηλότερη αλατότητα θα απαιτούσε επεξεργασία, για πόση ή βιομηχανική χρήση, για τη μείωση της συγκέντρωσης διαλυμένων μεταλλικών στοιχείων. Συνεπώς, οι τεχνικές αφαλάτωσης είναι και πάλι απαραίτητες για τη δημιουργία νερού υψηλής ποιότητας από νερό, το οποίο, χωρίς επεξεργασία, δεν είναι κατάλληλο για άμεση χρήση.

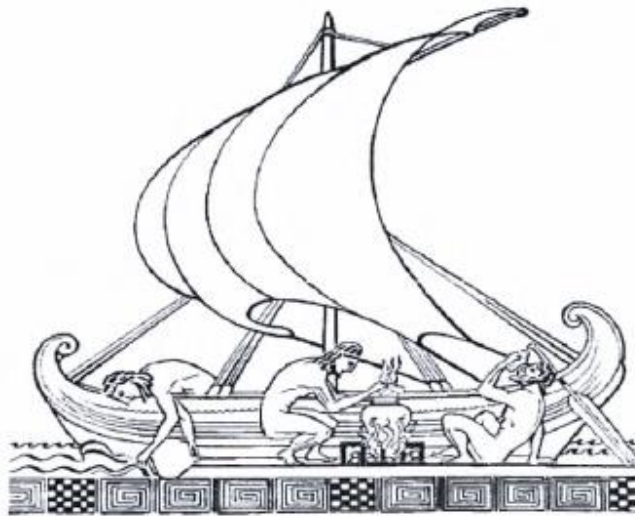
2 Αφαλάτωση

2.1 Ορισμός Αφαλάτωσης

Η αφαλάτωση μπορεί να οριστεί ως η διαδικασία της αφαίρεσης των διαλυμένων στερεών, κυρίως διαλυμένων αλάτων και άλλων ανόργανων ουσιών, από το νερό (θαλασσινό ή υφάλμυρο). Σκοπός της αφαλάτωσης είναι η παραγωγή πόσιμου νερού μειώνοντας τη συγκέντρωση των ολικών διαλυμένων στερεών (TDS) στα επιτρεπτά επίπεδα ορίων. Η αφαλάτωση εμφανίζεται φυσικά στον υδρολογικό κύκλο καθώς το νερό εξατμίζεται από τους ωκεανούς και τις λίμνες σχηματίζοντας τα σύννεφα και την βροχόπτωση, απαλλαγμένα από τα διαλυμένα στερεά (National Academy of Sciences, 2004).

2.2 Ιστορικά στοιχεία

Η αφαλάτωση είναι γνωστή στην ιστορία για χιλιετίες, τόσο ως έννοια όσο και ως μεταγενέστερη πρακτική, αν και σε περιορισμένη μορφή. Ιστορικά η ιδέα της αφαλάτωσης ανάγεται στους αρχαίους Έλληνες ναυτικούς που την εφάρμοζαν κατά τον 4ο π.Χ. αιώνα με την εξάτμιση του θαλασσινού νερού (Εικόνα 14), που την περιγράφει και ο αρχαίος Έλληνας φιλόσοφος Αριστοτέλης. Ο Αριστοτέλης παρατήρησε στο έργο του «Μετεωρολογία» ότι «το αλμυρό νερό, όταν μετατρέπεται σε ατμό, γίνεται γλυκό και ο ατμός δεν σχηματίζει ξανά αλατούχο ύδωρ όταν συμπυκνώνεται» και επίσης παρατήρησε ότι ένα κεραμικό αγγείο θα κρατούσε πόσιμο νερό, αφού έχει παραμείνει για μεγάλο χρόνο θαλασσινό νερό, έχοντας ενεργήσει ως μεμβράνη για να φιλτράρει το αλάτι. (Aristotle, et al., 1931) Υπάρχουν πολλά άλλα παραδείγματα πειραματισμού στην αφαλάτωση σε όλη την αρχαιότητα και τον Μεσαίωνα (Joseph Needham, 1980), αλλά η αφαλάτωση δεν ήταν ποτέ εφικτή σε μεγάλη κλίμακα μέχρι τη σύγχρονη εποχή.



Εικόνα 14: Ναυτικοί παράγουν φρέσκο νερό με απόσταξη θαλασσινού νερού (Καλογίρου, 2005)

Οι συσκευές αφαλάτωσης που βασίζονται στην εξάτμιση προτάθηκαν αιώνες πριν, αλλά μόλις τον 16ο αιώνα ενσωματώθηκαν σε πλοία, επιτρέποντάς τα να είναι αυτόνομα σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Πριν από τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, τα συστήματα αφαλάτωσης που βασίζονται στην εξάτμιση χρησιμοποιούνταν συνήθως σε πλοία που διέσχιζαν τους ωκεανούς σε μακρινά διατλαντικά ταξίδια. Μετά το τέλος του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου άρχισε να εκδηλώνεται τεράστιο ενδιαφέρον για την αφαλάτωση το οποίο προήλθε από την ραγδαία αύξηση της ζήτησης τόσο σε αστικές αλλά και σε αγροτικές περιοχές. Η αύξηση επίσης της βιομηχανίας συντέλεσε στην ολοένα και αυξανόμενη απαίτηση για την εξεύρεση νέων πηγών νερού και την προώθηση της αφαλάτωσης σε αλμυρά ή και υφάλμυρα νερά. Έτσι με πρωτοπόρο τις ΗΠΑ στην έρευνα με κυβερνητικές και ιδιωτικές πρωτοβουλίες έγιναν σημαντικά επιτεύγματα στο τομέα της αφαλάτωσης.

Η πρώτη μεγάλης κλίμακας σύγχρονη διαδικασία αφαλάτωσης που εμφανίστηκε ήταν η πολυβάθμια ακαριαία εκτόνωση (Multiple Stage Flashing , MSF) κατά τα μέσα του 20ού αιώνα στις ΗΠΑ (1955). Επιπλέον, παρόλο που η πολυβάθμια απόσταξη (Multiple Effect Distillation , MED) είχε ανακαλυφθεί και είχε τη δυνατότητα να είναι πιο αποτελεσματική από την MSF, χρειάστηκε λίγος χρόνος για να καταστεί αποτελεσματική σε βιομηχανική κλίμακα και αυτό δεν συνέβη μέχρι το 1959 όταν η πρώτη μονάδα αφαλάτωσης MED κατασκευάστηκε στην Αρούμπα. Η εταιρεία νερού και ηλεκτρικής ενέργειας της Αρούμπα, WEB Aruba, παράγαγε πόσιμο νερό για το νησί από το 1932 και βιομηχανικό νερό από το 1958 για το εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας και νερό επεξεργασίας για το διυλιστήριο πετρελαίου. (Εικ.15)



200 m³/day MED's (1932-1958)



2000 m³/day MED's (1958-1983)

Εικόνα 15: Μονάδες αφαλάτωσης πολυβάθμιας απόσταξης (MED) στην Αρούμπα από το 1932 μέχρι το 1983 (Marchena, 2018)

Το επόμενο έτος, 1960, η πρώτη συνθετική και λειτουργική μεμβράνη αντίστροφης ώσμωσης παρήχθη στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια, κατασκευασμένη από οξική κυτταρίνη. Αυτή η μεμβράνη ήταν ικανή να μπλοκάρει τα άλατα ενώ επιτρέπει στο νερό να περάσει μέσα από αυτό σε ένα λογικό ρυθμό ροής υπό υψηλή πίεση. Στην αντίστροφη ώσμωση, η πίεση είναι η κινητήρια δύναμη στη διαδικασία διαχωρισμού και η υδραυλική πίεση πρέπει να υπερβαίνει την οσμωτική πίεση του νερού που πρόκειται να αφαλατωθεί.

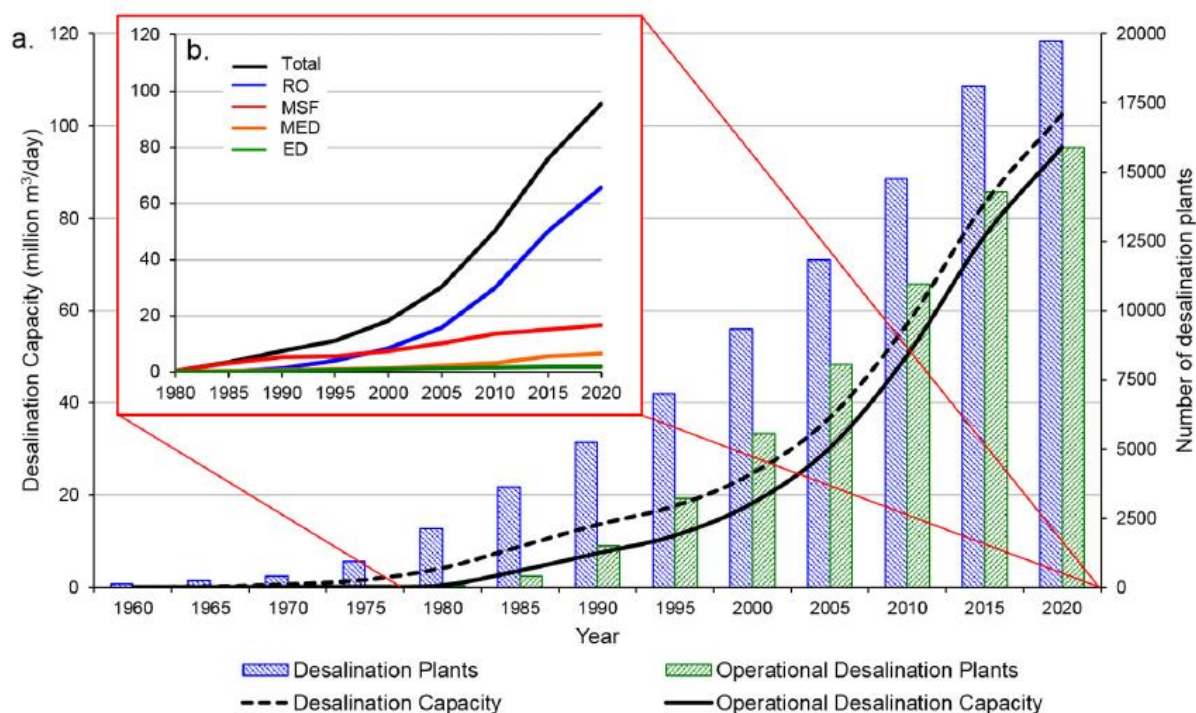
Αυτή η εφεύρεση σηματοδότησε την έναρξη ενός αγώνα στις τεχνολογίες αφαλάτωσης μεμβράνης και η πρώτη εμπορική μονάδα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση εγκαινιάστηκε στην Καλιφόρνια το 1965, στο εργοστάσιο αφαλάτωσης Coalinga, που χρησιμοποιήθηκε για υφάλμυρο νερό. Χρειάστηκαν άλλα εννέα χρόνια για να τεθεί σε λειτουργία το πρώτο εργοστάσιο αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης θαλάσσιου νερού, το 1974 στις Βερμούδες. Στην Ισπανία, το πρώτο εργοστάσιο αφαλάτωσης κατασκευάστηκε στο Lanzarote το 1964.

Η θερμική αφαλάτωση και η αφαλάτωση μεμβράνης έχουν εξελιχθεί από τότε ως προς την αναζήτηση μεγαλύτερης ενεργειακής απόδοσης και χαμηλότερου κόστους με βάση τις τεχνολογικές εξελίξεις, τις οικονομίες κλίμακας και τη βελτιστοποίηση των διαφορετικών διαδικασιών αφαλάτωσης που χρησιμοποιούνται.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 16, πριν από τη δεκαετία του 1980, το 84% του συνολικού αφαλατωμένου νερού παρήχθη από τις δύο μεγάλες θερμικές τεχνολογίες (MSF, MED). Η άνοδος της χρήσης των τεχνολογιών μεμβράνης μετά το 1980, ιδίως της αντίστροφης ώσμωσης, μετατόπισε σταδιακά την κυριαρχία από τις θερμικές τεχνολογίες. Το 2000, οι όγκοι

του αφαλατωμένου νερού που παρήχθησαν από θερμικές τεχνολογίες (κυριαρχούσαν οι MSF) και από αντίστροφη ώσμωση ήταν περίπου ίσοι στα 11,6 εκατομμύρια m³/ημέρα και 11,4 m³/ημέρα αντίστοιχα, αντιπροσωπεύοντας μαζί το 93% του συνολικού όγκου του παραγόμενου αφαλατωμένου νερού (Εικ. 16β). Από το 2000, τόσο ο αριθμός όσο και η ικανότητα των εργοστασίων ΑΩ αυξήθηκε εκθετικά, ενώ οι θερμικές τεχνολογίες παρουσίασαν μόνο οριακές αυξήσεις (Εικ. 16β).

Υπολογίζεται ότι, επί του παρόντος, περισσότερο από το 60% της εγκατεστημένης χωρητικότητας χρησιμοποιεί τεχνολογία αντίστροφης ώσμωσης (Εικ. 16), και συγκεκριμένα η τρέχουσα παραγωγή αφαλατωμένου νερού από αντίστροφη ώσμωση ανέρχεται τώρα στα 65,5 εκατομμύρια m³/ημέρα, αντιπροσωπεύοντας το 69% του όγκου του παραγόμενου αφαλατωμένου νερού και ο λόγος αυτός αναμένεται να συνεχίσει να αυξάνεται τα επόμενα χρόνια, καθώς η αντίστροφη ώσμωση έχει αποδειχθεί ότι είναι μια αξιόπιστη και πιο ενεργειακά αποδοτική τεχνική από τις διαδικασίες θερμικής αφαλάτωσης (Buenaventura, 2015).



Εικόνα 16: Τάσεις στην παγκόσμια αφαλάτωση κατά (α) αριθμό και δυναμικότητα των συνολικών και λειτουργικών εγκαταστάσεων αφαλάτωσης και (β) λειτουργική ικανότητα ανά τεχνολογία αφαλάτωσης. (Jones, 2019)

2.3 Μέθοδοι αφαλάτωσης

Η αφαλάτωση μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές. Τα συστήματα αφαλάτωσης διακρίνονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες: σε μεθόδους που περιλαμβάνουν αλλαγή φάσης (θερμικές διεργασίες) και σε μεθόδους στις οποίες οι διεργασίες πραγματοποιούνται σε μία μόνο φάση, την υγρή (διεργασίες μεμβρανών) (Εικ. 17).

Στις θερμικές διεργασίες το νερό εναλλάσσεται από την υγρή στην αέρια φάση κι αντίστροφα έως ότου συμπυκνωθεί ξανά σε υγρή μορφή, απαλλαγμένο από τα άλατα του αρχικού διαλύματος. Αυτό επιτυγχάνεται κυριότερα με την απόσταξη αλλά και με την λιγότερο διαδεδομένη κρυστάλλωση. Στις θερμικές διεργασίες ανήκουν οι:

- ο Πολυβάθμια ακαριαία εκτόνωση (Multiple Stage Flashing, MSF)
- ο Πολυβάθμια απόσταξη (Multiple Effect Distillation MED)
- ο Εξάτμιση με συμπίεση ατμών (Vapor Compression VC)
- ο Ηλιακή απόσταξη (Solar Distillation).

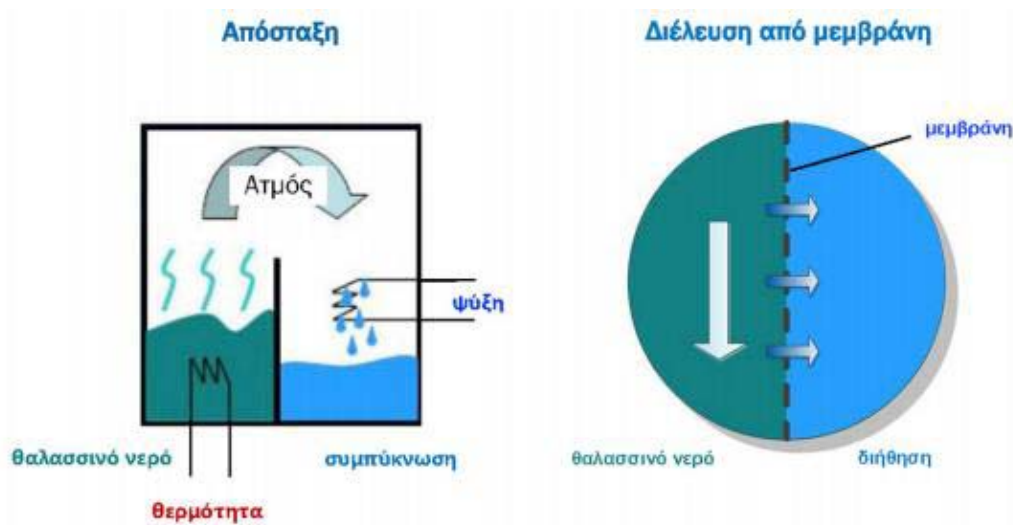
Στην δεύτερη κατηγορία, στην οποία το νερό παραμένει αποκλειστικά στην υγρή φάση, εντάσσονται οι παρακάτω υποκατηγορίες:

- ο Αντίστροφη ώσμωση (reverse osmosis, RO)
- ο Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis, ED).

Όλες οι διεργασίες απαιτούν μια χημική προεπεξεργασία του ακατέργαστου θαλασσινού νερού για να αποφευχθεί η έμφραξη των μεμβρανών (scaling) , ο αφρισμός, η διάβρωση, η βιολογική ανάπτυξη μικροοργανισμών και η ρύπανση (fouling) και επίσης απαιτείται χημική μετεπεξεργασία.

Στις διεργασίες αλλαγής φάσης ή θερμικές, η απόσταξη του θαλασσινού νερού επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας πηγής θερμικής ενέργειας. Η θερμική ενέργεια μπορεί να ληφθεί από συμβατική πηγή ορυκτών καυσίμων, πυρηνική ενέργεια ή από μη συμβατική πηγή ηλιακής ενέργειας ή γεωθερμική ενέργεια. Στις διεργασίες μεμβράνης, η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται είτε για την οδήγηση αντλιών υψηλής πίεσης είτε για ιονισμό αλάτων που περιέχονται στο θαλασσινό νερό. (Kalogirou, 2005)

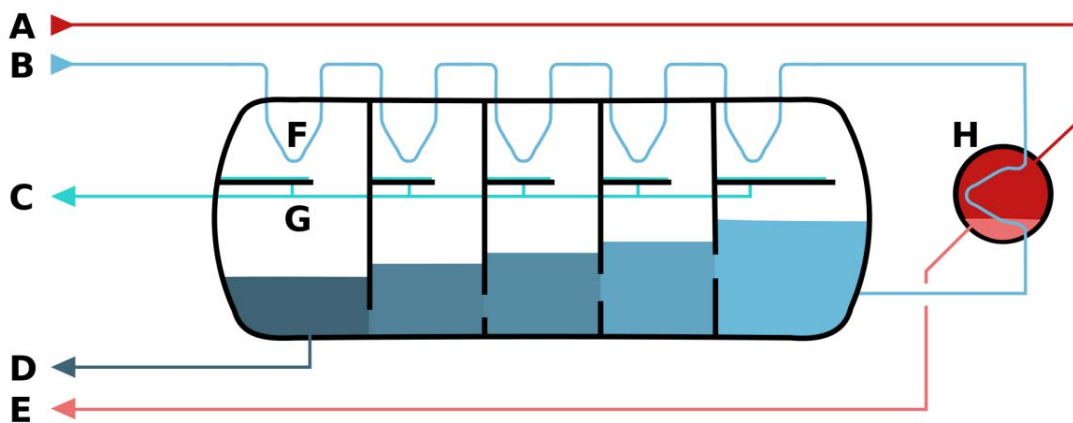
Άλλες μέθοδοι αφαλάτωσης, που όμως ακόμη βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο ή προς το παρόν είναι οικονομικά ασύμφωρες, είναι η ιοντο-ανταλλαγή (Ion - Exchange Methods), το πάγωμα (Freezing) και οι υβριδικές μέθοδοι (Methane hydrate crystallization).



Εικόνα 17: Σχηματική απεικόνιση των δύο κατηγοριών αφαλάτωσης (Πηγή: https://www.mou.gr/elibrary/AFALATOSI_08_08_2019.pdf)

2.3.1 Πολυβάθμια ακαριαία εκτόνωση (Multiple Stage Flashing, MSF)

Η μέθοδος της πολυβάθμιας ακαριαίας εκτόνωσης Multi-Stage Flash (MSF) είναι μια διαδικασία αφαλάτωσης νερού που αποστάζει το θαλασσινό νερό μετατρέποντας ένα μέρος του σε ατμό μέσα από πολλαπλά στάδια θέρμανσης. Το κάθε στάδιο περιλαμβάνει εναλλαγή θερμών και ψυχρών περιοχών, δηλαδή μία περιοχή εξάτμισης και μία περιοχή συλλογής του συμπυκνωμένου υδρατμού. Οι μονάδες MSF παράγουν περίπου το 20% του συνόλου του αφαλατωμένου νερού στον κόσμο (Ghaffour, 2013)

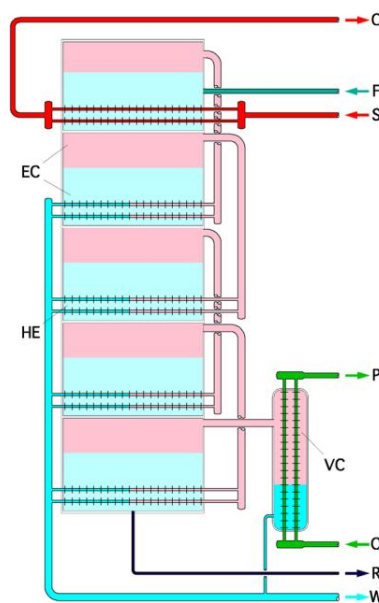


Εικόνα 18: Σχηματική απεικόνιση συσκευής αφαλάτωσης MSF μίας εισόδου. A: Είσοδος ατμού. B: Είσοδος θαλασσινού νερού. C: Έξοδος πόσιμο νερού. D: Έξοδος άλμης (απόβλητα). E: Έξοδος συμπυκνωμένου νερού. F: Δίοδος θερμότητας. G: Συλλέκτης συμπυκνωμένου νερού. H: Θέρμανση αλατόνευρο.

2.3.2 Πολυβάθμια απόσταξη (Multiple-Effect Distillation, MED)

Η μέθοδος της πολυβάθμιας απόσταξης Multiple-Effect Distillation (MED) είναι μία διαδικασία αφαλάτωσης η οποία αποτελείται από πολλαπλά στάδια (effects). Σε κάθε στάδιο, το νερό τροφοδοσίας θερμαίνεται με ατμό που περιέχεται σε σωλήνες, συνήθως ψεκάζοντας το αλατούχο νερό πάνω τους. Μέρος του νερού εξατμίζεται και ο ατμός ρέει στους σωλήνες του επόμενου σταδίου, θερμαίνοντας και εξατμίζοντας περισσότερο νερό. Κάθε στάδιο, ουσιαστικά επαναχρησιμοποιεί την ενέργεια που εκλύθηκε από το προηγούμενο στάδιο, με διαδοχικά χαμηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις να επικρατούν στο κάθε ένα (Panagorouλος, 2019).

Επιπλέον, μεταξύ των σταδίων αυτός ο ατμός χρησιμοποιεί λίγη θερμότητα για να προθερμανθεί το εισερχόμενο αλατούχο νερό (Warsinger et al., 2015).

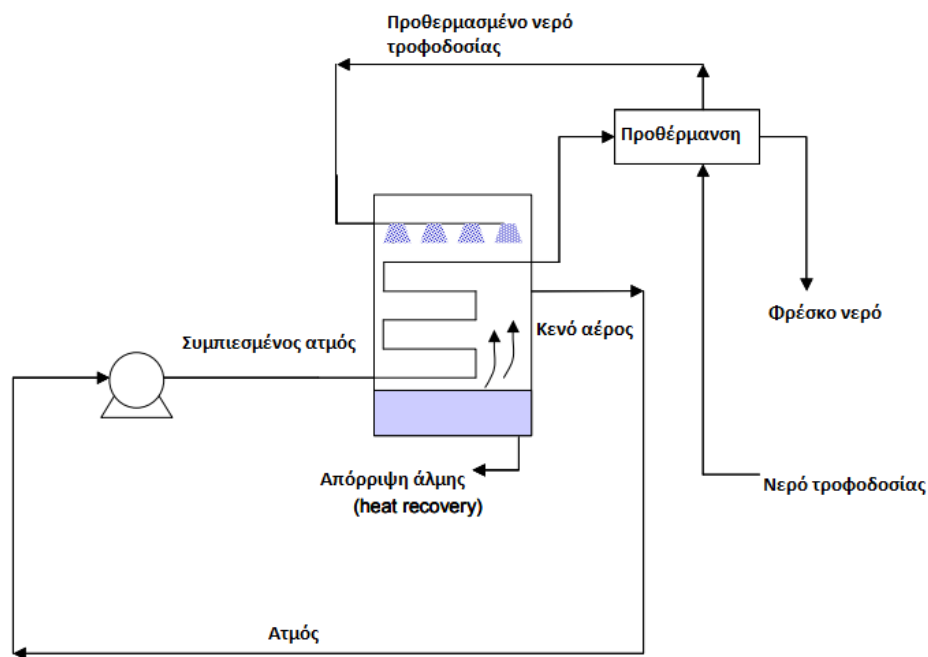


Εικόνα 19: Σχηματική απεικόνιση διάταξης αφαλάτωσης MED. Το πρώτο στάδιο βρίσκεται στην κορυφή. Οι ροζ περιοχές είναι ατμοί και οι γαλάζιες περιοχές είναι υγρό νερό τροφοδοσίας. Το πιο έντονο τυρκουάζ χρώμα είναι συμπύκνωμα F: τροφοδοσία νερού. S: θέρμανση εισερχόμενου ατμού. C: θέρμανση εξερχόμενου ατμού. W: Έξοδος αφαλατωμένου νερού (συμπύκνωμα). R: Έξοδος άλμης. O: ψύξη εισόδου. P: ψύξη εξόδου. VC: Το τελικό στάδιο ψύξης.

2.3.3 Εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών (Vapor Compression, VC ή MVC)

Οι διεργασίες συμπίεσης ατμού βασίζονται στη λειτουργία υπό χαμηλή πίεση για δημιουργία εξάτμισης. Η θερμότητα για την εξάτμιση παρέχεται από τη συμπίεση του ατμού,

είτε μέσω ενός μηχανικού συμπιεστή (μηχανική συμπίεση ατμού, Mechanical Vapor Compression, MVC) (Εικ.20), ή ενός συστήματος steam ejector (τζιφάρι) (θερμική συμπίεση ατμού, Thermal Vapor Compression, TVC) (Miller, 2003). Η συμπίεση του ατμού αυξάνει τόσο την πίεση όσο και την θερμοκρασία του, οπότε είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί η αποβαλλόμενη θερμότητα που προκύπτει από την συμπίεση για τη δημιουργία επιπλέον ατμού. Οι διαδικασίες συμπίεσης ατμού είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για μικρές και μεσαίες εγκαταστάσεις.



Εικόνα 20: Σχηματική απεικόνιση της διεργασίας αφαιρώσεως της Μηχανικής Συμπίεσης Ατμού ενός σταδίου (Miller, 2003)

Τα κύρια προβλήματα που συνδέονται με τη μέθοδο της μηχανικής συμπίεσης ατμού είναι τα εξής:

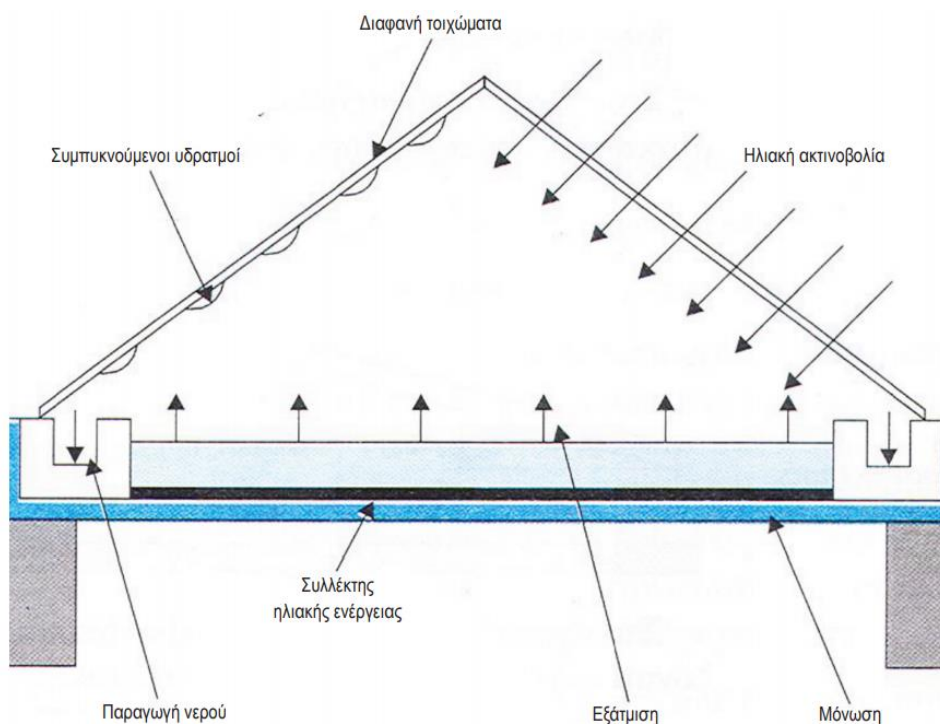
- Η άλμη που περιέχεται στον ατμό μεταφέρεται στο συμπιεστή και προκαλεί την διάβρωση των εξαρτημάτων του συμπιεστή, όπως τα πτερύγια.
- Υπάρχουν περιορισμοί στο μέγεθος της εγκατάστασης λόγω των περιορισμένων ικανοτήτων των συμπιεστών. (Kalogiou, 2005)

Παρ' όλα αυτά, η συμπίεση ατμού αποτελεί μια μέθοδο απλή και αξιόπιστη καθώς η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας της, την καθιστά απλή και αποτελεσματική διαδικασία από πλευράς ισχύος.

2.3.4 Ηλιακή απόσταξη (Solar distillation)

Η ηλιακή απόσταξη μιμείται το φυσικό κύκλο του νερού, κατά τον οποίο ο ήλιος θερμαίνει το θαλασσινό νερό και προκαλεί εξάτμιση. Μετά την εξάτμισή του, το νερό συμπυκνώνεται και υγροποιείται ξανά σε μία ψυχρή επιφάνεια. Υπάρχουν δύο μορφές ηλιακής απόσταξης. Η παλαιότερη, η οποία χρησιμοποιεί φωτοβολταϊκά κύτταρα, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια για να τροφοδοτήσουν τη διαδικασία αφαλάτωσης. Η πιο σύγχρονη αξιοποιεί την ηλιακή ενέργεια απευθείας στη θερμική της μορφή και είναι γνωστή ηλιακή θερμοκίνητη αφαλάτωση. (Khawaji, 2008)

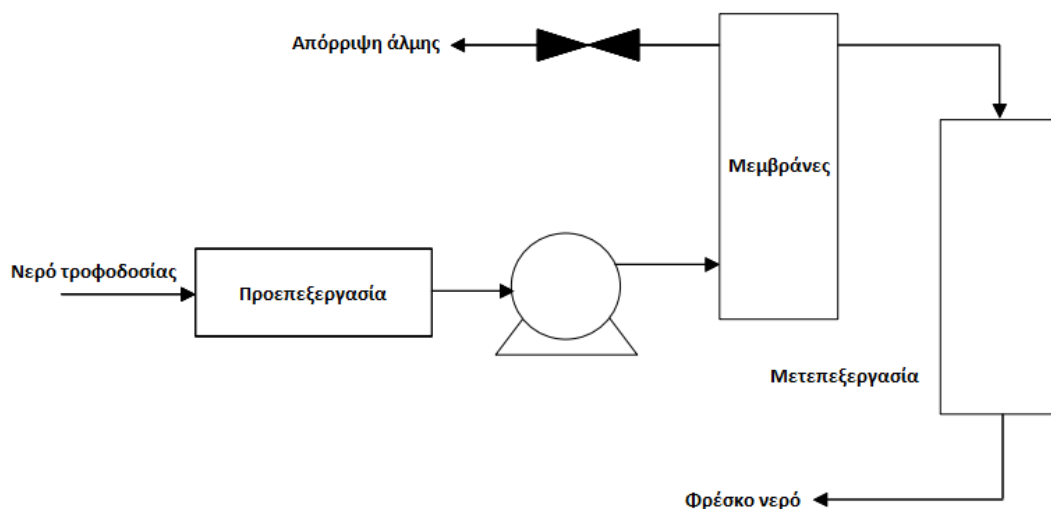
Η απόδοση τέτοιων εγκαταστάσεων είναι σχετικά χαμηλή, μόλις 3,5 lt καθαρό νερό ανά m^2 εδάφους, και μάλιστα νερό όχι απαλλαγμένο από μικροοργανισμούς, πράγμα που σημαίνει ότι απαιτείται και περαιτέρω επεξεργασία. Οι μονάδες αυτές έχουν ελάχιστο κόστος λειτουργίας εφόσον δεν χρησιμοποιούν κανενός είδους καύσιμο και δεν ρυπαίνουν σημαντικά το περιβάλλον. (Καραχάλιος, 2010)



Εικόνα 21: Απεικόνιση της μεθόδου της ηλιακής απόσταξης κατά την οποία οι ακτίνες του ήλιου διέρχονται μέσα από μια διαφανή οροφή και θερμαίνουν το θαλασσινό νερό που βρίσκεται στον πυθμένα. Αυτό εξατμίζεται και ανεβαίνει στην οροφή που είναι κεκλιμένη, οπότε συμπυκνώνεται πάλι και συλλέγεται ως προϊόν από κατάλληλη διάταξη (Πηγή: https://www.mou.gr/elibrary/AFALATOSI_08_08_2019.pdf)

2.3.5 Αντίστροφη Ωσμωση (Reverse osmosis)

Η αντίστροφη ώσμωση (RO) είναι μια διαδικασία διαχωρισμού με μεμβράνες, που ανακτά νερό από αλατούχο διάλυμα ασκώντας σε αυτό πίεση σε σημείο μεγαλύτερο από την οσμωτική πίεση του διαλύματος (Εικ. 22). Στην ουσία, η μεμβράνη φιλτράρει τα ιόντα αλατιού από το υπό πίεση διάλυμα, επιτρέποντας μόνο το νερό να περάσει. Η μετεπεξεργασία RO περιλαμβάνει την αφαίρεση διαλυμένων αερίων (CO₂) και τη σταθεροποίηση του pH μέσω της προσθήκης αλάτων ασβεστίου (Ca) ή νατρίου (Na).



Εικόνα 22: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου της αντίστροφης ώσμωσης – οι προαιρετικές συσκευές ανάκτησης πίεσης δεν απεικονίζονται. (Miller, 2003)

Η πίεση που ασκείται στο αλατούχο νερό αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που καταναλώνεται από τη μονάδα αντίστροφης ώσμωσης. Δεδομένου ότι η οσμωτική πίεση, και ως εκ τούτου η πίεση που απαιτείται για την εκτέλεση του διαχωρισμού σχετίζεται άμεσα με τη συγκέντρωση άλατος, η RO είναι συχνά η μέθοδος επιλογής για υφάλμυρο νερό, όπου απαιτούνται μόνο χαμηλές έως ενδιάμεσες πιέσεις. Η πίεση λειτουργίας για συστήματα υφάλμυρου νερού κυμαίνεται από 15 - 25 bar και για συστήματα θαλασσινού νερού από 54 έως 80 bar (η οσμωτική πίεση του θαλασσινού νερού είναι περίπου 25 bar). Δεδομένου ότι η πίεση που απαιτείται για την ανάκτηση επιπλέον νερού αυξάνεται καθώς το ρεύμα άλμης συγκεντρώνεται, ο ρυθμός ανάκτησης νερού των συστημάτων RO τείνει να είναι χαμηλός. Μια τυπική τιμή ανάκτησης για ένα σύστημα RO θαλασσινού νερού είναι μόνο 40% (Miller, 2003).

Δεδομένου ότι οι περισσότερες απώλειες ενέργειας στα συστήματα RO γίνεται στην εκτόνωση της άλμης, όταν βγαίνει με υψηλή πίεση απ' τη συσκευή, σε μεγάλες κυρίως μονάδες,

υπάρχουν συστήματα ανάκτησης της ενέργειας αυτής, όπως υδροστρόβιλοι, με αποτελεσματικότητα μέχρι και 95%. Σε αυτές τις μονάδες, η ενέργεια που απαιτείται για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού έχει αναφερθεί ότι είναι τόσο χαμηλή όσο 9 kJ/kg προϊόντος. Αυτή η χαμηλή τιμή ωστόσο είναι πιο χαρακτηριστική ενός συστήματος επεξεργασίας υφάλμυρου νερού. Οι μεμβράνες RO είναι ευαίσθητες στο pH, στα οξειδωτικά, σε ένα ευρύ φάσμα οργανικών, άλγη, βακτήρια και διάφορα σωματίδια και άλλα θρομβωτικά. Επομένως, η προεπεξεργασία του νερού τροφοδοσίας είναι μια σημαντική εκτίμηση και μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το κόστος της RO, ειδικά δεδομένου ότι όλο το νερό τροφοδοσίας, ακόμη και το 60% που τελικά θα απορριφθεί, πρέπει να προεπεξεργαστεί πριν μεταφερθεί στη μεμβράνη. (Miller, 2003)

2.3.6 Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis, ED)

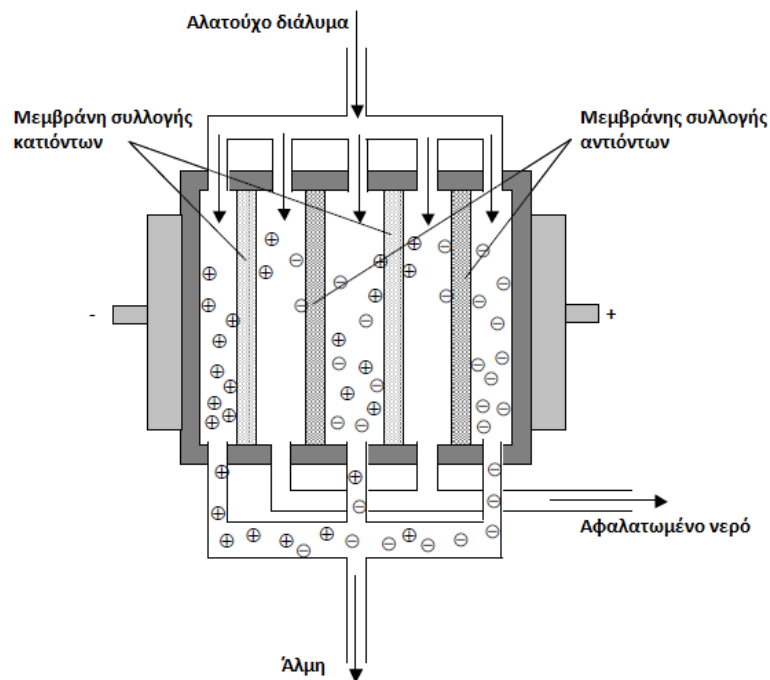
Η ηλεκτροδιάλυση (ED) χρησιμοποιεί μια πηγή συνεχούς ρεύματος και έναν αριθμό καναλιών ροής που διαχωρίζονται με εναλλασσόμενες μεμβράνες ανιόντων και κατιόντων για να επιτευχθεί ο διαχωρισμός νερού και διαλυμένων αλάτων. Δεδομένου ότι η κινητήρια δύναμη για το διαχωρισμό είναι ένα ηλεκτρικό πεδίο, η ED είναι ικανή να απομακρύνει μόνο τα ιοντικά συστατικά από το διάλυμα, σε αντίθεση με την RO ή την απόσταξη.

Το αλατούχο νερό τροφοδοσίας περιέχει διαλυμένα άλατα που διαχωρίζονται σε θετικά φορτισμένο νάτριο και αρνητικά φορτισμένα ιόντα χλωρίου. Αυτά τα ιόντα θα κινηθούν προς ένα αντίθετα φορτισμένο ηλεκτρόδιο βυθισμένο στο διάλυμα, δηλ. τα θετικά ιόντα (κατιόντα) θα πάνε στο αρνητικό ηλεκτρόδιο (κάθοδο) και τα αρνητικά ιόντα (ανιόντα) στο θετικό ηλεκτρόδιο (άνοδος). Οι ειδικές μεμβράνες, διαπερατές από κατιόντα και διαπερατές από ανιόντα, εναλλάσσονται και διαχωρίζουν τα ηλεκτρόδια, συνεπώς ο κεντρικός θάλαμος μεταξύ αυτών των μεμβρανών θα εξαντληθεί από τα άλατα. Στους δύο ακραίους θαλάμους παράγονται προϊόντα ηλεκτρόλυσης τα οποία επίσης απορρίπτονται. Ένας μεγάλος αριθμός ειδικά φορτισμένων επιλεκτικών μεμβρανών στοιβάζονται μεταξύ τους, χωρισμένες από πλαστικά κανάλια ροής που επιτρέπουν τη διέλευση του καθαρού νερού. Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή εναλλάξ στους θαλάμους αφαλατωμένου νερού και άλμης που ρέουν παράλληλα μεταξύ τους.

Για την αποφυγή σχηματισμού επιστρώματος και επικαθίσεων αλάτων αντιστρέφεται η πολικότητα της διεργασίας, συνήθως κάθε 20 min (Kalogirou, 2005). Η διαδικασία ονομάζεται

αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση (electrodialysis reverse, EDR) κατά την οποία οι θάλαμοι άλμης μετατρέπονται σε παραγωγής αφαλατωμένου νερού και το αντίστροφο (Miller, 2003).

Η ενέργεια που απαιτείται για τον διαχωρισμό των ιόντων από το διάλυμα αυξάνεται με τη συγκέντρωση, συνεπώς η ED περιορίζεται γενικά σε υφάλμυρα νερά που περιέχουν μόνο μερικές χιλιάδες ppm διαλυμένων στερεών. (Miller,2003)



Εικόνα 23:Σχηματική απεικόνιση της διεργασίας της ηλεκτροδιάλυσης (Miller, 2003)

2.4 Σύγκριση τεχνολογιών αφαλάτωσης

Για την κατάλληλη επιλογή μιας συγκεκριμένης μεθόδου πρέπει να ληφθούν υπόψη τα εξής:

- Την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας (θαλασσινό, υφάλμυρο)

Η προέλευση του νερού τροφοδοσίας καθορίζει σημαντικά την επιλογή της μεθόδου αφαλάτωσης. Η επιλογή υφάλμυρου νερού είναι προτιμότερη σε κάθε περίπτωση έναντι του θαλασσινού, καθώς η συγκέντρωση αλάτων είναι μικρότερη συνεπώς είναι χαμηλότερες και οι απαιτήσεις σε ενέργεια.

- Την ποσότητα και την ποιότητα του παραγόμενου νερού

Η δυναμικότητα μιας μονάδας αφαλάτωσης εξαρτάται από τη ζήτηση νερού η οποία επηρεάζει την επιλογή της μεθόδου. Σε ότι αφορά την ποιότητα του παραγόμενου νερού, οι θερμικές διεργασίες παράγουν αποσταγμένο νερό με πολύ χαμηλή συγκέντρωση αλάτων ενώ οι διεργασίες μεμβράνης παράγουν νερό με συγκέντρωση αλάτων της τάξης των 200 ppm και άνω.

- Το κόστος επένδυσης
- Τη διαθεσιμότητα χώρου
- Τις ενεργειακές απαιτήσεις και τις διαθέσιμες μορφές ενέργειας

Οι εγκαταστάσεις αφαλάτωσης είναι αρκετά ενεργοβόρες. Για αυτό είναι πολύ σημαντικό οι μονάδες να χωροθετούνται και να σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπόψη την διαθεσιμότητα σε ενέργεια. Η ενέργεια που απαιτείται ποικίλει ανάλογα με την δυναμικότητα της μονάδας αφαλάτωσης και από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται.

Η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην αφαλάτωση και καθαρισμό του νερού γίνεται ολοένα και πιο ελκυστική δεδομένου ότι οι τεχνολογίες αυτές έχουν χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας - αφαλάτωσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το μέγεθος του εργοστασίου, την αλατότητα του νερού τροφοδοσίας, τη διαθεσιμότητα του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, την τεχνική υποδομή, καθώς και τον τύπο και το δυναμικό των τοπικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

- Τη διαθεσιμότητα και την εμπειρία του προσωπικού

Η ορθή λειτουργία μιας μονάδας αφαλάτωσης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ασφαλή και αξιόπιστη παραγωγή σε βάθος χρόνου. Το προσωπικό πρέπει να φροντίζει για το διαρκή έλεγχο της ποιότητας του παραγόμενου νερού, σύμφωνα με την νομοθεσία και τους κάθε φορά περιβαλλοντικούς όρους, για το συστηματικό έλεγχο των ποιοτικών χαρακτηριστικών του θαλάσσιου περιβάλλοντος στην περιοχή του σημείου εκβολής της άλμης, για τη συστηματική και σχολαστική συντήρηση των μονάδων αφαλάτωσης, σύμφωνα τις απαιτήσεις των κατασκευαστών, καθώς και για τη συστηματική και σχολαστική επιτήρηση της λειτουργίας των μονάδων αφαλάτωσης, ώστε να αντιμετωπίζονται έγκαιρα τυχόν βλάβες.

Τα συμπεράσματα φαίνονται συγκεντρωτικά στον επόμενο πίνακα:

Πίνακας 3: Σύγκριση των μεθόδων αφαλάτωσης (Τζεν, 2001)

| Σύγκριση των μεθόδων αφαλάτωσης | | | | | | | |
|---------------------------------|------------------|-----------------|--------------------------|--|-------------------|--|--------------------------------------|
| Μέθοδος | Νερό Τροφοδοσίας | Μορφή Ενέργειας | Ποιότητα Προϊόντος (TDS) | Παραγωγή Προϊόντος (m ³ /ημέρα) | Τύπος Ενέργειας | Κατανάλωση Ενέργειας | Κόστος Εγκατάστασης |
| MSF | Θαλασσινό | Θερμική | ~10 | 1.000 – 60.000 | Θερμική Ηλεκτρική | 290 kJ/kg 4 – 6 kWh/m ³ | 1000 – 2000 €/m ³ /ημέρα) |
| MED | Θαλασσινό | Θερμική | ~10 | 500 – 20.000 | Θερμική Ηλεκτρική | 270 KJ/kg 2,5 – 3 kWh/m ³ | 850 – 1750 €/m ³ /ημέρα) |
| VC | Θαλασσινό | Ηλεκτρική | ~10 | 25 – 2.500 | Ηλεκτρική | 8 – 15 kWh/m ³ | 1000 – 2350 €/m ³ /ημέρα) |
| SWRO | Θαλασσινό | Ηλεκτρική | >500 | 0,4 - >70.000 | Ηλεκτρική | < 5 kWh/m ³ < 3 kWh/m ³ με ανάκτηση ενέργειας | 650 – 4400 €/m ³ /ημέρα) |
| BWRO | Υφάλμυρο | Ηλεκτρική | ~250-500 | 2,5 – > 50.000 | Ηλεκτρική | 0,5 – 3 kWh/m ³ | 300 – 2000 €/m ³ /ημέρα) |
| ED | Υφάλμυρο | Ηλεκτρική | ~300-500 | 15 – 50.000 | Ηλεκτρική | 1,5 – 4 kWh/m ³ | 1000 – 5000 €/m ³ /ημέρα) |

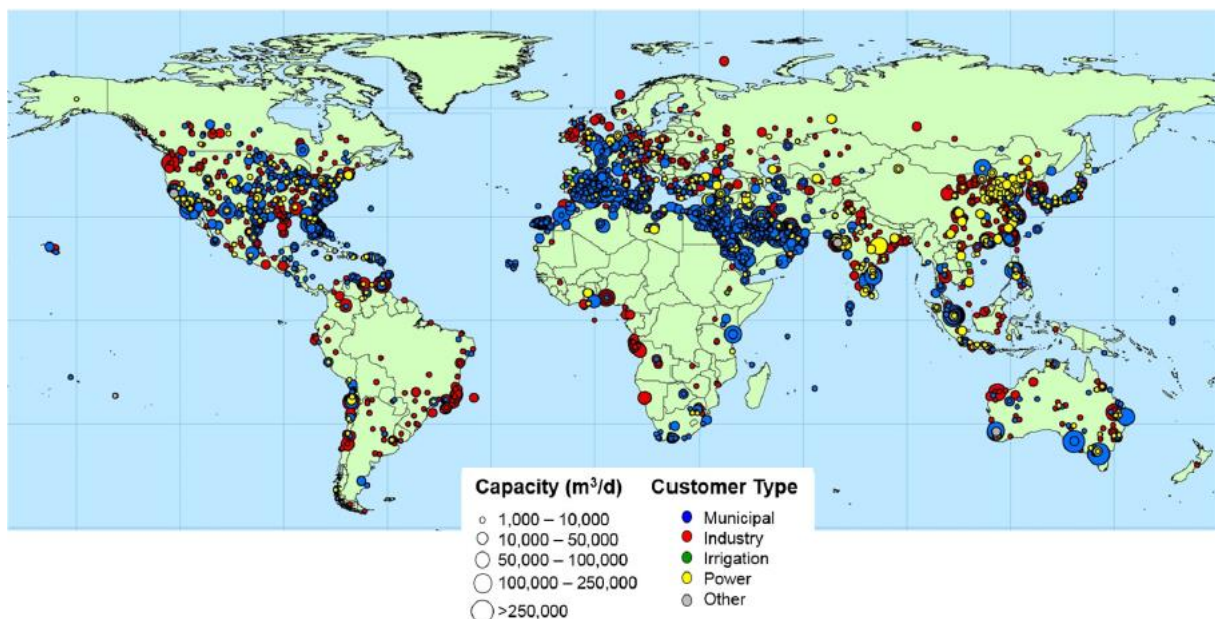
2.5 Εφαρμογή της αφαλάτωσης σε παγκόσμιο επίπεδο

Σήμερα, περίπου το 1% του παγκόσμιου πληθυσμού εξαρτάται από αφαλατωμένο νερό για να καλύψει τις καθημερινές του ανάγκες, την ώρα που ο ΟΗΕ εκτιμά ότι το 14% του παγκόσμιου πληθυσμού θα αντιμετωπίσει λειψυδρία έως το 2025. Η αφαλάτωση είναι ιδιαίτερα σημαντική σε ξηρές χώρες, όπως η Αυστραλία, οι οποίες παραδοσιακά βασίζονταν στη συλλογή του νερού της βροχής με βοήθεια φραγμάτων.

Υπάρχουν 15.906 λειτουργικές μονάδες αφαλάτωσης με συνολική ικανότητα αφαλάτωσης περίπου 95,37 εκατομμύρια m³/ημέρα (34,81 δισεκατομμύρια m³/έτος), που αποτελούν το 81% και το 93% του συνολικού αριθμού και της ικανότητας των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης που κατασκευάστηκαν ποτέ αντίστοιχα.

Η χωρική κατανομή, το μέγεθος και ο τύπος των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης (>1000m³/ημέρα) εμφανίζονται στην Εικόνα 24. Μεγάλος αριθμός εγκαταστάσεων αφαλάτωσης βρίσκονται στις Ηνωμένες Πολιτείες, την Κίνα και την Αυστραλία και σε περιοχές της Ευρώπης, της Βόρειας Αφρικής και της Μέσης Ανατολή. Σχετικά λίγες εγκαταστάσεις αφαλάτωσης βρίσκονται στη Νότια Αμερική και την Αφρική, με τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις να έχουν σχεδιαστεί κυρίως για την παραγωγή αφαλατωμένου νερού για τον βιομηχανικό τομέα. Οι μονάδες αφαλάτωσης παγκοσμίως συγκεντρώνονται στις ακτές και γύρω από την ακτή, ενώ οι παράκτιες εγκαταστάσεις αφαλάτωσης τείνουν επίσης να είναι μεγαλύτερες από τις

εγκαταστάσεις αφαλάτωσης στην ενδοχώρα. Οι μονάδες που παράγουν δημοτικά ύδατα βρίσκονται παγκοσμίως, αλλά κυριαρχούν ιδιαίτερα στην περιοχή της Μέσης Ανατολής και της Βόρειας Αφρικής. Συγκριτικά, υπάρχει πολύ μεγαλύτερο ποσοστό εγκαταστάσεων αφαλάτωσης που παράγουν νερό για μη δημοτικούς σκοπούς στις περιοχές της Βόρειας Αμερικής, της Δυτικής Ευρώπης και της Ανατολικής Ασίας και του Ειρηνικού, όπου η παραγωγή νερού για βιομηχανικές εφαρμογές και εφαρμογές ηλεκτρικής ενέργειας κατέχει επίσης μεγάλα μερίδια αγοράς.



Εικόνα 24: Παγκόσμια κατανομή λειτουργικών εγκαταστάσεων αφαλάτωσης και ικανότητα αφαλάτωσης (>1000 m³ / ημέρα) ανά είδος χρήσης του παραγόμενου νερού (Jones, 2019)

Ο αριθμός και η ικανότητα των μονάδων αφαλάτωσης ανά γεωγραφική περιοχή, επίπεδο εισοδήματος χώρας και τομέα χρήσης αφαλατωμένου νερού (Πίνακας 4) αποκαλύπτουν ότι σχεδόν το ήμισυ της παγκόσμιας ικανότητας αφαλάτωσης βρίσκεται στην περιοχή της Μέσης Ανατολής και της Βόρειας Αφρικής (48%), με τη Σαουδική Αραβία (15,5%), τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα (10,1%) και το Κουβέιτ (3,7%) να είναι οι σημαντικότεροι παραγωγοί στην περιοχή και παγκοσμίως. Οι περιοχές της Ανατολικής Ασίας και του Ειρηνικού και της Βόρειας Αμερικής παράγουν το 18,4% και το 11,9% του παγκόσμιου αφαλατωμένου νερού, κυρίως λόγω της μεγάλης ικανότητας στην Κίνα (7,5%) και στις ΗΠΑ (11,2%). Η ευρεία χρήση της αφαλάτωσης στην Ισπανία (5,7%) αντιπροσωπεύει πάνω από το ήμισυ της συνολικής αφαλάτωσης στη Δυτική Ευρώπη (9,2%). Το παγκόσμιο μερίδιο στην ικανότητα αφαλάτωσης είναι χαμηλότερο για τη Νότια Ασία (3,1%), την Ανατολική Ευρώπη και την Κεντρική Ασία

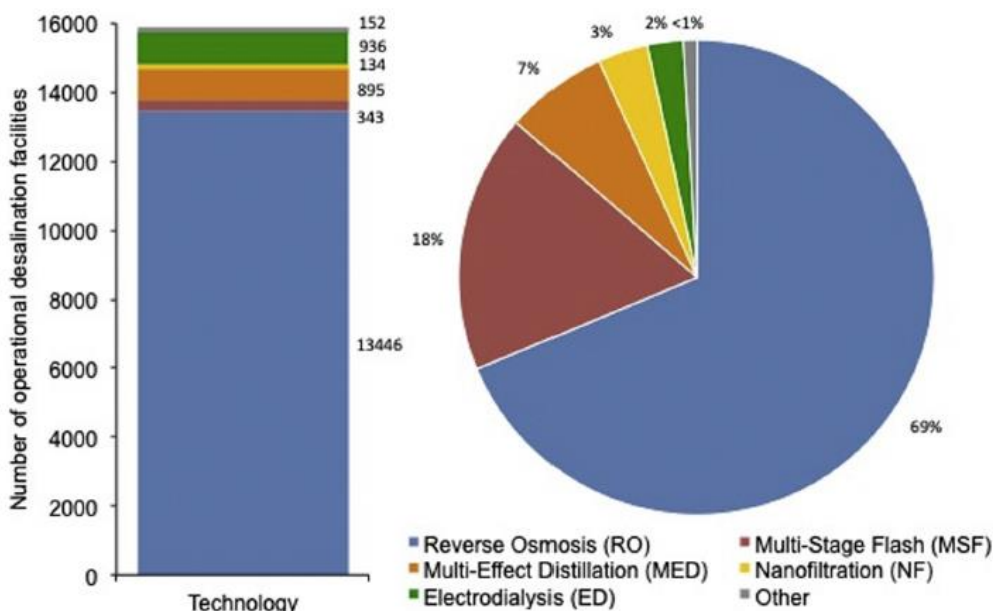
(2,4%) και την Υποσαχάρια Αφρική (1,9%), όπου η αφαλάτωση περιορίζεται κυρίως σε μικρές εγκαταστάσεις για ιδιωτικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Η πλειονότητα των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης βρίσκονται σε χώρες με υψηλό εισόδημα (67%), αντιπροσωπεύοντας το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας ικανότητας αφαλάτωσης (71%). Αντίθετα, πολύ λίγες μονάδες αφαλάτωσης βρίσκονται σε χώρες χαμηλού εισοδήματος, οι οποίες συμβάλλουν σε αμελητέο ποσοστό (<0,1%) στην παγκόσμια ικανότητα αφαλάτωσης.

Ενώ σχεδόν το ήμισυ του συνολικού αριθμού εγκαταστάσεων αφαλάτωσης παράγουν νερό για τον βιομηχανικό τομέα, ο δημοτικός τομέας είναι ο μεγαλύτερος χρήστης αφαλατωμένου νερού. Το 62,3% του αφαλατωμένου νερού παράγεται για ανθρώπινη κατανάλωση (δημοτικός τομέας), σε σύγκριση με το 30,2% που παράγεται για βιομηχανικές εφαρμογές. Αυτό το μοτίβο συμβαίνει λόγω της (συνήθως) μικρότερης ικανότητας των βιομηχανικών εγκαταστάσεων αφαλάτωσης, η οποία είναι κατά μέσο όρο 3712m³ / ημέρα, σε σύγκριση με τις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης που παράγουν δημοτικό νερό 12126m³ / ημέρα κατά μέσο όρο. Ενώ οι δημοτικοί και βιομηχανικοί τομείς αντιπροσωπεύουν τη συντριπτική πλειοψηφία της παγκόσμιας ικανότητας αφαλάτωσης, οι τομείς ενέργειας (4,8%) και άρδευσης (1,8%) καταναλώνουν μικρό αλλά σημαντικό ποσοστό παραγόμενου αφαλατωμένου νερού.

Πίνακας 4: Αριθμός, ικανότητα και παγκόσμιο μερίδιο λειτουργικών μονάδων αφαλάτωσης ανά περιοχή, επίπεδο εισοδήματος χώρας και ανά τομέα χρήσης (Jones, 2019)

| | Number of desalination plants | Desalination capacity | |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------|
| | | (million m ³ /day) | (%) |
| Global | 15,906 | 95.37 | 100 |
| Geographic region | | | |
| Middle East and North Africa | 4826 | 45.32 | 47.5 |
| East Asia and Pacific | 3505 | 17.52 | 18.4 |
| North America | 2341 | 11.34 | 11.9 |
| Western Europe | 2337 | 8.75 | 9.2 |
| Latin America and Caribbean | 1373 | 5.46 | 5.7 |
| Southern Asia | 655 | 2.94 | 3.1 |
| Eastern Europe and Central Asia | 566 | 2.26 | 2.4 |
| Sub-Saharan Africa | 303 | 1.78 | 1.9 |
| Income level | | | |
| High | 10,684 | 67.24 | 70.5 |
| Upper middle | 3075 | 19.16 | 20.1 |
| Lower middle | 2056 | 8.88 | 9.3 |
| Low | 53 | 0.04 | 0.0 |
| Sector use | | | |
| Municipal | 6055 | 59.39 | 62.3 |
| Industry | 7757 | 28.80 | 30.2 |
| Power | 1096 | 4.56 | 4.8 |
| Irrigation | 395 | 1.69 | 1.8 |
| Military | 412 | 0.59 | 0.6 |
| Other | 191 | 0.90 | 0.4 |

Από τις τεχνολογίες αφαλάτωσης, η αντίστροφη ώσμωση είναι κατά κύριο λόγο η κυρίαρχη διαδικασία, αντιπροσωπεύοντας το 84% του συνολικού αριθμού των λειτουργικών μονάδων αφαλάτωσης, παράγοντας 69% (65,5 εκατομμύρια m³/ημέρα) του συνολικού παγκόσμιου αφαλατωμένου νερού (Εικ. 25). Οι δύο μεγάλες θερμικές τεχνολογίες, οι MSF και η MED, παρά το ότι είναι σχετικά λίγες στον αριθμό, παράγουν την πλειονότητα του εναπομείναντος αφαλατωμένου νερού, με μερίδια αγοράς 18% και 7% αντίστοιχα (Εικ. 25). Συνολικά, αυτές οι τρεις τεχνολογίες αντιπροσωπεύουν το 94% του συνολικού αφαλατωμένου νερού που παράγεται, με τις εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν τεχνολογίες NF (3%), ED (2%) και EDI (<1%) να παράγουν μικρότερο όγκο αφαλατωμένου νερού (Εικ. 25).

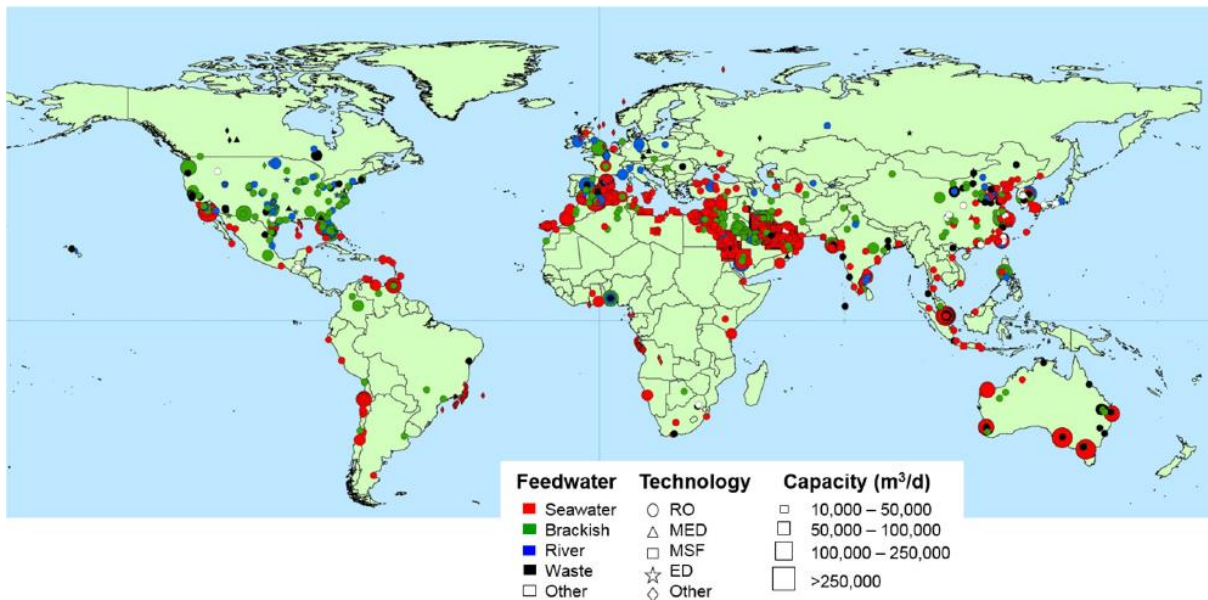


Εικόνα 25: Αριθμός και ικανότητα των λειτουργικών μονάδων αφαλάτωσης ανά τεχνολογία (Jones, 2019)

Όσον αφορά στη χωρική κατανομή και το μέγεθος μεγάλων (>10.000 m³/ημέρα) εγκαταστάσεων αφαλάτωσης που λειτουργούν κάτω από διαφορετικούς συνδυασμούς τεχνολογίας - τροφοδοσίας νερού ισχύουν τα εξής, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 26:

Οι τεχνολογίες θερμικής αφαλάτωσης (MED, MSF) που λειτουργούν με θαλασσινό νερό ως νερό τροφοδοσίας, κυριαρχούν στη Μέση Ανατολή, με εξαίρεση έναν μεγάλο αριθμό εγκαταστάσεων αντίστροφης ώσμωσης - υφάλμυρου νερού (BW-RO) που βρίσκονται στην ενδοχώρα της Σαουδικής Αραβίας. Εκτός αυτής της περιοχής, υπάρχουν πολύ λίγες μεγάλες εγκαταστάσεις θερμικών διεργασιών, με την RO να είναι η κυρίαρχη τεχνολογία σε μια σειρά τύπων υδάτων τροφοδοσίας. Για παράδειγμα, τα μεγάλα εργοστάσια αφαλάτωσης στην

Αυστραλία λειτουργούν σχεδόν αποκλειστικά χρησιμοποιώντας τεχνολογία RO, αλλά με μια ποικιλία τύπων υδάτων τροφοδοσίας, συμπεριλαμβανομένων των θαλασσινού νερού (SW), υφάλμυρου νερού (BW) και νερό λυμάτων (WW). Η RO είναι επίσης η κυρίαρχη τεχνολογία στις Ηνωμένες Πολιτείες, αν και η συντριπτική πλειονότητα των μονάδων αφαλάτωσης λειτουργούν χρησιμοποιώντας το υφάλμυρο νερό (BW) και το νερό ποταμών (RW), με μόνο ένα μικρό αριθμό εγκαταστάσεων θαλασσινού νερού που βρίσκονται στην Καλιφόρνια και τη Φλόριντα. Η Δυτική Ευρώπη, και συγκεκριμένα η Ισπανία, κυριαρχείται από την RO χρησιμοποιώντας μια ποικιλία πηγών τροφοδοτικών υδάτων, αν και υπάρχει επίσης ένας σημαντικός αριθμός εγκαταστάσεων αφαλάτωσης που χρησιμοποιούν εναλλακτικές τεχνολογίες όπως η ED και η NF. Τέλος, το SW-RO κυριαρχεί στην αφαλάτωση στις παράκτιες περιοχές της Ασίας, αν και σημαντικός αριθμός εγκαταστάσεων BW και RW-RO βρίσκονται στην ενδοχώρα.



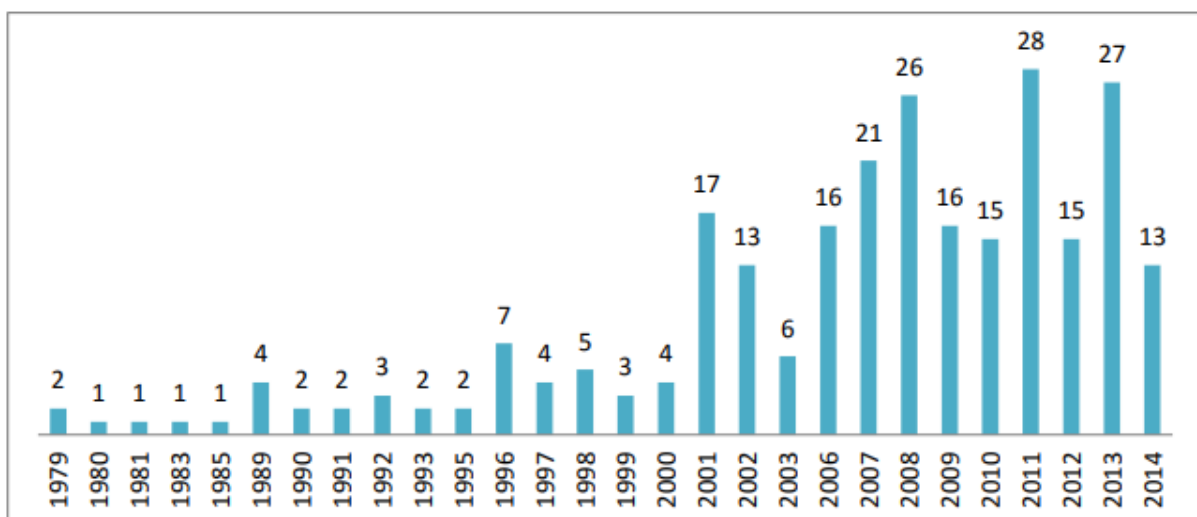
Εικόνα 26: Παγκόσμια κατανομή μεγάλων εγκαταστάσεων αφαλάτωσης ανά χωρητικότητα, τύπο νερού τροφοδοσίας και τεχνολογία αφαλάτωσης (Jones, 2019)

2.6 Εφαρμογή της αφαλάτωσης στον ελλαδικό χώρο

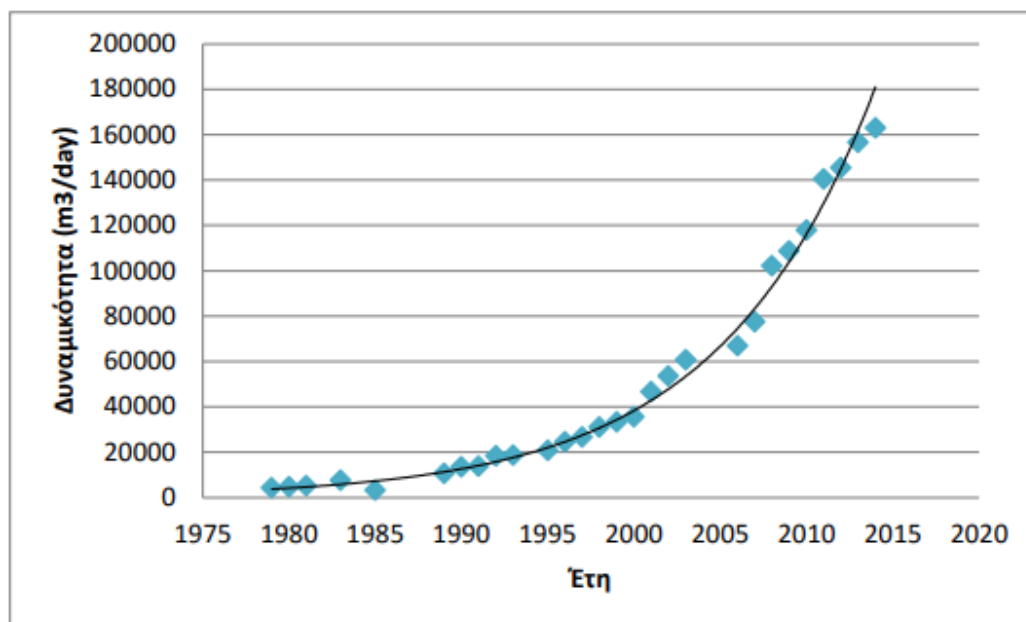
Η εφαρμογή της τεχνολογίας αφαλάτωσης στην Ελλάδα ξεκίνησε το 1964 με το σχεδιασμό και την κατασκευή εγκαταστάσεων ηλιακής απόσταξης (solar stills). Κατά την περίοδο από το 1964 έως το 1973 κατασκευάστηκαν αρκετές μονάδες ηλιακής απόσταξης για παροχή γλυκού νερού από θαλασσινό νερό σε πολλά νησιά όπως η Σύμη, η Αίγινα, η Σαλαμίνα κ.λπ. Η έκτασή τους κυμαινόταν από 380 m² έως 8600 m². Το μεγαλύτερο εργοστάσιο ηλιακής

απόσταξης κατασκευάστηκε στο νησί της Πάτμου το 1967. Στη Σύρο εγκαταστάθηκε μια μονάδα Multi Stage Flashing (MSF) με παραγωγική ικανότητα 1200 m³ ημερησίως για δημοτική χρήση. Το 1977, εγκαταστάθηκε στην Κέρκυρα το πρώτο εργοστάσιο αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού, με ημερήσια παραγωγική ικανότητα 15000 m³. Η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε ήταν Αντιστροφή Ηλεκτροδιάλυση (EDR). Μερικά χρόνια αργότερα, το 1981, η τεχνολογία της αντίστροφης ώσμωσης (RO) εισήλθε στην ελληνική αγορά με μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού. Τα πρώτα εργοστάσια RO εγκαταστάθηκαν σε πέντε νησιά του Αιγαίου (Μύκονος, Σύρος, Θήρα, Νίσυρος, Μεγίστη) και σε ένα νησί του Ιονίου (Ιθάκη). Το 1997/1998 οι πρώτες μονάδες αφαλάτωσης που τροφοδοτούνται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) εγκαταστάθηκαν σε έργα της ΕΕ. Προς το παρόν, έχουν εγκατασταθεί και λειτουργούν στα ελληνικά νησιά σημαντικός αριθμός μονάδων RO υφάλμυρου και θαλασσινού νερού, με συνολική παραγωγική ικανότητα δημοτικών υδάτων άνω των 50000 m³. (Tzen, 2015) Στους δήμους τις ενδοχώρας υπάρχουν ελάχιστες μονάδες αφαλάτωσης οι οποίες στο σύνολό τους επεξεργάζονται υφάλμυρο νερό. Μονάδες αφαλάτωσης λειτουργούν σε 82 από τους 325 δήμους (ποσοστό 25%). (Μπακογιάννη, 2016)

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 27), υπάρχει πολύ μεγάλη εξέλιξη στην λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης με το πέρασμα των χρόνων, ιδιαίτερα από το 2001 και μετά. Η παραγόμενη ποσότητα νερού επίσης, σημειώνει μεγάλη αύξηση από το 2000 και μετά, ενώ η συνάρτησης της αύξησης της δυναμικότητας ανά έτος έχει εκθετική μορφή (Εικόνα 28).



Εικόνα 27: Αριθμός μονάδων αφαλάτωσης που κατασκευάστηκαν ανά έτος (Μπακογιάννη, 2016)

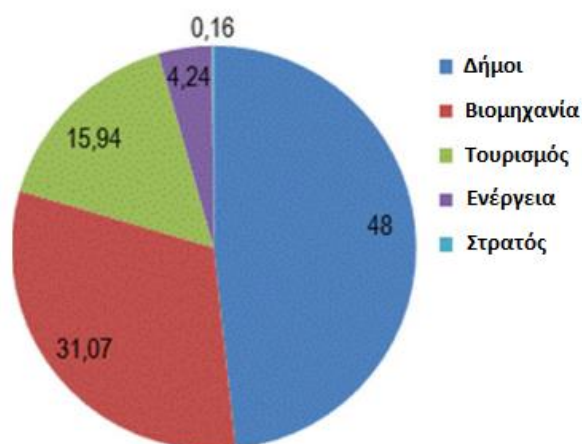


Εικόνα 28: Παραγόμενη ποσότητα νερού από μονάδες αφαλάτωσης ανά έτος (Μπακογιάννη, 2016)

Στην Ελλάδα είναι σε λειτουργία κυρίως μικρές μονάδες, δηλαδή με δυναμικότητα μικρότερη των $1000\text{m}^3/\text{ημέρα}$, το ποσοστό των οποίων ανέρχεται σε αριθμό, στο 81%. Ωστόσο, όσον αφορά τη συνολική δυναμικότητα, αυτή που προκύπτει από τις μεσαίες μονάδες (δυναμικότητα μεσαίων μονάδων: $1000 - 10000\text{ m}^3/\text{ημέρα}$) είναι μεγαλύτερη συνολικά σε σχέση με αυτή που προκύπτει από τις μικρές μονάδες. Συνολικά λοιπόν, ημερησίως η ποσότητα νερού που εξέρχεται από μικρές και μεσαίες μονάδες είναι περίπου η ίδια. (Μπακογιάννη, 2016)

Όσον αφορά την τεχνολογία λειτουργίας των μονάδων αφαλάτωσης, σχεδόν το σύνολο των μονάδων λειτουργούν με τη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης, RO, σε ποσοστό 95,7%, ενώ ακολουθούν η πολυβάθμια ακαριαία εκτόνωση, MSF, (2,7%) η πολυβάθμια απόσταξη, MED, (1,2%) και ο ηλεκτροαπιονισμός, EDI (0,4%). (Μπακογιάννη, 2016)

Όσον αφορά τη χρήση του παραγόμενου αφαλατωμένου νερού, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 29, το 48,08% προορίζεται για την προμήθεια των δήμων, το 31,07% πηγαίνει στη βιομηχανία, το 15,94% καλύπτει τουριστικές απαιτήσεις και το 4,24% και το 0,16% προορίζονται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και παροχή νερού στρατιωτικών στρατοπέδων, αντίστοιχα. (Zotalis, 2014)



Εικόνα 29: Παραγωγή αφαλατωμένου νερού σύμφωνα με τις χρήσεις του (Zotalis, 2014)

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται κάποιες από τις σημαντικότερες μονάδες αφαλάτωσης στην Ελλάδα:

Πίνακας 5: Σημαντικότερες μονάδες αφαλάτωσης στην Ελλάδα, (Tzen, 2003)

| Μονάδα | Έτος κατασκευής (αρχικό) | Τύπος | Δυναμικότητα (m ³ /ημέρα) | Αρχικό κόστος (εκ. €) | Λειτουργικό κόστος (€) |
|----------------------------------|--------------------------|--------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Σύρος 1 ^η (Ερμούπολη) | 1992 | RO(SW) | 800 | 0,589 | 1,25 |
| Σύρος 2 ^η (Ερμούπολη) | 1997 | RO(SW) | 800 | 1,482 | 1,25 |
| Σύρος 3 ^η (Ερμούπολη) | 2001 | RO(SW) | 2x250 | 0,346 | 1 |
| Σύρος 4 ^η (Ανω Σύρος) | 2000 | RO(SW) | 250 | 0,215 | 0,5 |
| Σύρος 5 ^η (Ανω Σύρος) | 2002 | RO(SW) | 500 | 0,4 | 0,5 |
| Σύρος 6 ^η (Ερμούπολη) | 2002 | RO(SW) | 4x500 | 0,313 | 1 |
| Σύρος 7 ^η (Ανω Σύρος) | 2005 | RO(SW) | 2x500 | 1 | 0,4 |
| Σχοινούσα | 2004 | RO(SW) | 100 | 0,12 | 0,7 |
| Μύκονος (Κόρφου) παλιά | 1989 | RO(SW) | 2x550 | | |
| Μύκονος (Κόρφου) νέα | 2001 | RO(SW) | 3x650 | 1,276 | 0,5 |
| Πάρος (Νάουσα) | 2001 | RO(SW) | 1200 | 0,415 | 0,5 |
| Τήνος (Παλαιά) | 2001 | RO(SW) | 500 | 0,434 | 0,62 |
| Τήνος (νέα) | 2005 | RO(SW) | 500 | 0,376 | 0,62 |
| Οία, Σαντορίνη 1 ^η | 1994 | RO | 220 | | |
| Οία, Σαντορίνη 2 ^η | 2000 | RO | 320 | 0,211 | 2 |
| Οία, Σαντορίνη 3 ^η | 2002 | RO | 160 | | |
| Θήρα, Σαντορίνη | 2009 | RO | 1000 | | |
| Θηρασιά | 1997 | RO | 48 | | |
| Σίφνος | 2002 | RO(BW) | 500 | 0,224 | 3,5 |
| Ομηρούπολη, Χίος 1 ^η | 2000 | RO(BW) | 600 | 0,205 | 0,3 |
| Ομηρούπολη, Χίος 2 ^η | 2005 | RO | 3x100 | 0,71 | 0,26 |

| | | | | | |
|----------------------------------|------|--------|-------|-------|------|
| Ομηρούπολη, Χίος ^{3η} | 2005 | RO | 500 | 0,2 | 0,26 |
| Νίσυρος | 1991 | RO | 300 | 0,572 | |
| Νίσυρος | 2002 | RO | 350 | 0,295 | 0,66 |
| Νίσυρος | 2019 | RO | 300 | | |
| Ιθάκη, Κεφαλονιάς 1 ^η | 1981 | RO | 620 | 0,264 | 2,88 |
| Ιθάκη, Κεφαλονιάς 2 ^η | 2003 | RO | 520 | 0,587 | 0,58 |
| Λέρος (ΔΕΥΑ) | 2001 | RO | 200 | 0,074 | 0,13 |
| Λέρος | 2017 | | | | |
| Μήλος | 2008 | RO | 2000 | | |
| Κασσωπαίων, Κέρκυρα | 2001 | RO | 500 | 0,117 | 0,13 |
| Ποσειδωνιάς 1 | 2002 | RO(SW) | 2x250 | 0,464 | 0,56 |
| Ποσειδωνιάς 2 | 2005 | RO(SW) | 2x500 | 0,574 | 0,45 |
| Αγ. Γεώργιος, Κέρκυρα | 2002 | RO | 500 | 0,102 | 0,3 |
| Παξοί 1η | 2005 | RO | 330 | 0,26 | 0,51 |
| Παξοί 2 ^η | 2005 | RO | 150 | 0,162 | 0,59 |
| Παξοί 3 ^η | 2007 | RO(SW) | 250 | 0,211 | 0,51 |
| Λυστίων | 2006 | RO(BW) | 400 | 0,2 | 0,3 |
| Σίφνος | 2007 | RO(SW) | 250 | | |
| Ίος | 2003 | RO(SW) | 1000 | | |
| Ιθάκη | 2005 | RO(SW) | 200 | 0,22 | |
| Οινούσες | 2005 | RO(SW) | 500 | | |
| Πόρου | 2006 | RO(BW) | 1000 | 0,2 | 0,3 |
| Γαζίου, Ηράκλειο | 2008 | RO(BW) | 1000 | | |
| Ηρακλειά | 2008 | RO | 70 | 2,8 | 0,2 |
| Αλμυρός, Ηράκλειο | 2013 | RO&UF | 2400 | 0,85 | |
| Τήνος | 2020 | RO | 1000 | | |
| Αμοργός | 2020 | | 600 | | |
| Καστελόριζο(Μανδράκι) | 2018 | | 2x200 | | |
| Λειψοί | 2019 | | 600 | | |
| Νίσυρος | 2019 | | 300 | | |
| Πάτμος-Αρκιοί | 2017 | | 2X600 | | |
| Κουφονήσια | 2014 | | 700 | | |
| Ηρακλειά | 2019 | | 300 | | |
| Σίκινος | 2011 | RO | 200 | | |

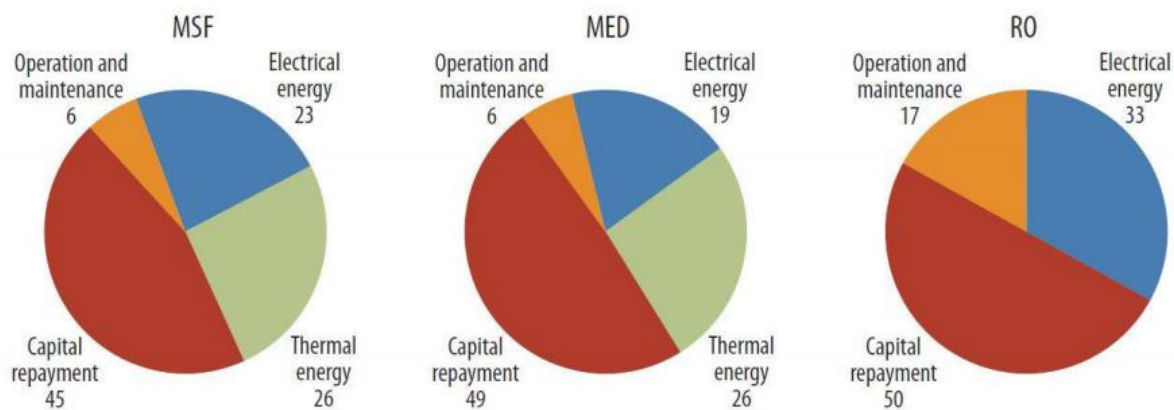
2.7 Κόστος

Λόγω της κατανάλωσης ενέργειας που απαιτεί, η αφαλάτωση του θαλασσινού νερού είναι γενικά πιο δαπανηρή από το γλυκό νερό που προέρχεται από τα ποτάμια ή τα υπόγεια ύδατα, καθώς και την ανακύκλωση ή διαφύλαξη του νερού. Ωστόσο, οι εναλλακτικές μέθοδοι δεν είναι πάντα διαθέσιμες και η εξάντληση των αποθεμάτων αποτελεί κρίσιμο πρόβλημα παγκοσμίως. (Ebrahimi et al., 2019)

Τα τελευταία τριάντα χρόνια, η συστηματική έρευνα και ανάπτυξη μείωσαν το κόστος της τεχνολογίας αφαλάτωσης μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας και βελτιώνοντας τον σχεδιασμό. Ο πίνακας 6 δείχνει το κατά προσέγγιση κόστος των κύριων τεχνολογιών αφαλάτωσης. Η επένδυση κεφαλαίου και το ενεργειακό κόστος είναι οι δύο κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος της τεχνολογίας αφαλάτωσης, ενώ άλλοι παράγοντες όπως το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι σχεδόν με σταθερό συντελεστή. Η αλατότητα της πηγής νερού, η διαθεσιμότητα πηγής ενέργειας, το μέγεθος της μονάδας, το κόστος γης και η κρατική επιδότηση είναι μερικοί άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος αφαλάτωσης. Η εικόνα 30 δείχνει το συνολικό ετήσιο ποσοστό κόστους κάθε παράγοντα στις κύριες τεχνικές αφαλάτωσης. Προς το παρόν, η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε συστήματα αφαλάτωσης είναι αναποτελεσματική σε σύγκριση με τη χρήση ορυκτών καυσίμων λόγω του υψηλού κόστους συλλογής αυτών των ανανεώσιμων πόρων και των απαιτήσεών τους σε υψηλό επίπεδο τεχνολογίας και υποδομής. Ωστόσο, μια περαιτέρω ανάπτυξη και έρευνα μπορεί να επιτύχει στη μείωση του κόστους των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο εγγύς μέλλον. Το κατά προσέγγιση κόστος ανανεώσιμης ενέργειας είναι περίπου (0,1-0,2 USD/kWh), αλλά αυτή η τιμή αναμένεται να είναι περίπου (0,05 USD/kWh) εντός των επόμενων 20 ετών, η οποία μπορεί να είναι ισοδύναμη με το συμβατικό ενεργειακό κόστος. Ο Πίνακας 7 δείχνει το πρόσφατο τυπικό κόστος για τα συστήματα αφαλάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. (Alkaisi, 2017)

Πίνακας 6: Τυπικό κόστος συμβατικής αφαλάτωσης θαλασσινού νερού (USD/m³.ημέρα)(Alkaisi, 2017)

| | MSF | MED | RO |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Capital investment costs | 1,700–2,900 | 1,700–2,700 | 1,300–2,500 |
| Operational costs | 0.65–1.25 | 0.67–0.96 | 0.58–0.88 |
| Total annualized cost | 0.84-1.6 | 1.21-1.59 | 1.06–1.36 |



Εικόνα 30: Συνολικό ετήσιο ποσοστό κόστους στις κύριες τεχνολογίες αφαλάτωσης (Alkaisi, 2017)

Πίνακας 7: Τυπικό κόστος των συστημάτων αφαλάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Alkaisi, 2017)

| Μέθοδος Αφαλάτωσης | Ηλιακή θερμική ενέργεια | | | Ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια | | Αιολική ενέργεια | | |
|---------------------------------------|-------------------------|-------|--------|---------------------------|-----------|------------------|-------|---------|
| | MED | HDH | SD | ED | RO | MVC | RO | RO |
| Δυναμικότητα (m ³ /ημέρα) | >5000 | >100 | >1 | >100 | >100 | >100 | >50 | >1000 |
| Κόστος (USD/m ³) | 2.5-3 | 2.8-7 | 1.4-12 | 11.2-12.6 | 12.5-16.8 | 5.6-8.4 | 7-9.8 | 2.1-5.6 |

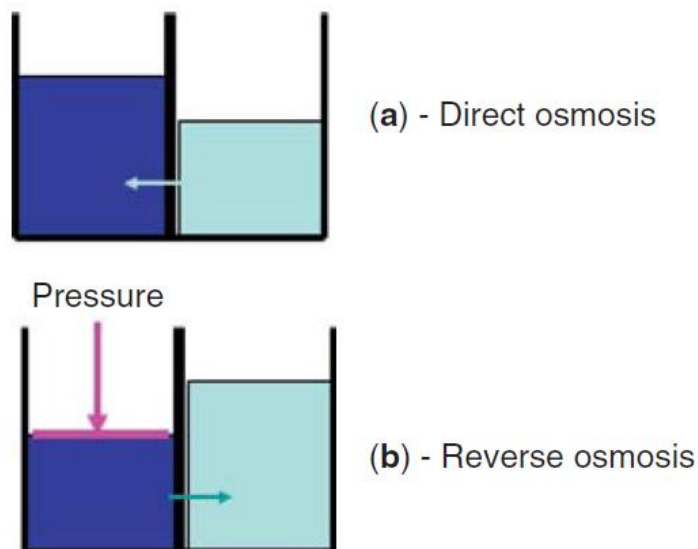
3 Αφαλάτωση με Αντίστροφη Ώσμωση

3.1 Αρχές λειτουργίας

Η αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση (RO – Reverse Osmosis) αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο αφαλάτωσης και βασίζεται στη χρήση μεμβρανών. Η μέθοδος αυτή αξιοποιεί τη χρήση ημιπερατών μεμβρανών για να απομακρύνει ιόντα, ανεπιθύμητα μόρια και μεγαλύτερα σωματίδια για την παραγωγή πόσιμου νερού. (Warsinger et al., 2016)

Η ώσμωση είναι μια φυσική διαδικασία που περιλαμβάνει τη ροή υγρού διά μέσω ενός ημιδιαπερατού φράγματος μεμβράνης. Προκύπτει διήθηση με την έννοια ότι ο διαλύτης διέρχεται μέσω της μεμβράνης με ταχύτερο ρυθμό από ότι διέρχονται οι διαλυμένες στερεές ουσίες. Η διαφορά αυτή οδηγεί σε διαχωρισμό μεταξύ διαλύτη και διαλυμένων ουσιών. Η κατεύθυνση της ροής του διαλύτη προσδιορίζεται από το χημικό του δυναμικό, που είναι συνάρτηση της πίεσης, της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης διαλυμένων στερεών. Θεωρητικά, αν υπήρχε καθαρό νερό και στις δύο πλευρές μιας ιδανικής ημιπερατής μεμβράνης υπό ίση πίεση και θερμοκρασία, δε θα προέκυπτε καμία καθαρή ροή δια μέσου της μεμβράνης γιατί το χημικό δυναμικό θα ήταν ίσο και στις δύο πλευρές. Αν ένα διαλυτό άλας προστεθεί στο νερό στη μία πλευρά της μεμβράνης, το χημικό δυναμικό αυτού του διαλύματος αλατιού μειώνεται και ξεκινά η αυθόρμητη ροή από την πλευρά του καθαρού νερού, προς την πλευρά του αλατούχου νερού. (Wilf, 2014)

Αντίθετα, κατά την αντίστροφη ώσμωση, εφαρμόζεται μία ασκούμενη πίεση προκειμένου να υπερβεί την ωσμωτική πίεση, η οποία γεννιέται από τη χημική διαφορά δυναμικού στο διαλύτη. Κατά τη διαδικασία αυτή, η διαλυμένη ουσία διατηρείται στην υπό πίεση πλευρά της μεμβράνης, ενώ ο καθαρός διαλύτης (νερό) αφήνεται να περάσει στην άλλη πλευρά. Για να είναι κατάλληλη η μεμβράνη, δεν πρέπει να επιτρέπει σε μεγάλα μόρια ή ιόντα να περνούν μέσω των πόρων της, αλλά θα πρέπει να αφήνει τα μικρότερα συστατικά του διαλύματος, που είναι συνήθως τα μόρια του διαλύτη (νερού), να τη διασχίσουν ελεύθερα. (Warsinger et al., 2016)



Εικόνα 31: α) Ροή κατά την ώσμωση, β) Ροή κατά την αντίστροφη ώσμωση. Πηγή: (Wilf, 2014)

Η αντίστροφη ώσμωση μπορεί να απομακρύνει πολλούς τύπους διαλυμένων και αιωρούμενων χημικών ουσιών, καθώς και βιολογικών (κυρίως βακτηρίδια) από το νερό και χρησιμοποιείται, τόσο στις βιομηχανικές διαδικασίες, όσο και στην παραγωγή πόσιμου νερού. (Warsinger et al., 2016)

Ωστόσο, η αντίστροφη ώσμωση, δε θα πρέπει να συγχέεται με τη συνηθισμένο φιλτράρισμα (διήθηση μέσω μεμβράνης) ενός διαλύματος. Η διαφορά είναι ότι ο κυρίαρχος μηχανισμός κατά το φιλτράρισμα είναι ο αποκλεισμός λόγω μεγέθους, όπου οι πόροι είναι 0,01 μικρόμετρα ή μεγαλύτεροι, έτσι ώστε η διαδικασία να μπορεί θεωρητικά να αποδώσει τέλεια, ανεξάρτητα από παραμέτρους όπως η πίεση και η συγκέντρωση του διαλύματος. Αντίθετα, η διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης συνεπάγεται τη διάχυση του διαλύτη σε μία μεμβράνη που δεν είναι πορώδης ή χρησιμοποιεί νανοδιήθηση με πόρους μεγέθους 0,001 μικρομέτρων. Ο κυρίαρχος μηχανισμός αφαίρεσης των ουσιών του διαλύματος κατά την αντίστροφη ώσμωση βασίζεται στις διαφορές στη διαλυτότητα ή στη διάχυση των συστατικών και η εξαρτάται από την πίεση, τη συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας και άλλους παράγοντες. (Crittenden et al., 2005)

Η αντίστροφη ώσμωση συγκαταλέγεται στις καλύτερες διαθέσιμες μεθόδους φιλτραρίσματος. Οι μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης αποτελούν την πιο αποτελεσματική κατηγορία μεμβρανών, καθώς έχουν τη δυνατότητα να φιλτράρουν σωματίδια με διάμετρο από 0.1nm (Wimalawansa, 2013). Η μεμβράνη αντίστροφης ώσμωσης δρα ως φραγμός σε όλα τα

διαλυμένα άλατα και τα ανόργανα μόρια, καθώς και σε οργανικά μόρια με μοριακό βάρος μεγαλύτερο του 100. Από την άλλη, τα μόρια νερού περνούν ελεύθερα μέσω της μεμβράνης δημιουργώντας ένα καθαρό παραγόμενο ρεύμα. Η απόρριψη των διαλυμένων αλάτων είναι συνήθως από 95% ως και μεγαλύτερη από 99%, ανάλογα με παράγοντες όπως ο τύπος της μεμβράνης, η σύνθεση τροφοδοσίας, η θερμοκρασία και ο σχεδιασμός του συστήματος. (Dow, 2017)

3.1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Το 1748 παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το φαινόμενο της ώσμωσης μέσω ημιπερατών μεμβρανών από τον Jean-Antoine Nollet. Από τότε, και μέχρι το 1950, η ώσμωση αποτελούσε ένα φαινόμενο που μπορούσε να παρατηρηθεί μόνο σε συνθήκες εργαστηρίου. (Glater, 1998).

Τη δεκαετία του 1950 επιστήμονες από το πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια ξεκίνησαν να διερευνούν τη δυνατότητα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση και, μαζί με το πανεπιστήμιο της Φλόριντα, παρέδωσαν τα πρώτα αποτελέσματα παραγωγής φρέσκου γλυκού νερού από θαλασσινό νερό. Ωστόσο, η ροή ήταν ακόμη πολύ χαμηλή για να μπορεί να αξιοποιηθεί εμπορικά. (Glater, 1998).

Οι πρώτες μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης αναπτύχθηκαν στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια στο Λος Άντζελες, από τους Loeb και Sourirajan, οι οποίοι δημιούργησαν την πρώτη μεμβράνη για την παραγωγή γλυκού νερού από θαλασσινό νερό (Buros, 1980).

Ο John Cadotte, της FilmTec Corporation, ανακάλυψε ότι μπορούν να κατασκευαστούν μεμβράνες με πολύ υψηλή ροή και χαμηλή διαπερατότητα στο αλάτι από υλικό που έχει προκύψει με πολυμερισμό m-φαινυλενο διαμίνης και τριμεσοϋλοχλωριδίου (Cadotte, 1981). Σχεδόν όλες οι εμπορικές μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης κατασκευάζονται σήμερα με βάση την πατέντα του Cadotte. Μέχρι το τέλος του 2001, περίπου 15.200 μονάδες αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση βρίσκονταν σε λειτουργία ή στο στάδιο του σχεδιασμού σε όλον τον κόσμο (Crittenden et al. 2005).

Τον 20 αιώνα, η αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση γνώρισε σημαντική εξάπλωση ως μέθοδος σε περιοχές με πολύ χαμηλή διαθεσιμότητα γλυκού νερού και άφθονα ενεργειακά αποθέματα που ήταν απαραίτητα για τη διεξαγωγή της αφαλάτωσης, όπως η Μέση Ανατολή ή απομακρυσμένες παράκτιες και νησιωτικές κοινότητες. Με την πάροδο των ετών, όσο αυξανόταν το παγκόσμιο πρόβλημα λειψυδρίας και βελτιωνόταν η παραγωγικότητα της

μεθόδου, η αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση εξαπλώθηκε και έξω από τη Μέση Ανατολή και ταξίδεψε στις ΗΠΑ, την Ισπανία, την Ιαπωνία και πολλές ακόμη χώρες. (Zander et al., 2008)

Το 1977, το Cape Coral της Φλόριντα έγινε η πρώτη περιοχή στις ΗΠΑ που χρησιμοποίησε μονάδα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση σε μεγάλη κλίμακα. Η ομώνυμη μονάδα αφαλάτωσης που ξεκίνησε να λειτουργεί στην περιοχή είχε αρχικά ικανότητα παραγωγής 11,35 εκατομμύρια λίτρα γλυκού νερού την ημέρα. Μέχρι το 1985, εξαιτίας της ραγδαίας αύξησης του πληθυσμού του, το Cape Coral είχε τη μεγαλύτερη μονάδα αφαλάτωσης νερού με αντίστροφη ώσμωση στον κόσμο, ικανή να παράγει 56,8 εκατομμύρια λίτρα νερό της ημέρα.

Το 2015 η παγκόσμια παραγωγή γλυκού νερού με τη μέθοδο της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση υπολογίστηκε ότι αυξανόταν συνολικά περίπου 87 εκατομμύρια κυβικά μέτρα την ημέρα (International Desalination Association, 2015).

Σήμερα, η μεγαλύτερη μονάδα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση στον κόσμο, είναι το Sorek, στο Ισραήλ. Βρίσκεται σε απόσταση 15 χιλιομέτρα νοτίως της πρωτεύουσας Τελ Αβίβ και ξεκίνησε να λειτουργεί τον Οκτώβριο του 2013 με ικανότητα αφαλάτωσης 624 εκατομμυρίων λίτρων νερού την ημέρα (<https://www.water-technology.net/projects/sorek-desalination-plant/>).



Εικόνα 32: Sorek Desalination Plant, 2016. Πηγή: IDE Technologies.

Μάλιστα, το Ισραήλ καλύπτει το 80% των εγχώριων αναγκών του σε αφαλατωμένο νερό με τη χρήση αυτής της μεθόδου, η οποία αποδείχτηκε σωτήρια για την εθνική του οικονομία στην αυγή του 21^{ου} αιώνα. (Jacobsen, 2016).

Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Αφαλάτωσης (International Desalination Association), το 2011, η αντίστροφη ώσμωση χρησιμοποιούνταν στο 66% των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης (0,0445 από τα 0,0674 km³/ημέρα) και σχεδόν σε όλες τις καινούργιες μονάδες.

3.1.2 Αφαλάτωση θαλασσινού νερού με αντίστροφη ώσμωση (SWRO)

Οι μονάδες αντίστροφης ώσμωσης για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού είναι οι κυρίαρχες και έχουν ως πηγή, είτε πηγάδια θαλασσών, είτε την ανοιχτή θάλασσα. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο πηγών είναι οι συγκεντρώσεις οργανικής ύλης και σωματιδίων στο νερό, που στην περίπτωση της ανοικτής θάλασσας είναι πολύ μεγαλύτερες, με αποτέλεσμα να προκαλούν εύκολα φθορές και βλάβες στη λειτουργία των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης (Μιχαλόπουλος, 2013).

3.1.3 Αφαλάτωση υφάλμυρου νερού με αντίστροφη ώσμωση (BWRO)

Ως επί το πλείστον, οι πηγές υφάλμυρου νερού είναι υπόγειες. Τα υπόγεια ύδατα είναι είτε φυσικά, είτε έχουν γίνει υφάλμυρα λόγω διείσδυσης θαλασσινού νερού ή ανθρωπογενούς δραστηριότητας (π.χ. άρδευση) (Μιχαλόπουλος, 2013). Το υφάλμυρο νερό περιέχει ένα μεγάλο εύρος περιεκτικότητας σε άλατα. Η σύστασή του εξαρτάται από τον υδροφόρο από τον οποίο

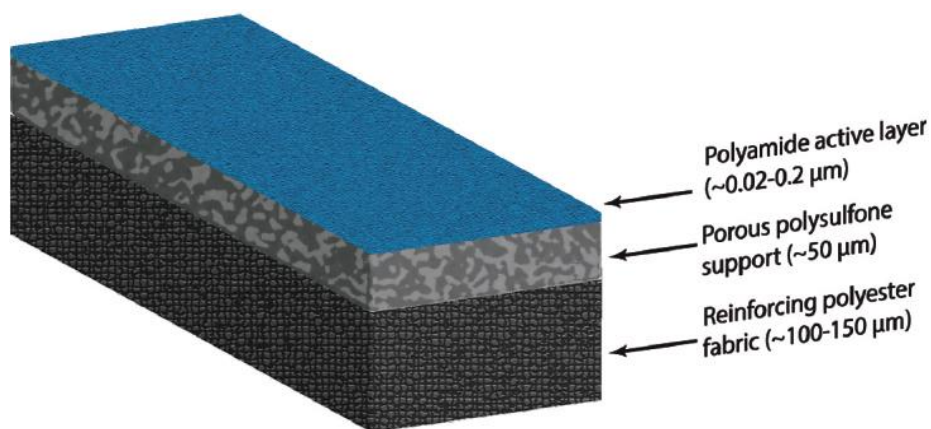
προέρχεται. Όταν ο υδροφόρος γειτνιάζει με τη θάλασσα είναι πιθανή η διείσδυση θαλασσινού νερού και, κατά επέκταση, η σημαντική αύξηση της αλατότητας του νερού. Αυτό το φαινόμενο είναι συνηθισμένο στην Ελλάδα και ιδιαίτερα σε νησιωτικές περιοχές. (Υφαντής, 2011).

3.2 Ταξινόμηση υλικών και δομής των μεμβρανών

Οι μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης ταξινομούνται ανάλογα με το υλικό του πολυμερούς της μεμβράνης, καθώς και ανάλογα με τη δομή και διάταξη. Σύμφωνα με τη δομή τους οι μεμβράνες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τις συμβατικές μεμβράνες λεπτού συνθετικού υμένα (Thin-Film Composite) και τις μεμβράνες λεπτού νανο-συνθετικού υμένα (Thin-Film Nanocomposite). Ανάλογα με το υλικό του υμένα, οι συμβατικές μεμβράνες ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες: πολυαμιδίου και οξικής κυτταρίνης. Τέλος, ανάλογα με τη διάταξη των μεμβρανών στο χώρο, οι μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: στις μεμβράνες με σπειροειδές μέσο (spiral wound), στις μεμβράνες με κοίλες ίνες (hallow fiber) και στις μεμβράνες με επίπεδα φύλλα (plate and frame). (Voutchkov, 2013)

3.2.1 Συμβατικές μεμβράνες λεπτού συνθετικού υμένα

Οι μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης που χρησιμοποιούνται ευρέως για αφαλάτωση αποτελούνται από έναν ημιπερατό λεπτό υμένα (0,2μm) ο οποίος αποτελείται είτε από αρωματικό πολυαμίδιο (PA – Polyamide aromatic), είτε από οξική κυτταρίνη (CA – Cellulose Acetate). Ο λεπτός υμένας είναι που δίνει στη μεμβράνη την ιδιότητα να αποκλείει τα άλατα. Αυτός υποστηρίζεται από ένα μικροπορώδες στρώμα (0,025 ως 0,050mm) που με τη σειρά του απλώνεται πάνω σε ένα στρώμα ενισχυτικού υφάσματος (βλ. Εικόνα 3-2). Ο λόγος ύπαρξης αυτών των δύο υποστρωμάτων είναι για να υποστηρίξουν τη διάταξη της μεμβράνης στο χώρο και να διατηρήσουν την ακεραιότητα και την αντοχή της. (Voutchkov, 2013)

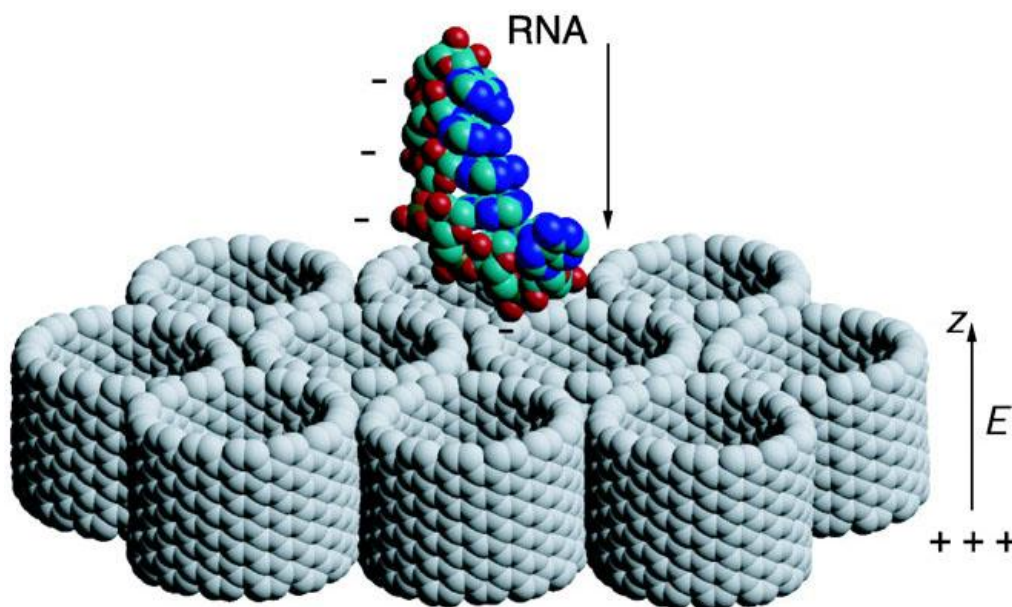


Εικόνα 33: Τυπική δομή μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης λεπτού συνθετικού υμένα

3.2.2 Μεμβράνες λεπτού νανο-συνθετικού υμένα

Οι μεμβράνες νανο-συνθετικού υμένα, είτε ενσωματώνουν ανόργανα νανοσωματίδια μέσα στη δομή του κοινού συνθετικού υμένα, είτε αποτελούνται από έναν πορώδη υμένα εξαιρετικά πυκνής δομής που αποτελείται από συστάδες μικροσκοπικών νανοσωληνών (βλ. Εικόνα 3-3)

Οι μεμβράνες νανο-συνθετικού υμένα έχει υπολογιστεί ότι διαθέτουν υψηλότερη επιλεκτική διαπερατότητα, δηλαδή ικανότητα να μεταφέρουν περισσότερο νερό δια μέσω της ίδιας επιφάνειας, υπό την ίδια ασκούμενη πίεση, σε σχέση με τις κοινές μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης. Επιπρόσθετα, διαθέτουν συγκρίσιμο ή χαμηλότερο ρυθμό φθοράς σε σχέση με τις τυπικές μεμβράνες λεπτού συνθετικού υμένα και μπορούν να υποστούν περαιτέρω τεχνολογική ανάπτυξη προκειμένου να απορρίπτουν επιλεκτικά συγκεκριμένα ιόντα. (Voutchkov, 2013)



Εικόνα 34: Σχηματική απεικόνιση δομής λεπτού νανοςυνθετικού υμένα

Έχει υπολογιστεί ότι αν εξελεγχθεί η επιστήμη των υλικών σε σημείο που να επιτρέπει μία πλήρη στοίχιση των νανοσωληνών στην επιφάνεια της μεμβράνης, θα μπορούσε να πολλαπλασιάσει την ποσότητα νερού που περνάει ανά μονάδα επιφάνειας σε σχέση με τις κοινές μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης που είναι διαθέσιμες στην αγορά. Μια τέτοια εξέλιξη θα οδηγούσε σε σημαντική μείωση του κόστους παραγωγής γλυκού νερού. (Das et al., 2014)

3.2.3 Μεμβράνες αρωματικού πολυαμιδίου (PA)

Οι μεμβράνες αρωματικού πολυαμιδίου (PA) είναι οι πιο ευρέως διαδεδομένες μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης. Βρίσκουν αναρίθμητες εφαρμογές, τόσο στη βιομηχανία, όσο και στην οικιακή ή φορητή αφαλάτωση του νερού. Ο λεπτός πολυαμιδικός υμένας αυτού του τύπου εκτείνεται στην επιφάνεια της μεμβράνης και υποστηρίζεται από ένα στρώμα μικροπορώδους πολυσουλφόνης (βλ. προηγούμενη Εικόνα 3-2). (Wilf, 2014)

Οι μεμβράνες PA λειτουργούν σε χαμηλότερες πιέσεις και έχουν υψηλότερη αποδοτικότητα από τις μεμβράνες οξικής κυτταρίνης (CA). Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που είναι πιο διαδεδομένες. Επιπλέον, λειτουργούν σε μεγαλύτερο εύρος pH (2-12) που επιτρέπει ευκολότερη συντήρηση και καθάρισμα των μεμβρανών και έχουν μεγαλύτερο χρόνο ζωής (5-7 χρόνια) σε σύγκριση με τις μεμβράνες CA (3-5 χρόνια). Η επιφάνειά τους φορτίζεται αρνητικά όταν το pH του νερού υπερβαίνει το 5 και οδηγεί σε ακόμη καλύτερη απόθεση των αλάτων. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι όταν το pH του νερού είναι χαμηλότερο του 4, η επιφάνεια των μεμβρανών PA φορτίζεται θετικά και αυτό οδηγεί σε σημαντική μείωση της ικανότητας αφαλάτωσης. (Voutchkov, 2013)

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των μεμβρανών PA είναι ότι απαιτούν την αποχλωρίωση του νερού, καθώς καταστρέφονται εύκολα από την παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων χλωρίου (1000mg/L-ώρα). Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που οι μεμβράνες PA δεν είναι τόσο διαδεδομένες στην περιοχή της Μέσης Ανατολής όπου το νερό είναι πλούσιο σε οργανικά και η αποχλωρίωσή του απαιτεί μεγαλύτερες δαπάνες προεργασίας. Ωστόσο, η τεχνολογία ενίσχυσης της ανθεκτικότητας των μεμβρανών PA είναι πολλά υποσχόμενη και αναμένεται να υπερκεράσει σημαντικά τις μεμβράνες CA στο μέλλον. (Voutchkov, 2013)

3.2.4 Μεμβράνες οξικής κυτταρίνης (CA)

Ενώ οι μεμβράνες οξικής κυτταρίνης έχουν δομή τριών στρωμάτων παρόμοια με τη δομή των μεμβρανών πολυαμιδίου (PA), ωστόσο τα δύο άνω στρώματα (του λεπτού υμένα και του πορώδους πολυμερούς ενισχυτικού) αποτελούνται από διαφορετική μορφή του ίδιου CA πολυμερούς. Αντιθέτως, τα δύο άνω στρώματα στις μεμβράνες PA αποτελούνται από δύο εντελώς διαφορετικά πολυμερή, ο λεπτός ημιπερατός υμένας είναι κατασκευασμένος από πολυαμίδιο, ενώ το μικροπορώδες υποστήριγμα είναι κατασκευασμένο από πολυσουλφόνη. Παρόμοια με τις μεμβράνες PA, οι μεμβράνες CA έχουν έναν λεπτό υμένα πάχους 0,2μm, αλλά

το πάχος ολόκληρης της μεμβράνης είναι μικρότερο από εκείνο μιας PA μεμβράνης. (Υφαντής, 2011)

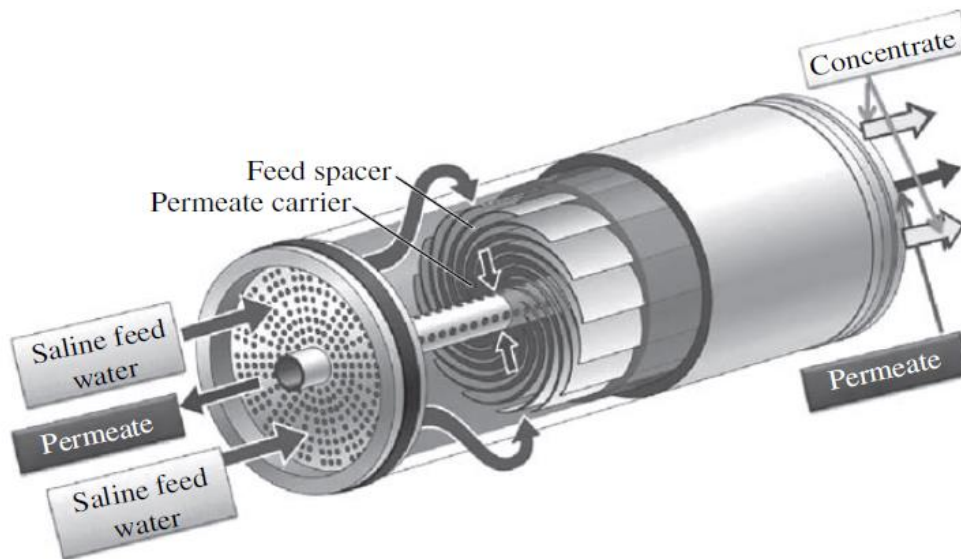
Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των μεμβρανών CA είναι ότι η επιφάνεια έχει πολύ μικρό φορτίο και θεωρείται πρακτικά αφόρτιστη, σε σχέση με τις PA μεμβράνες οι οποίες έχουν αρνητικό φορτίο και μπορούν πιο εύκολα να παρακαμφθούν από τα θετικά φορτισμένα ιόντα των πολυμερών που χρησιμοποιούνται για την προεργασία του νερού. Επιπλέον, οι μεμβράνες CA έχουν πιο απαλή επιφάνεια από τις PA μεμβράνες και επιτρέπουν στα ανεπιθύμητα συστατικά του νερού να γλιστρούν ευκολότερα πάνω τους χωρίς να τις διαπερνούν. (Voutchkov, 2013)

Ωστόσο, οι CA μεμβράνες διαθέτουν και μία σειρά από περιορισμούς, όπως ότι λειτουργούν σε στενά όρια pH (από 4 ως 6) και σε θερμοκρασίες μικρότερες από 35°C. Ωστόσο, αντέχουν υψηλές συγκεντρώσεις χλωρίου στο νερό ως και 1mg/L που βοηθάει στη μείωση της φθοράς της μεμβράνης από μικροοργανισμούς. Σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί το υψηλότερο ενεργειακό κόστος λειτουργίας, καθώς οι μεμβράνες CA είναι πυκνότερες και απαιτούν εφαρμογή υψηλότερων πιέσεων για να πετύχουν ανάλογη απόδοση γλυκού νερού με τις μεμβράνες PA. (Υφαντής Νικόλαος, 2011)

3.2.5 Μεμβράνες με σπειροειδές μέσο

Οι μεμβράνες με σπειροειδές μέσο αποτελούνται από ξεχωριστά επίπεδα φύλλα μεμβράνης που έχουν τη δομή τριών στρωμάτων που περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους (βλ. Εικόνα 3-2). Ένα τυπικό στοιχείο μεμβράνης με σπειροειδές μέσο διαμέτρου 8 ιντσών διαθέτει από 40 έως 42 επίπεδα φύλλα μεμβράνης. (Voutchkov, 2013)

Οι επίπεδες μεμβράνες συγκεντρώνονται σε 20 έως 21 φακέλους μεμβράνης, καθένας από τους οποίους αποτελείται από δύο φύλλα που χωρίζονται από ένα λεπτό πλαστικό δίχτυ για να σχηματίσει ένα κανάλι που επιτρέπει την εκκένωση του γλυκού νερού που διαχωρίζεται από το αλατούχο νερό. Οι τρεις από τις τέσσερις πλευρές του φακέλου μεμβράνης σφραγίζεται με κόλλα και η τέταρτη πλευρά είναι ανοιχτή. Τα φύλλα μεμβράνης διαχωρίζονται με διαχωριστικό τροφοδοσίας πάχους περίπου 0,7 ή 0,9mm, το οποίο σχηματίζει κανάλια τροφοδοσίας και διευκολύνει την ανάμιξη και τη μεταφορά του ρεύματος συμπύκνωσης τροφοδοσίας κατά μήκος της μεμβράνης. (Voutchkov, 2013)



Εικόνα 35: Απεικόνιση διάταξης μεμβρανών RO με σπειροειδές μέσο

Το πιεσμένο αλατούχο νερό εφαρμόζεται στην εξωτερική επιφάνεια του φακέλου. Το γλυκό νερό συγκεντρώνεται στο εσωτερικό του φακέλου, ανάμεσα στα δύο φύλλα και κατευθύνεται στην τέταρτη πλευρά που είναι ανοιχτή και συνδέεται με τον κεντρικό σωλήνα συλλογής γλυκού νερού. Αυτός ο σωλήνας συγκεντρώνει το παραγόμενο καθαρό νερό από όλους τους ανοιχτούς φακέλους μεμβράνης και το απομακρύνει από τη διάταξη. (Wilf, 2014)

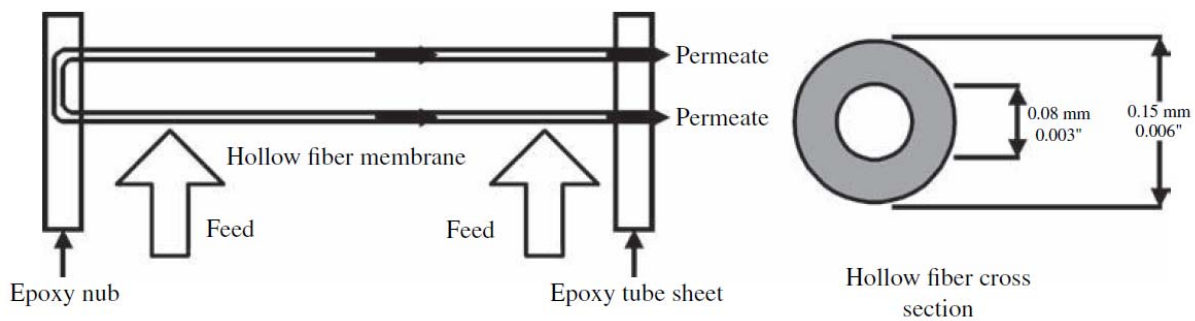
Μεσαία και μεγάλα μεγέθη μεμβρανών PA με σπειροειδές μέσο (διαμέτρου από 8 ως 16 ίντσες) εμφανίζουν περιορισμούς αναφορικά με ορισμένες παραμέτρους απόδοσης: θερμοκρασία νερού τροφοδοσίας (45°C), pH (από 2 έως 10), δείκτης πυκνότητας λάσπης (λιγότερο από 4), περιεκτικότητα σε χλώριο (όχι μετρήσιμες ποσότητες) και πίεση λειτουργίας νερού τροφοδοσίας (μέγιστο 41 ή 83 bar ανά 600 έως 1.200 lb/in² για μεμβράνες RO υφάλμυρου νερού και θαλασσινού νερού, αντίστοιχα). (Voutchkov, 2013)

3.2.6 Μεμβράνες με κοίλες ίνες

Στις μεμβράνες με κοίλες ίνες, η ημιπερατή μεμβράνη πάχους από 0,1 έως 1,0μm εφαρμόζεται ως επίστρωση στην επιφάνεια κοίλων ινών με διάμετρο συγκρίσιμη με εκείνη της ανθρώπινης τρίχας (42μm εσωτερική διάμετρος, 85μm εξωτερική διάμετρος). (Voutchkov, 2013). Οι κοίλες ίνες συγκεντρώνονται μέσα δέσμες και διπλώνονται περίπου στο μισό τους μήκος (βλ. Εικόνα 3-5).

Η δέσμη κοίλων ινών έχει διάμετρο 4 έως 8 ίντσες (101,6 έως 203,2mm) και βρίσκεται μέσα σε ένα κυλινδρικό περίβλημα που έχει άνοιγμα 6 έως 12 in. (152,4 έως 307,2mm) και 54

in. (1370 mm) μήκος. Και τα δύο άκρα της δέσμης σφραγίζονται εποξικά για να ενθυλακώσουν το νερό που εισάγεται στο σωλήνα με τρόπο που επιτρέπει όλο το συμπύκνωμα που παράγεται στο σωλήνα (permeate) να εξέρχεται από μία μόνο τοποθεσία - το πίσω άκρο της μεμβράνης. (Voutchkov, 2013)



Εικόνα 36: Αριστερά: Απεικόνιση της διάταξης μεμβράνης με κοίλες ίνες. Δεξιά: Κάτοψη των κοίλων ινών. Πηγή: Toyobo.

Το αλατούχο νερό εισάγεται σε όλο το μήκος της δέσμης των μεμβρανών μέσω ενός πλαστικού σωλήνα (διανομέας νερού τροφοδοσίας) που βρίσκεται στο κέντρο της δέσμης. Το νερό τροφοδοσίας ρέει ακτινικά και διαπερνά τη λεπτή μεμβράνη των κοίλων ινών. Τα άλατα και οι ακαθαρσίες που περιέχονται στο νερό συλλέγονται στην εξωτερική πλευρά των ινών και εκκενώνονται μέσω του σωλήνα συμπύκνωσης στο πίσω άκρο της διάταξης. (Voutchkov, 2013)

Σε σύγκριση με τη διάταξη των μεμβρανών με σπειροειδές μέσο, η διάταξη μεμβράνης με κοίλες ίνες έχει τη δυνατότητα αφαλάτωσης περίπου 4 φορές περισσότερου όγκου νερού, λόγω της μεγάλης έκτασης της ελεύθερης επιφάνειας των μεμβρανών που απλώνονται στις ίνες. Αυτό το χαρακτηριστικό τους, καθιστά τις μεμβράνες κοίλων ινών πιο κατάλληλες για χρήση σε περιοχές όπου το νερό έχει μεγαλύτερη συγκέντρωση αλάτων, όπως στον Περσικό Κόλπο, στον Ινδικό Ωκεανό και στην Ερυθρά Θάλασσα. Κατά συνέπεια, η εφαρμογή τους είναι ευρέως διαδεδομένη στην περιοχή της Μέσης Ανατολής. (Voutchkov, 2013)

3.2.7 Μεμβράνες με επίπεδα φύλλα

Οι μεμβράνες με επίπεδα φύλλα χρησιμοποιούνται κυρίως σε διατάξεις αντίστροφης ώσμωσης με πλάκες και πλαίσια. Σε αυτήν τη διάταξη, χρησιμοποιούνται φύλλα επίπεδης μεμβράνης παρόμοια με αυτά που τυλίγονται στα στοιχεία μεμβρανών με σπειροειδές μέσο. Συνήθως, δύο επίπεδες μεμβράνες τοποθετούνται σε πλάκες διήθησης με τη μεμβράνη να καλύπτει την εξωτερική πλευρά έτσι ώστε να σχηματίζουν φάκελο. Οι πλάκες φιλτραρίσματος είναι αναπόσπαστα μέρη αυτής της διάταξης αντίστροφης ώσμωσης. Οι περιοχές συλλογής

γλυκού νερού εγκαθίστανται μεταξύ κάθε ζεύγους φύλλων μεμβράνης, σχηματίζοντας ένα φάκελο για τη διευκόλυνση της συλλογής και την αποφυγή προσκόλλησης των μεμβρανών μεταξύ τους. Οι δεξαμενές νερού τροφοδοσίας / άλμης εγκαθίστανται μεταξύ των φακέλων μεμβράνης έως να επιτρέπουν τη ροή του αλατούχου νερού. (Voutchkov, 2013)



Εικόνα 37: Διάταξη μεμβρανών με επίπεδα φύλλα (πλάκες και πλαίσια). Πηγή: ErtelAlsop

Λόγω της χαμηλής πυκνότητας της διάταξης των μεμβρανών (είναι περίπου μισή από μία διάταξη σπειροειδούς μέσου) αυτός ο τύπος συστήματος αντίστροφης ώσμωσης είναι σημαντικά μεγαλύτερος σε όγκο και πολύ πιο δαπανηρός. Για το λόγο αυτό οι διατάξεις επίπεδων μεμβρανών δεν βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλες εγκαταστάσεις αφαλάτωσης νερού. Ωστόσο, τα επίπεδα φύλλα μεμβράνης είναι εύκολο να αφαιρεθούν και να καθαριστούν μεμονωμένα με το χέρι. Αυτό επιτρέπει την τήρηση πολύ καλύτερων συνθηκών υγιεινής μέσα στη διάταξη και για το λόγο αυτό, το σύστημα μεμβρανών με επίπεδα φύλλα προτιμάται για εφαρμογές στην επεξεργασία τροφίμων. (Wilf, 2014)

3.3 Άλλα πεδία εφαρμογής της μεθόδου

3.3.1 Φορητές συσκευές νερού με αντίστροφη ώσμωση.

Οι φορητές συσκευές νερού με αντίστροφη ώσμωση πωλούνται για προσωπική χρήση με στόχο τον καθαρισμό του νερού σε διάφορες τοποθεσίες. Για να λειτουργούν αποτελεσματικά, το νερό θα πρέπει να εισέρχεται υπό πίεση (πάνω από 280kPa) στην τροφοδοσία της διάταξης. (Knorr, Voigt & Jaeger, 2012). Η φορητές συσκευές αντίστροφης ώσμωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν από πληθυσμούς που ζουν σε αγροτικές περιοχές χωρίς καθαρό νερό, απομακρυσμένοι από τα αστικά συστήματα ύδρευσης. Έτσι, οι άνθρωποι της υπαίθρου μπορούν

να φιλτράρουν το νερό των ποταμών ή των ωκεανών μόνοι τους. Ορισμένοι ταξιδιώτες μακρινών προορισμών μέσω θαλάσσης, ή κατασκηνωτές σε απομακρυσμένα νησιά, χρησιμοποιούν τις φορητές συσκευές αφαλάτωσης σε συνδυασμό με έναν ή περισσότερους αποστειρωτές υπεριώδους ακτινοβολίας.

3.3.2 Παραγωγή εμφιαλωμένου μεταλλικού νερού

Κατά την παραγωγή εμφιαλωμένου μεταλλικού νερού, το νερό διέρχεται μέσα από μία διάταξη αντίστροφης ώσμωσης προκειμένου να απομακρυνθούν τα άλατα, οι ρύποι και οι μικροοργανισμοί. Ωστόσο, στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης αυτή η μέθοδος επεξεργασίας του φυσικού μεταλλικού νερού δεν επιτρέπεται από τις σχετικές ευρωπαϊκές οδηγίες (Council Directive, 1980). Κατά την εφαρμογή, ένα μέρος των ζωντανών βακτηρίων περνάει από τις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης οι οποίες διαθέτουν μικρές ατέλειες. Για το λόγο αυτό, τα συστήματα καθαρισμού του νερού με αντίστροφη ώσμωση συνήθως συνοδεύονται από ολόκληρες διατάξεις που χρησιμοποιούν υπεριώδη ακτινοβολία ή όζον για να αποτρέψουν τη μικροβιολογική μόλυνση.

3.3.3 Καθαρισμός υδάτινων λυμάτων

Στη βιομηχανία, η αντίστροφη ώσμωση χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση των μεταλλικών στοιχείων από το νερό που συγκεντρώνεται στα μπόιλερ των εργοστασίων παραγωγής ενέργειας. Το νερό περνάει από απόσταξη πολλές φορές. Πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο καθαρό ούτως ώστε να μη διαβρώνει τα μηχανήματα και να μην προκαλεί πτώση στην απόδοση της τουρμπίνας. (Shah, 2008)

Επιπλέον, η αντίστροφη ώσμωση χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό υφάλμυρου νερού που διαρρέει από το έδαφος. Αν το νερό ξεπερνάει σε όγκο τα 500 m³ την ημέρα, τότε πρέπει να περάσει πρώτα από επεξεργασία καθαρισμού και έπειτα να εισέλθει στη διάταξη αντίστροφης ώσμωσης. Με αυτή τη μέθοδο, το κόστος επεξεργασίας του νερού μειώνεται δραστικά και η παρατείνεται η ζωή των μεμβρανών του συστήματος αντίστροφης ώσμωσης. Η χρήση της αντίστροφης ώσμωσης για τον καθαρισμό υδάτινων λυμάτων δεν απαιτεί θερμική ενέργεια. Η ροή νερού μέσα στη διάταξη μπορεί να κανονικοποιηθεί με την εφαρμογή αντλιών υψηλών πιέσεων. Η αποκατάσταση του γλυκού νερού εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες όπως το μέγεθος των μεμβρανών και των πόρων τους, τη θερμοκρασία, την εφαρμοζόμενη πίεση και την επιφάνεια επαφής της μεμβράνης. (Grabowski, 2010)

3.3.4 Επεξεργασία του νερού των ενυδρείων

Σε πολλά ενυδρεία χρησιμοποιούνται συστήματα αντίστροφης ώσμωσης για την παραγωγή του κατάλληλου τεχνητού νερού. Το συνηθισμένο νερό της βρύσης μπορεί να περιέχει υπερβολικές συγκεντρώσεις χλωρίου, χλωραμινών, χαλκού, νιτρικών, φωσφορικών και άλλων αλάτων, ή επικίνδυνων χημικών για τους ευαίσθητους οργανισμούς που ζουν μέσα στο ενυδρείο. Ως εκ τούτου, απαιτείται η επεξεργασία του νερού η οποία γίνεται συνήθως με συνδυασμό των μεθόδων της αντίστροφης ώσμωσης και του απιονισμού του νερού. Αυτή η μέθοδος είναι αποτελεσματικότερη, καθώς και πιο οικονομική από άλλες μεθόδους.

3.3.5 Επεξεργασία τροφίμων

Παρόλο που η αντίστροφη ώσμωση αναγνωρίζεται ως κορυφαία τεχνολογία στις διαδικασίες αφαλάτωσης, αποτελεί επίσης μία καθιερωμένη εφαρμογή στην επεξεργασία τροφίμων λόγω των ποικίλων πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει έναντι των συμβατικών μεθόδων, όπως η διατήρηση θερμοευαίσθητων ενώσεων, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και το χαμηλό επενδυτικό κόστος. (Cassano, Rastogi & Basile, 2020)

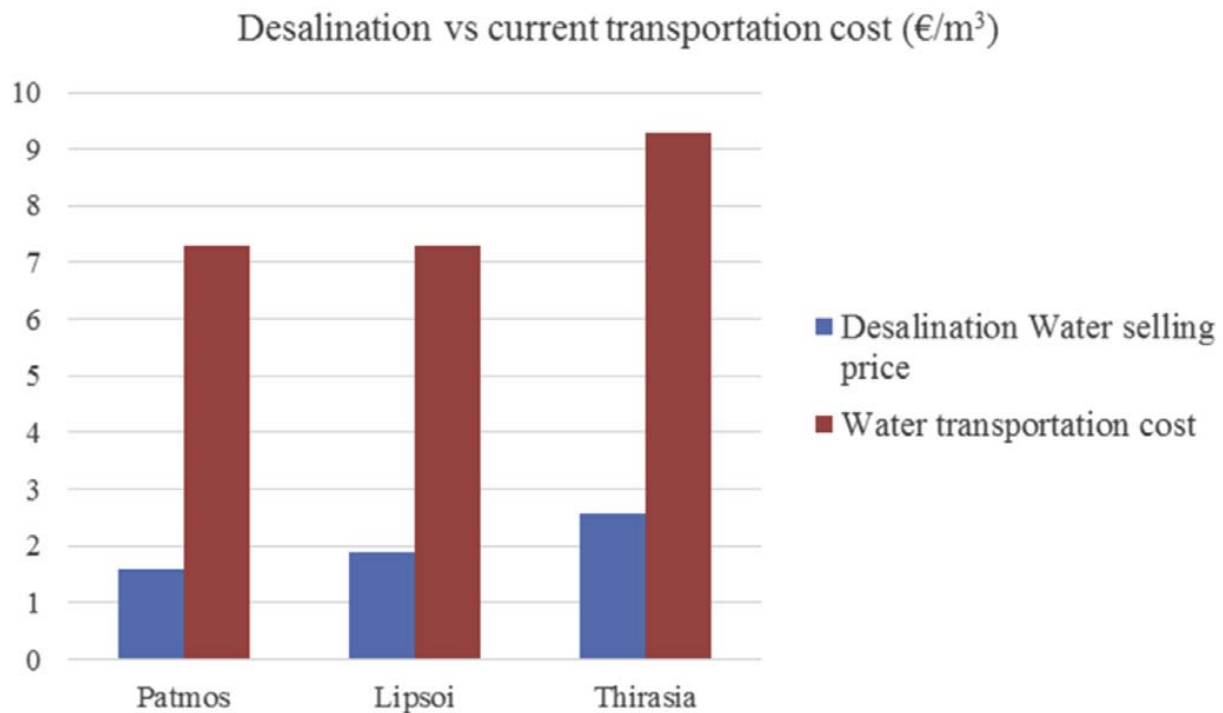
Οι κυριότερες εφαρμογές κατά την επεξεργασία τροφίμων περιλαμβάνουν τη συγκέντρωση χυμών φρούτων και λαχανικών, την προσυμπύκνωση του γάλακτος και του ορού γάλακτος, την βελτίωση της ποιότητας του μούστου και την αφαίρεση της αιθανόλης από το κρασί. Επιπλέον, η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης συμβάλλει στην ανάκτηση βιολογικά δραστικών ενώσεων από τα λύματα αγροτροφικών προϊόντων, σύμφωνα με τις σύγχρονες κατευθύνσεις της βιομηχανικής οικολογίας. Η εφαρμογή της μεθόδου προσφέρει αξιοσημείωτα οφέλη όσον αφορά την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος και τη διαφύλαξη του περιβάλλοντος. (Cassano et al., 2020)

3.4 Οικονομικά στοιχεία

Περιοχές που έχουν παντελή έλλειψη ή μικρή διαθεσιμότητα επιφανειακών υδάτων επιλέγουν ως πιο οικονομικά συμφέρουσα την αφαλάτωση, σε σύγκριση με τη μεταφορά νερού από μακριά ή την εφαρμογή άλλων μεθόδων καθαρισμού του νερού, όπως η θερμική απόσταξη. Η αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση είναι η μέθοδος αφαλάτωσης που κερδίζει έδαφος χάρη στη σχετικά χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση που απαιτεί. (Warsinger et al., 2015)

Για παράδειγμα, μελέτη των Mentis D., et al. (2015) φανερώνει ότι ορισμένα ελληνικά νησιά αντιμετωπίζουν οξύ πρόβλημα λειψυδρίας, ενώ το υψηλό κόστος μεταφοράς γλυκού νερού από την ηπειρωτική Ελλάδα επιβαρύνει τον προϋπολογισμό του ελληνικού κράτους και

πλήττει τον τουρισμό και τη ζωή στο νησί. Προτείνουν την αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση σε συνδυασμό με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας διεξάγοντας συγκριτική μελέτη ανάμεσα στο κόστος παραγωγής γλυκού νερού που προκύπτει από τη μέθοδο αυτή, έναντι της μεταφοράς νερού από την ηπειρωτική χώρα (βλ. **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της ναφοράς δεν βρέθηκε.**).



Εικόνα 38: Συγκριτικό διάγραμμα ανάμεσα στο κόστος αφαλάτωσης και στο κόστος μεταφοράς γλυκού νερού για τα νησιά Πάτμος, Λειψοί και Θηρασία.(Mentis et al., 2015)

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, οι τεχνολογικές εξελίξεις στη μέθοδο SWRO, σε συνδυασμό με την εφαρμογή τους σε μεγάλες εγκαταστάσεις, την τοποθέτησή τους κοντά σε μονάδες παραγωγής ενέργειας και τον εντεινόμενο ανταγωνισμό από τη φιλοσοφία Build-Own-Operate-Transfer (BOOT) στη βιομηχανία έχουν ως αποτέλεσμα μία δραματική μείωση στο κόστους παραγωγής νερού μέσω αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση. (International Water Association, 2016).

Ένας από τους παράγοντες-κλειδιά για την οικονομική βελτιστοποίηση των επενδύσεων στην αφαλάτωση είναι η εξέλιξη της τεχνολογίας των μεμβρανών. Μεγάλης αποδοτικότητας μεμβράνες σχεδιάζονται με χαρακτηριστικά που επιτρέπουν σε ακόμη μεγαλύτερο όγκο νερού να τις διαπερνά με ακόμη καλύτερα αποτελέσματα αφαλάτωσης. Αυτό επιτυγχάνεται με την αύξηση της ενεργού επιφάνειας των μεμβρανών και της πυκνότερης αναδίπλωσής τους κατά

τρόπο που αυξάνει σημαντικά την παραγωγή γλυκού νερού χρησιμοποιώντας διατάξεις της ίδιας διαμέτρου. (IWA, 2016).

Τα επιτεύγματα στην τεχνολογία αφαλάτωσης προσεγγίζουν σε δυναμική αυτά της τεχνολογίας ηλεκτρονικών υπολογιστών και, όπως με τους υπολογιστές, οι μεμβράνες SWRO έχουν γίνει πολλές φορές μικρότερες, πιο παραγωγικές και πιο φθηνές από τις πρώτες μεμβράνες. (IWA, 2016).

Τα τεχνολογικά επιτεύγματα στη μέθοδο της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση αναμένεται να μειώσουν το κόστος παραγωγής γλυκού νερού κατά 20% για τα επόμενα 5 χρόνια (από το 2017 ως το 2022) και κατά 60% για τα επόμενα 20 χρόνια (από το 2017 ως το 2037), όπως φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα:

Πίνακας 8: Πίνακας πρόβλεψης κόστους αφαλάτωσης για μεσαίες και μεγάλες μονάδες παραγωγής (Πηγή: IWA, 2016)

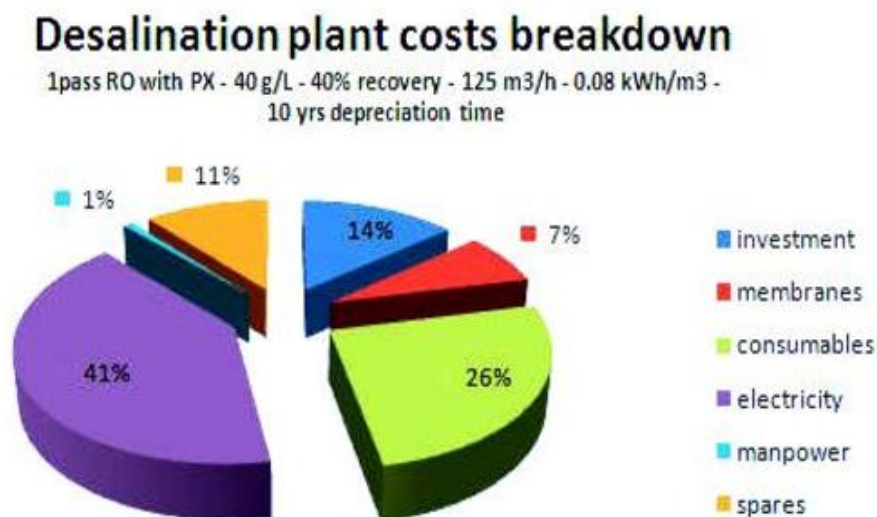
Table 1 – Forecast of Desalination Costs for Medium and Large Size Projects

| Parameter for Best-in Class Desalination Plants | Year 2016 | Within 20 Years | |
|--|-----------|-----------------|-----------|
| | | Within 5 Years | |
| Cost of Water (US\$/m ³) | 0.8 – 1.2 | 0.6 – 1.0 | 0.3 – 0.5 |
| Construction Cost (US\$/MLD) | 1.2 – 2.2 | 1.0 – 1.8 | 0.5 – 0.9 |
| Electrical Energy Use (kWh/m³) | 3.5 – 4.0 | 2.8 – 3.2 | 2.1 – 2.4 |
| Membrane Productivity (m ³ /membrane) | 28-47 | 35-55 | 95-120 |

Σύμφωνα με το σύγγραμμα των Karabelas et al. (2017) η σύγχρονη Έρευνα και Ανάπτυξη στο πλαίσιο της βιομηχανικής χρήσης των συστημάτων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση εστιάζει στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των αντλιών υψηλής πίεσης και των συσκευών ανάκτησης ενέργειας, καθώς και των χαρακτηριστικών διαπερατότητας και αντιρρυπαντικής τεχνολογίας των μεμβρανών. Παράλληλα, διεξάγονται προσπάθειες βελτίωσης

της διάταξης των μεμβρανών. Η εγκατάσταση εισαγωγής ακατέργαστου νερού και οι μέθοδοι διαχείρισης λυμάτων-άλμης τείνουν να προσελκύουν όλο και περισσότερο την προσοχή της επιστημονικής έρευνας και αναμένεται να κυριαρχήσουν στη συνολική αξιολόγηση της βιωσιμότητας του πλανήτη τα επόμενα χρόνια, παρά τη μέτρια άμεση συμβολή τους στο κόστος παραγωγής ανά μονάδα νερού προς το παρόν. Κατά συνέπεια, δίνεται σαφής προτεραιότητα στη διεξαγωγή ερευνών για τις μεθόδους διαχείρισης και αξιοποίησης της άλμης.

Μελέτες την τελευταίας δεκαετίας (Κο, 2013) έχουν υπολογίσει ότι κατά τη λειτουργία μίας μονάδας αφαλάτωσης, οι ενεργειακές δαπάνες συνεισφέρουν κατά το μεγαλύτερο μέρος στα συνολικά έξοδα λειτουργίας, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα πίτας:



Εικόνα 39: Ταξινόμηση δαπανών για τη λειτουργία μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση σε βάθος 10ετίας (Κο, 2013).

Όπως μπορούμε να δούμε στο παραπάνω διάγραμμα, οι συνολικές δαπάνες σε βάθος δεκαετίας για τη λειτουργία μίας τυπικής μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση μίας εισόδου, για την αφαλάτωση ως και 40% του θαλασσινού νερού περιεκτικότητας αλάτων 40g/L, με ικανότητα παραγωγής 125.000 λίτρα γλυκού νερού την ώρα και ενεργειακές δαπάνες 0.08kWH/m³, κατανέμονται ως εξής:

- 41% των δαπανών αφορούν την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, που αποτελεί το μεγαλύτερο οικονομικό έξοδο για τη λειτουργία της μονάδας.
- 26% των δαπανών αφορούν τα αναλώσιμα υλικά συντήρησης της μονάδας
- 14% του συνολικού κόστους είναι το πάγιο κόστος της επένδυσης

- 11% των δαπανών αφορούν τα ανταλλακτικά
- 7% είναι το κόστος των μεμβρανών
- 1% είναι το κόστος ανθρώπινης εργασίας

Η παραπάνω ανάλυση που διεξήχθη από τον Κο το 2013 είναι ενδεικτική για το ποιες είναι οι κύριες πηγές εξόδων για τη λειτουργία και τη συντήρηση μίας μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση και υπογραμμίζει το υψηλό ενεργειακό κόστος.

Πράγματι, σύγχρονες μελέτες δείχνουν ότι ενώ η χρήση συμβατικών μεθόδων καθαρισμού επιφανειακών υδάτων απαιτούν ενεργειακή κατανάλωση 0,2-0,4 kWh/m³ και η έμμεση επανάχρηση πόσιμου νερού απαιτεί ενεργειακή κατανάλωση 1,5-2,0 kWh/m³, η μέθοδος της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση απαιτεί ενεργειακή κατανάλωση από 3,5 ως 4,5 kWh/m³ για να παράγει πόσιμο γλυκό νερό. (Kim & Hong, 2018). Επιπλέον, η περισσότερη ενέργεια που καταναλώνεται κατά την συνήθη αφαλάτωση προέρχεται από ορυκτά καύσιμα που συμβάλλουν σημαντικά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Για παράδειγμα η Αυστραλία, το 2015, παρουσίασε σημαντικές εκπομπές (1.193 kt) διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) λόγω των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης (Heihsel et al., 2019).

Τα παραπάνω στοιχεία φανερώνουν τους λόγους για τους οποίους η διεθνής ερευνητική προσπάθεια, πέρα από τη βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών των μεμβρανών και των διατάξεων, έχει στραφεί στην αναζήτηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας.

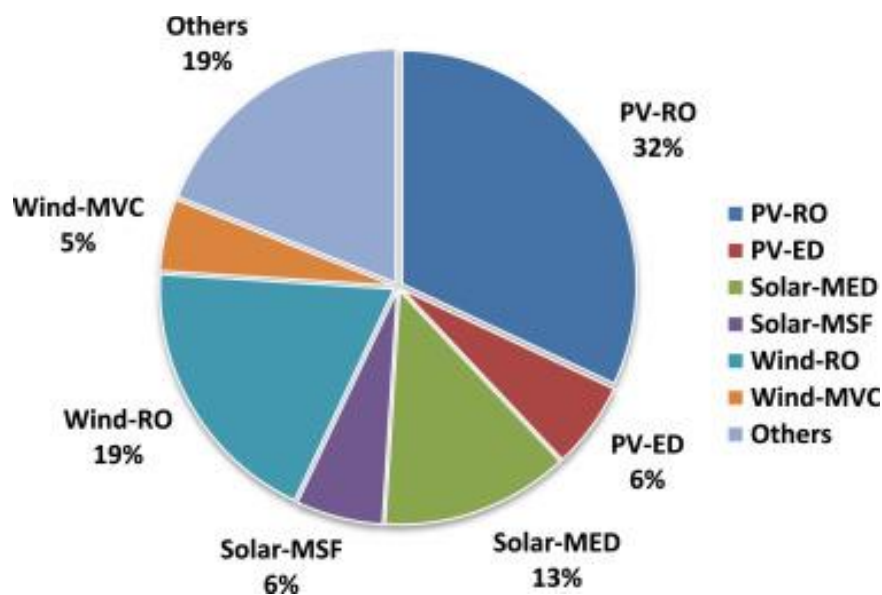
3.5 Υβριδικά συστήματα αντίστροφης ώσμωσης με τη χρήση ΑΠΕ

Η αφαλάτωση με τη χρήση συμβατικής ενέργειας είναι μία εντατική και δαπανηρή διαδικασία. Ωστόσο, η ηλιακή ενέργεια προσφέρεται σε αφθονία και αποτελεί μία λύση που βρίσκεται στο επίκεντρο της επιστημονικής έρευνας αναφορικά με την αντικατάσταση της συμβατικής ενέργειας με ανανεώσιμες πηγές κατά την αφαλάτωση.

Μία μονάδα αφαλάτωσης νερού με τη χρήση ηλιακής ενέργειας μπορεί να παράγει πόσιμο νερό από το νερό της θάλασσας χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκό σύστημα που μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια στην απαιτούμενη ενέργεια για την αντίστροφη ώσμωση. Χάρη στην εκτεταμένη διαθεσιμότητα του ηλιακού φωτός σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές του πλανήτη, η αντίστροφη ώσμωση με ηλιακή ενέργεια αποτελεί μία εξαιρετική λύση για απομονωμένες περιοχές που στερούνται ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. (Gude, Nirmalakhandan, Deng & Maganti, 2012)

Επιπλέον, η ηλιακή ενέργεια προσπερνάει το συνήθως υψηλό ενεργειακό κόστος λειτουργίας, καθώς και τις ρυπογόνες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και αποτελεί βιώσιμη λύση για την παραγωγή φρέσκου γλυκού νερού. Παρόλο που η απρόβλεπτη φύση του ηλιακού φωτός και η διακύμανση της έντασής του κατά τη διάρκεια της ημέρας καθιστά δύσκολη την πρόβλεψη της αποδοτικότητας των εγκαταστάσεων, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της νύχτας, ωστόσο, υπάρχουν ποικίλες λύσεις. Για παράδειγμα, οι μπαταρίες μπορούν να παρέχουν την ενέργεια που χρειάζεται ώστε να λειτουργεί η διάταξη αφαλάτωσης ακόμη και τη νύχτα και να επαναφορτίζονται από το ηλιακό φως κατά τη διάρκεια της ημέρας. Εκτός από τη χρήση συμβατικών μπαταριών, υπάρχει η και η λύση της θερμικής αποθήκευσης ενέργειας που μπορεί να διασφαλίσει την απρόσκοπτη λειτουργία κατά τη νύχτα ή τις συννεφιασμένες ημέρες, βελτιώνοντας τη συνολική αποδοτικότητα των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης. (Gude, et al., 2012)

Στο παρακάτω διάγραμμα πίτας συνοψίζονται οι μέθοδοι αφαλάτωσης που συνδυάζονται με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) και το ποσοστό χρήσης της κάθε τεχνικής.



Εικόνα 40: Ποσοστά χρήσης των τεχνικών αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση που αξιοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Όπου:

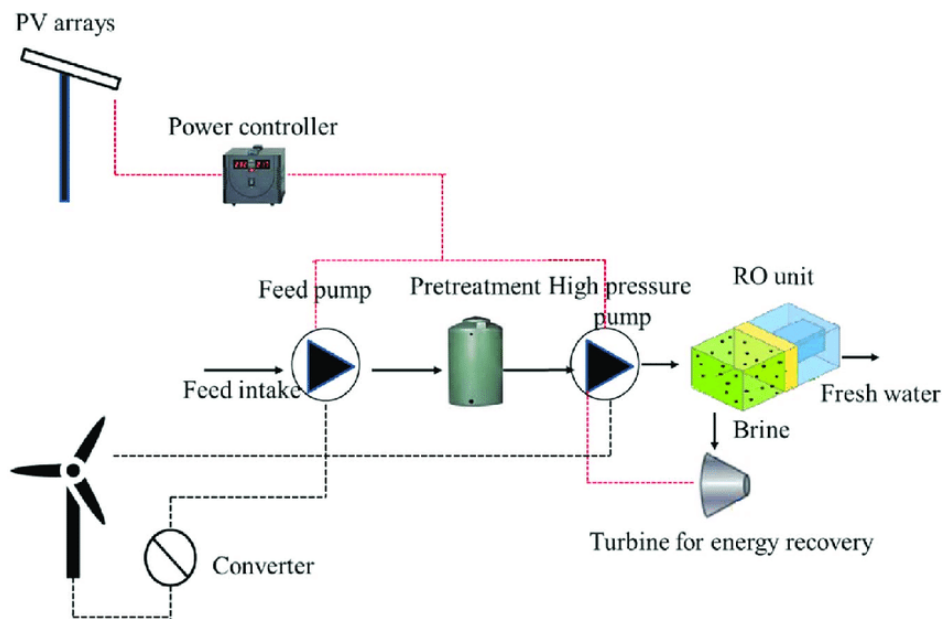
- PV-RO (Photovoltaic – Reverse Osmosis): Αντίστροφη Ωσμωση με Φωτοβολταϊκά
- PV-ED (Photovoltaic – Electrodialysis): Ηλεκτροδιάλυση με Φωτοβολταϊκά

- Solar-MED (Solar - Multi-Effect Distillation): Πολυβάθμια Απόσταξη με Ηλιακή Ακτινοβολία
- Solar-MSF (Solar - Multi-Stage Flash): Πολυβάθμια Ακαριαία Εκτόνωση με Ηλιακή Ακτινοβολία
- Wind-RO (Wind – Reverse Osmosis): Αντίστροφη Ώσμωση με Αιολική Ενέργεια
- Wind-MVC (Wind – Mechanical Vapor Compression): Αντίστροφη Ώσμωση με Μηχανική Συμπύκνωση Ατμού

Όπως μπορούμε να συμπεράνουμε από το παραπάνω διάγραμμα πίτας, οι εναλλακτικές μέθοδοι που περιλαμβάνουν αντίστροφη ώσμωση δεσπόζουν σε εφαρμογή. Η κύρια μέθοδος που εφαρμόζεται (σε ποσοστό 32%) είναι η PV-RO που συνδέει το σύστημα Αντίστροφης Ώσμωσης RO (Reverse Osmosis) με μία διάταξη παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά PV (Photovoltaic). Δεύτερη μέθοδος σε εφαρμογή (σε ποσοστό 19%) είναι η Wind-RO που συνδέει το σύστημα Αντίστροφης Ώσμωσης RO (Reverse Osmosis) με μία διάταξη αξιοποίησης αιολικής ενέργειας.

Με βάση σύγχρονες μελέτες που αφορούν τα φωτοβολταϊκά υποστηριζόμενα συστήματα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, χωρητικότητας 500 L/h δείχνουν ότι η παραγωγικότητα της μεμβράνης αυξάνεται όταν αυξάνεται και η θερμοκρασία του αλατούχου νερού που τροφοδοτεί το σύστημα (Ghafoor et al., 2020).

Σύμφωνα με συγκριτική μελέτη των Peng et al. (2018) χρησιμοποιήθηκαν δεκαεννέα εξελικτικοί αλγόριθμοι για τον προσδιορισμό του βέλτιστου μεγέθους ενός υβριδικού συστήματος ανανεώσιμης ενέργειας (HRES) το οποίο αποτελείται από μία ανεμογεννήτρια, ένα φωτοβολταϊκό πάνελ, μία μπαταρία και μία μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης. Η κύριες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας για τη μονάδα κατά την παραγωγή γλυκού νερού, μπορούν να είναι η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, ενώ οι μπαταρίες να χρησιμοποιούνται ως εφεδρικές πηγές.



Εικόνα 41: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση που συνδέεται με ηλιακή και αιολική ενεργειακή τροφοδοσία (Ali et al., 2018)

Η βελτιστοποίηση στοχεύει στη συνεχή κάλυψη του φορτίου, ελαχιστοποιώντας παράλληλα το κόστος του κύκλου ζωής του HRES, υπό την επιφύλαξη ορισμένων περιορισμών. Σε αυτή την προσπάθεια, συγκρίθηκαν διάφορες εκδοχές γνωστών προσεγγίσεων βελτιστοποίησης όπως η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων, η βελτιστοποίηση «σμήνους μελισσών» (bee swarm), η αναζήτηση αρμονίας, η προσομοίωση ανόπτησης, η χαοτική αναζήτηση και ο αλγόριθμος αναζήτησης tabu. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι υβριδικές τεχνικές βελτιστοποίησης παρέχουν την καλύτερη απόδοση μεταξύ των εξεταζόμενων αλγορίθμων και ότι η χρήση του HRES μειώνει το κόστος του συστήματος αφαλάτωσης και αυξάνει την αξιοπιστία του όσον αφορά την παραγωγή φρέσκου γλυκού νερού. (Peng et al., 2018)

Ανάλογη μελέτη των Khan Meer et al. (2018), που διεξήχθη για την περιοχή της Σαουδικής Αραβίας, δείχνει ότι η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κατά την αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση, όχι μόνο θα μειώσει σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, αλλά πρόκειται να μειώσει σημαντικά το κόστος παραγωγής νερού από υβριδικά συστήματα PV-wind-RO. Τα ευρήματα αυτά προμηνύουν πολύ καλές προοπτικές για την ανάπτυξη της σχετικής τεχνολογίας στο κοντινό μέλλον.

4 Σχεδιασμός/Υπολογισμοί συστήματος Αντίστροφης Ωσμωσης

Ένα ολόκληρο σύστημα επεξεργασίας νερού αντίστροφης ώσμωσης (RO) αποτελείται από το τμήμα προκατεργασίας, το τμήμα μεμβρανών και το τμήμα μετα-επεξεργασίας. Η προκατεργασία βελτιώνει την ποιότητα του ακατέργαστου νερού τροφοδοσίας ώστε να εξασφαλιστεί σταθερή απόδοση και η επιθυμητή παροχή στην αφαλάτωση. Στοχεύει επίσης στην αξιόπιστη λειτουργία των μεμβρανών μειώνοντας τις επικαθίσεις αλάτων, την μόλυνση-έμφραξη και αποικοδόμηση των μεμβρανών (Υφαντής, 2011). Η μετα-επεξεργασία χρησιμοποιείται για την επίτευξη της απαιτούμενης ποιότητας προϊόντος. Στην αφαλάτωση θαλασσινού νερού, αυτό συνήθως είναι η ρύθμιση του pH, η αποκατάσταση της σκληρότητας και η απολύμανση.

Το σύστημα των μεμβρανών περιλαμβάνει ένα σύνολο στοιχείων μεμβράνης, στεγασμένα σε δοχεία πίεσης τα οποία είναι διατεταγμένα με συγκεκριμένο τρόπο. Μια αντλία υψηλής πίεσης χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των δοχείων πίεσης. Όργανα, ανταλλακτικά και εργαλεία για υπηρεσίες προστίθενται όπως απαιτείται. Επίσης, ένα σύστημα clean-in-place (CIP) διευκολύνει τον καθαρισμό των μεμβρανών.

Το σύστημα μεμβράνης είναι μία πλήρης μονάδα με είσοδο για νερό τροφοδοσίας και εξόδους για το καθαρό νερό και το συμπύκνωμα. Η απόδοση του συστήματος RO χαρακτηρίζεται τυπικά από δύο παραμέτρους, τη ροή και την ποιότητα του προϊόντος. Αυτές οι παράμετροι πρέπει πάντα να αναφέρονται σε μια δεδομένη ανάλυση νερού τροφοδοσίας, πίεσης τροφοδοσίας και ανάκτησης. Ο στόχος του σχεδιαστή ενός συστήματος RO για μια συγκεκριμένη απαιτούμενη ροή προϊόντος είναι η ελαχιστοποίηση της πίεσης τροφοδοσίας και του κόστους της μεμβράνης, ενώ ταυτόχρονα μεγιστοποιείται η ποιότητα και η ανάκτηση του προϊόντος.

Ο βέλτιστος σχεδιασμός εξαρτάται από τη σχετική σημασία αυτών των πτυχών. Η ανάκτηση συστημάτων υφάλμυρου νερού περιορίζεται από τη διαλυτότητα των ελάχιστα διαλυτών αλάτων, 90% είναι περίπου το μέγιστο. Στην αφαλάτωση θαλασσινού νερού, το όριο ανάκτησης είναι περίπου 50% κι υπαγορεύεται από την οσμωτική πίεση του ρεύματος συμπυκνώματος.

Η πίεση τροφοδοσίας που απαιτείται για την παραγωγή της απαιτούμενης ροής καθαρού νερού για μια δεδομένη μεμβράνη εξαρτάται από την σχεδιασμένη ροή προϊόντος (ρυθμός ροής προϊόντος ανά μονάδα επιφάνειας μεμβράνης). Όσο υψηλότερη είναι η ροή προϊόντος ανά

μονάδα ενεργού περιοχής μεμβράνης, τόσο υψηλότερη είναι η πίεση τροφοδοσίας. Στα συστήματα θαλασσινού νερού η ροή προϊόντος είναι σχετικά χαμηλή ακόμη και στη μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση. Ωστόσο, η ροή προϊόντος θα μπορούσε να είναι πολύ υψηλή σε συστήματα υφάλμυρου νερού χωρίς να φτάσει το όριο των 600 psi (41 bar) για στοιχεία υφάλμυρου νερού. Αν και είναι δελεαστικό να αυξηθεί η ροή προϊόντος για να ελαχιστοποιηθεί το κόστος για στοιχεία μεμβράνης, η ροή πρέπει να περιοριστεί για να ελαχιστοποιηθεί η μόλυνση των μεμβρανών.

Από την εμπειρία, το όριο ροής που θα χρησιμοποιηθεί στη σχεδίαση του συστήματος εξαρτάται από την τάση ρύπανσης του νερού τροφοδοσίας. Ένα σύστημα που έχει σχεδιαστεί με υψηλούς ρυθμούς ροής προϊόντος είναι πιθανό να αντιμετωπίσει υψηλότερους ρυθμούς ρύπανσης και συχνότερο χημικό καθαρισμό. Μόνο η εμπειρία μπορεί να θέσει τα όρια της ροής διαπερατών για διαφορετικούς τύπους υδάτων. Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος μεμβράνης για ένα συγκεκριμένο νερό τροφοδοσίας, είναι πλεονεκτικό να γνωρίζουμε την απόδοση άλλων συστημάτων μεμβράνης που λειτουργούν στο ίδιο νερό. Ωστόσο, πολύ συχνά δεν υπάρχουν άλλα συστήματα μεμβράνης για σύγκριση. (Solutions, 2010)

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται κάποια γενικά στοιχεία σχεδιασμού για τις μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης.

Πίνακας 9: : Γενικά στοιχεία σχεδιασμού για μονάδες αντίστροφης ώσμωσης
(Πηγή:<https://www.lenntech.com/systems/reverse-osmosis/ro/rosmosis.htm#ixzz6QwlUosQD>)

| | TWRO Νερό βρύσης | BWRO Υφάλμυρο νερό | SWRO Θαλασσινό νερό |
|---------------------|--|--------------------------|---|
| Αλατότητα | < 1500 ppm | < 8000 ppm | 35000 - 45000 ppm |
| Ανάκτηση | 80% | 65-80% | 35-45% |
| Πίεση λειτουργίας | < 15 bar | 15-25 bar | 50-75 bar |
| Είδος μεμβρανών | Tap/Brackish 4" or 8" | | Seawater 4" or 8" |
| Flux | 30-35 l/h.m ² | 25-30 l/h.m ² | 15-20 l/h.m ² |
| Ενέργεια στους 25°C | < 0.75 kWh/m ³ | 1.5 kWh/m ³ | 5 kWh/m ³ or 2-3 kWh/m ³ with energy recovery |
| Διαμόρφωση | Αντιολισθητικό(skid mounted) ή τοποθετημένο σε δοχείο (10 έως 40 ft) | | |

4.1 Προεργασία του αλατούχου νερού

Ενώ οι μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης μπορούν να συγκρατήσουν σχεδόν όλων των μεγεθών τα σωματίδια και τις διαλυμένες ουσίες που βρίσκονται στο νερό (βλ. Παράρτημα, Εικόνα Π1), ωστόσο η δομή και τα χαρακτηριστικά τους δεν τους επιτρέπουν να αποθηκεύσουν και να απομακρύνουν μεγάλες ποσότητες διαλυμένων στερεών ουσιών. Αρκετοί περιορισμοί παραμένουν στη χρήση των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης κατά την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού λόγω της έμφραξης (fouling) που μπορούν να υποστούν οι μεμβράνες λόγω της ύπαρξης σωματιδιακής ύλης, λάσπης, βακτηρίων, οργανικών ουσιών και ανόργανων μετάλλων στο νερό. (Tran et al., 2007).

Αν το νερό δεν υποστεί προεργασία, οι διαλυμένες στερεές ουσίες θα τραυματίσουν την επιφάνεια των μεμβρανών με σοβαρές επιπτώσεις στη διαδικασία αφαλάτωσης. Ως εκ τούτου, απαιτείται ειδική επεξεργασία του νερού πριν από την είσοδο στη διάταξη αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση.

Ο Πίνακας 10 που ακολουθεί, συνοψίζει τις κύριες τεχνικές, επιδράσεις και εφαρμογές των κυριότερων μεθόδων προεργασίας του αλατούχου νερού πριν από την είσοδό του στη διάταξη αφαλάτωσης (Valavala, Sohn, Han, Her & Yoon, 2011):

Πίνακας 10: Κύριες Τεχνικές Προεργασίας του Νερού

| | Πήξη | Απορρόφηση | Προ-οξειδωση | Προ-φιλτράρισμα |
|----------------------------|---|---|---|--|
| Εισαγωγή Χημικών | Πηκτικά σε σωστή δόση | Πορώδεις ή μη πορώδεις απορροφητές σε εναίωρημα ή σταθερό ρελέ | Οξειδωτές σε αέρια ή υγρή μορφή | Παρεμβολή κοκκώδους μεμβράνης, με ή χωρίς πηκτικά |
| Επίδραση δοσολογίας | Δοσολογία υπό της απαιτούμενης, απαιτούμενη ή υπερδοσολογία (ιδανική για εξαναγκασμένη πήξη) | Ελάχιστη δόση είναι αποτελεσματική αν χρησιμοποιείται εναίωρημα σωματιδίων | Ελάχιστη δόση είναι αποτελεσματική | Καμία επίδραση |
| Φυσικοί μηχανισμοί | Αυξάνει το μέγεθος των ρύπων που είναι διαλυμένοι στο νερό σε βαθμό τέτοιο ώστε να φιλτράρονται | Δεσμεύει μικροσκοπικούς ρύπους σε απορροφητές πολύ μεγαλύτερους από τους πόρους της μεμβράνης | Μπορεί να προκαλέσει διαχωρισμό οργανικών κολλοειδών σε μικρότερα μεγέθη ή απελευθέρωση EPS από υδρόβιους οργανισμούς | Αφαιρεί τραχιά υλικά που μπορούν να προκαλέσουν φαινόμενο «κέικ» ή γλοιώδες υπόστρωμα στις μεμβράνες |

| | | | | |
|--|---|--|--|--|
| Χημικοί μηχανισμοί | Αποσταθεροποιεί τους ρύπους ώστε να προκαλέσει συσσωμάτωση ή προσρόφηση στην πηκτική ουσία | Παρέχει νέες επιφάνειες διεπαφής για προσρόφηση/Συσώρευση ουσιών που βλάπτουν την απόδοση της μεμβράνης | Οξειδώνει ή/και μερικώς αποσυνθέτει ή αδρανοποιεί τη φυσική οργανική ύλη | Αφαιρεί επιλεκτικά μολυσματικές ουσίες ή άλλα σωματίδια που είναι κολλώδη κατά το φιλτράρισμα |
| Βιολογικοί μηχανισμοί | Αφαιρεί μερικώς τη φυσική οργανική ύλη και εμποδίζει τα βακτήρια να αναπτυχθούν στο νερό ή και στη μεμβράνη | Μπορεί να απορροφήσει οργανικές μολυσματικές ουσίες που σχετίζονται με τη βιο-έμφραξη των μεμβρανών | Αναστέλλει την ανάπτυξη των μικροβίων | Απομακρύνει μερικών τους μικροοργανισμούς που μπορούν να προκαλέσουν βιο-έμφραξη των μεμβρανών |
| Μολυσματικές ουσίες που στοχεύει | Ιοί, χουμικά και φουλβικά οξέα, πρωτεΐνες, πολυσακχαρίτες με όξινες ομάδες, κολλοειδή μικρότερα από τους πόρους της μεμβράνης | Χουμικά και φουλβικά οξέα, μικρά φυσικά οργανικά οξέα, υποπροϊόντα απολύμανσης, φυτοφάρμακα και άλλες συνθετικές οργανικές ενώσεις | Ιοί και οργανικοί ρύποι με οζονισμό | Σωματίδια και κολλοειδείς οργανικές και ανόργανες ουσίες, μικροβιότα |
| Επιδράσεις στην έμφραξη των μεμβρανών | Μειώνει την έμφραξη λόγω κολλοειδών και φυσικής οργανικής ύλης | Μπορεί να μειώσει ή να αυξήσει την έμφραξη των μεμβρανών | Μπορεί να μειώσει τη βιο-έμφραξη και την έμφραξη λόγω φυσικής οργανικής ύλης | Μπορεί να μειώσει την έμφραξη των μεμβρανών σε διαφορετική έκταση |
| Πλεονεκτήματα | Βελτιώνει σημαντικά την επίδοση στα μεγάλα σωματίδια (λιγότερες εμφράξεις και μεγαλύτερη απόρριψη) | Αυξάνει την απομάκρυνση των υποπροϊόντων απολύμανσης και των πρόδρομων ουσιών τους | Μειώνει την εμφάνιση της βιο-έμφραξης και αυξάνει την απομάκρυνση οργανικής ύλης (με οζονισμό) | Μπορεί να μειώσει τη βιο-έμφραξη, την κολλοειδή έμφραξη ή/και τη φόρτωση στερεών πάνω στις μεμβράνες |
| Μειονεκτήματα | Απαιτεί ακριβή δοσολογία ή οποία μπορεί να είναι δύσκολο να επιτευχθεί αν το νερό τροφοδοσίας αλλάζει σημαντικά /γρήγορα ποιότητα κατά τη ροή | Πιθανή επιδείνωση της έμφραξης λόγω μεγάλων σωματιδίων και δυσκολία στην αφαίρεση της σκόνης ενεργού άνθρακα από τις εγκαταστάσεις | Σχηματισμός υποπροϊόντων απολύμανσης που ενδέχεται να βλάψουν τις μεμβράνες | Η απόδοση μπορεί να επιδεινωθεί σημαντικά και να είναι δύσκολο να ανακάμψει |

Όπως είναι φανερό, οι διαφορετικές τεχνολογίες προεργασίας του νερού συχνά απομακρύνουν κατά προτίμηση ορισμένους τύπους μολυσματικών ουσιών ή έχουν διαφορετικά αποτελέσματα στην έμφραξη των μεμβρανών κατά την αφαλάτωση με αντίστροφη. Επομένως, η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής εξαρτάται από τις συνθήκες ποιότητας του νερού τροφοδοσίας και μπορεί να είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί συνδυασμός των παραπάνω τεχνικών που να διευρύνει τα οφέλη κάθε ξεχωριστής προεργασίας. (Valavala et al., 2011)

4.2 Βασικές παράμετροι λειτουργίας συστημάτων Αντίστροφης Ωσμωσης

Για τις σχεδιαστικές εκτιμήσεις και την επίδοση ενός συστήματος ΑΩ χρησιμοποιείται μια σειρά υπολογισμών. Ένα σύστημα αντίστροφης ώσμωσης διαθέτει όργανα που εμφανίζουν την ποιότητα, τη ροή, την πίεση και μερικές φορές κι άλλα στοιχεία, όπως θερμοκρασία ή ώρες λειτουργίας. Προκειμένου να μετρηθεί με ακρίβεια η απόδοση ενός συστήματος ΑΩ πρέπει να ληφθούν τουλάχιστον οι παρακάτω παράμετροι λειτουργίας:

1. Πίεση τροφοδοσίας (Feed pressure)
2. Πίεση αφαλατωμένου νερού (permeate pressure)
3. Πίεση συμπυκνώματος (concentrate pressure)
4. Ροή τροφοδοσίας (feed flow)
5. Ροή αφαλατωμένου νερού (permeate flow)
6. Αγωγιμότητα τροφοδοσίας (feed conductivity)
7. Αγωγιμότητα αφαλατωμένου νερού (permeate conductivity)
8. Θερμοκρασία (temperature)

• Απόρριψη άλατος % (salt rejection %)

Αυτή η εξίσωση δείχνει πόσο αποτελεσματικά οι μεμβράνες απομακρύνουν τους ρύπους. Δεν δίνει πληροφορίες για το πώς λειτουργεί ξεχωριστά η κάθε μεμβράνη, αλλά πώς λειτουργεί συνολικά όλο το σύστημα κατά μέσο όρο. Ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα ΑΩ με μεμβράνες που λειτουργούν σωστά θα απομακρύνει το 95% με 99% των ρύπων του νερού τροφοδοσίας (ρύπων με συγκεκριμένο μέγεθος και φορτίο). Για να καθοριστεί αν οι μεμβράνες ΑΩ απομακρύνουν ικανοποιητικά τους ρύπους, χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση:

$$\text{salt rejection \%} = \frac{\text{conductivity of feed water} - \text{conductivity of permeate water}}{\text{conductivity of feed}} * 100$$

Όσο μεγαλύτερο, τόσο καλύτερα λειτουργεί το σύστημα. Χαμηλό σημαίνει ότι οι μεμβράνες χρειάζονται καθαρισμό ή αντικατάσταση.

- **Πέρασμα άλατος (Salt passage)**

Είναι το αντίστροφο της απόρριψης άλατος, που περιγράφηκε στην προηγούμενη σχέση. Πρόκειται για την ποσότητα των αλάτων, εκφρασμένη σε ποσοστό, που περνούν μέσα από το σύστημα ΑΩ. Όσο χαμηλότερο είναι το πέρασμα άλατος, τόσο καλύτερα λειτουργεί το σύστημα. Υψηλό πέρασμα άλατος σημαίνει ότι οι μεμβράνες χρειάζονται καθαρισμό ή αντικατάσταση.

$$\text{Salt passage \%} = (1 - \text{Salt Rejection \%})$$

- **Ανάκτηση % (recovery)**

Το ποσοστό ανάκτησης είναι η ποσότητα νερού που ανακτάται ως καθαρό νερό. Ή, αλλιώς, πρόκειται για την ποσότητα νερού που δεν στέλνεται για αποστράγγιση ως συμπύκνωμα, αλλά συλλέγεται ως παραγόμενο νερό ή προϊόν. Υψηλό ποσοστό ανάκτησης σημαίνει ότι λιγότερο νερό στέλνεται για αποστράγγιση κι έτσι σώζεται περισσότερο καθαρό νερό. Όμως, αν το ποσοστό ανάκτησης είναι πολύ ψηλό για τη σχεδίαση ΑΩ, τότε μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα λόγω scaling και fouling. Το ποσοστό ανάκτησης για ένα σύστημα ΑΩ καθορίζεται με τη βοήθεια σχεδιαστικών προγραμμάτων (software), τα οποία λαμβάνουν υπόψη τους μία σειρά από παράγοντες, όπως η χημεία του νερού και η προεπεξεργασία ΑΩ πριν το σύστημα ΑΩ. Εξίσου σημαντικός περιοριστικός παράγοντας είναι η πίεση του συστήματος καθώς και η συγκέντρωση σε άλατα του παραγόμενου νερού. Όσο το ποσοστό ανάκτησης μεγαλώνει, τόσο η συγκέντρωση του άλατος στη μεμβράνη, από την πλευρά της τροφοδοσίας, αυξάνει και έχει ως συνέπεια την αυξημένη ροή του άλατος στο παραγόμενο νερό. Η αυξημένη συγκέντρωση άλατος στη μεμβράνη αυξάνει και την ωσμωτική πίεση και άρα, για σταθερή πίεση λειτουργίας, ελαττώνεται η παροχή παραγόμενου νερού. Επομένως, το κατάλληλο ποσοστό ανάκτησης στο οποίο πρέπει να λειτουργεί ένα σύστημα εξαρτάται από το για τι έχει σχεδιαστεί. Υπολογίζοντας το ποσοστό ανάκτησης, είναι εύκολο να αποφασιστεί αν το σύστημα λειτουργεί εκτός προβλεπόμενου σχεδιασμού. Ο υπολογισμός του ποσοστού ανάκτησης γίνεται ως εξής:

$$\text{recovery \%} = \frac{\text{permeate flow rate (gpm)}}{\text{feed flow rate (gpm)}} * 100 = \frac{\text{Παροχή αφαλατωμένου νερού (gpm)}}{\text{Παροχή νερού τροφοδοσίας (gpm)}}$$

Η ανάκτηση του συστήματος πρακτικά ρυθμίζεται μέσω βαλβίδας που περιορίζει την παροχή απορριπτόμενου νερού. Στα πιο σύνθετα συστήματα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού που περιλαμβάνουν και διατάξεις ανάκτησης ενέργειας η ρύθμιση μπορεί να είναι λίγο πιο σύνθετη, κατά βάση όμως καταλήγει να ελέγχεται κύρια από μία ρυθμιστική βαλβίδα στη έξοδο του συμπυκνώματος (απόρριψης).

- **Συντελεστής συμπύκνωσης (Concentration factor)**

Ο συντελεστής συμπύκνωσης σχετίζεται με την ανάκτηση του συστήματος ΑΩ και είναι μια σημαντική εξίσωση για το σχεδιασμό του συστήματος. Όσο περισσότερο νερό ανακτάται ως καθαρό (όσο μεγαλύτερο το ποσοστό ανάκτησης) τόσο περισσότερα συμπυκνωμένα άλατα και ρύποι συλλέγονται στο ρεύμα συμπύκνωσης. Αυτό, μπορεί να αυξήσει τις πιθανότητες για έμφραξη των μεμβρανών, όταν ο συντελεστής συμπύκνωσης είναι πολύ μεγάλος για το σχεδιασμό του συστήματος και τη σύνθεση του νερού τροφοδοσίας.

$$\text{Concentration Factor} = (1 / (1 - \text{Recovery } \%))$$

Όπως και σε έναν λέβητα ή έναν πύργο ψύξης, έτσι και σε ένα σύστημα αντίστροφης ώσμωσης, το καθαρισμένο νερό φεύγει από το σύστημα κι αφήνει πίσω ένα συμπυκνωμένο διάλυμα. Όσο ο βαθμός συμπύκνωσης αυξάνει, τα όρια διαλυτότητας μπορεί να ξεπεραστούν και να καθιζάνουν στην επιφάνεια του εξοπλισμού.

- **Ροή**

$$\text{Gfd} = \frac{\text{gpm of permeate water} \times 1,440 \frac{\text{min}}{\text{day}}}{\# \text{ of RO elements in system} \times \text{square footage of each RO element}}$$

Για παράδειγμα, ένα σύστημα ΑΩ παράγει 75 gpm αφαλατωμένου νερού. Υπάρχουν 3 στοιχεία ΑΩ που το καθένα από αυτά συγκρατεί 6 μεμβράνες (συνολικά, υπάρχουν 18 μεμβράνες). Ο τύπος μεμβράνης του συστήματος έχει 365 τετραγωνικά πόδια επιφάνεια. Επομένως, η ροή θα είναι:

$$\text{Gfd} = \frac{75 \text{ gpm} \times 1.440 \text{ min/day}}{18 \text{ elements} \times 365 \text{ sq ft}} = \frac{108.000}{6.570} = 16$$

Αυτό σημαίνει ότι 16 γαλόνια νερού περνούν μέσα από κάθε τετραγωνικό πόδι, κάθε μεμβράνης, τη μέρα. Το μέγεθος αυτό μπορεί να είναι είτε καλό ή κακό ανάλογα με τη χημική σύσταση του νερού τροφοδοσίας και με το σχεδιασμό του συστήματος. Στον παρακάτω πίνακα

φαίνεται πώς κυμαίνεται η ροή για διάφορες πηγές νερού, μέσω ενός απλού, αναλογικού, γενικού κανόνα. Οι τιμές της ροής μπορούν να καθοριστούν καλύτερα με τη βοήθεια λογισμικού. Είναι σημαντικό να καθοριστεί το είδος της μεμβράνης που χρησιμοποιείται στο σύστημα και να διατηρείται το ίδιο σε όλο το σύστημα.

| Πηγή νερού τροφοδοσίας | Ροή |
|----------------------------|-------|
| Απόβλητα, λύματα | 5-10 |
| Θαλασσινό νερό | 8-12 |
| Υφάλμυρα επιφανειακά ύδατα | 10-14 |
| Υφάλμυρα ύδατα | 14-18 |
| Αφαλατωμένο νερό ΑΩ | 20-30 |

• Ισοζύγιο μάζας

Το ισοζύγιο μάζας χρειάζεται για να καθοριστεί αν τα όργανα μέτρησης της ροής και της ποιότητας λειτουργούν σωστά ή χρειάζονται βαθμονόμηση. Αν τα όργανα δεν διαβάζουν σωστά, τότε τα δεδομένα απόδοσης που συλλέγονται είναι άχρηστα.

Για το ισοζύγιο μάζας, θα πρέπει να είναι γνωστά τα παρακάτω δεδομένα:

1. Ροή τροφοδοσίας (feed flow)
2. Ροή αφαλατωμένου νερού (permeate flow)
3. Ροή συμπύκνωσης (concentrate flow)
4. Αγωγιμότητα τροφοδοσίας (feed conductivity)
5. Αγωγιμότητα αφαλατωμένου νερού (permeate conductivity)
6. Αγωγιμότητα συμπυκνώματος (concentrate conductivity)

Το ισοζύγιο μάζας είναι:

$$\text{Ροή τροφοδοσίας} \times \text{Αγωγιμότητα τροφοδοσίας} = (\text{Ροή αφαλατωμένου νερού} \times \text{Αγωγιμότητα αφαλατωμένου νερού}) + (\text{Ροή συμπύκνωσης} \times \text{Αγωγιμότητα συμπυκνώματος})$$

Για παράδειγμα, αν συλλέχθηκαν τα παρακάτω δεδομένα:

| | |
|--------------------------------|--------------------|
| Ροή αφαλατωμένου νερού | 5 gpm |
| Αγωγιμότητα τροφοδοσίας | 500 μS |
| Αγωγιμότητα αφαλατωμένου νερού | 10 μS |
| Ροή συμπύκνωσης | 2 gpm |
| Αγωγιμότητα συμπυκνώματος | 1200 μS |

τότε το ισοζύγιο θα είναι: $(7 \times 500) = (5 \times 10) + (2 \times 1200)$

$3500 \neq 2450$

Έπειτα, υπολογίζεται η διαφορά:

$$\frac{\text{διαφορά}}{\text{άθροισμα}} * 100 = \frac{3500 - 2450}{3500 + 2450} * 100 = 18\%$$

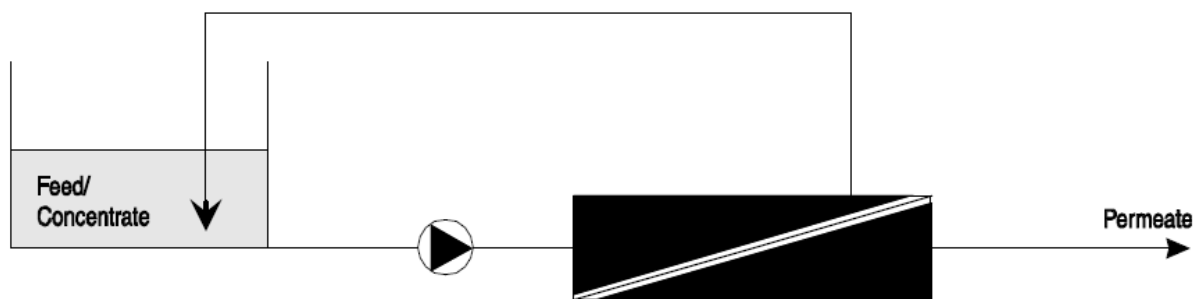
Μια διαφορά +/-5% είναι εντάξει. Μια διαφορά +/-5% - 10% είναι γενικά επαρκής. Μεγαλύτερα ποσοστά, όμως, δεν επιτρέπονται και απαιτείται βαθμονόμηση, ώστε τα δεδομένα που συλλέγονται να είναι χρήσιμα. Στο παραπάνω παράδειγμα, το ισοζύγιο μάζας ΑΩ είναι εκτός ορίων κι απαιτείται προσοχή.

4.3 Είδη συστημάτων Αντίστροφης Ώσμωσης – Διάταξη μεμβρανών

Ένα σύστημα αντίστροφης ώσμωσης είναι συνήθως σχεδιασμένο για συνεχή ροή με ένα πέρασμα από τις μεμβράνες (Εικόνα 42). Οι συνθήκες λειτουργίας κάθε στοιχείου μεμβράνης στο εργοστάσιο είναι σταθερές με το χρόνο. Εναλλακτικά, ανάλογα με το είδος της εφαρμογής και τις απαιτήσεις ποιότητας του προϊόντος μπορεί επίσης η τροφοδοσία να είναι διακοπτόμενη (batch process) που συμβαίνει στην επεξεργασία αστικών ή βιομηχανικών αποβλήτων οπότε μέρος της άλμης επιστρέφει σε μια δεξαμενή και αναμιγνύεται με το νερό τροφοδοσίας για να καλύψει τις ασυνέχειες στην παροχή τροφοδοσίας. (Υφαντής, 2011) Μία απλή απεικόνιση της διεργασίας διακοπτόμενης ροής φαίνεται στην Εικόνα 43.



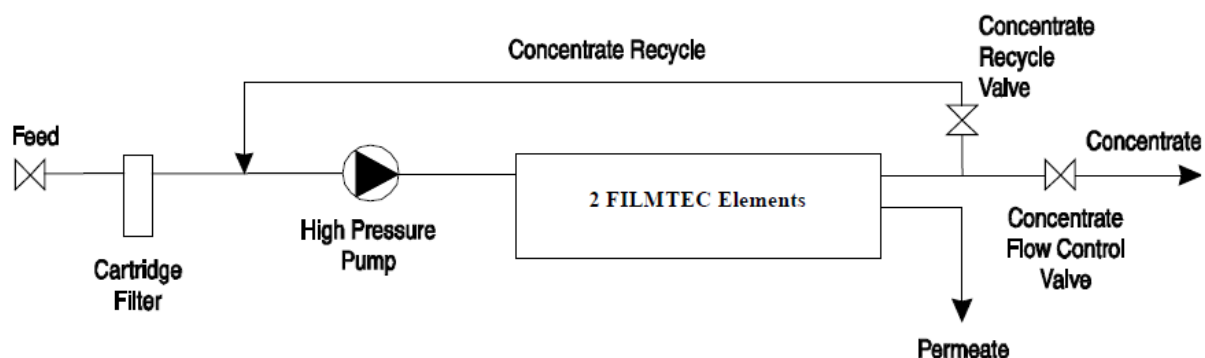
Εικόνα 42: Διεργασία αντίστροφης ώσμωσης συνεχούς ροής (Solutions, 2010)



Εικόνα 43: Διεργασία Αντίστροφης Ώσμωσης διακοπτόμενης ρής (Solutions, 2010)

Ως προς τον τρόπο διάταξης και εσωτερικής ανακυκλοφορίας ως βάση έχουμε το σύστημα με μία μεμβρανοθήκη που μπορεί να περιέχει έως και 8 μεμβράνες στη σειρά. Το αλμόλοιπο του 1ου στοιχείου γίνεται η τροφοδοσία του δεύτερου και ούτω καθεξής. Όλοι οι εσωτερικοί σωλήνες διηθήματος είναι συνδεδεμένοι και καταλήγουν σε ένα στόμιο στη μεμβρανοθήκη από όπου λαμβάνεται το διήθημα. Το στόμιο μπορεί να είναι προς την πλευρά της εισόδου της μεμβρανοθήκης ή προς την πλευρά του απορριπτόμενου νερού αλλά συνήθως πρακτικά λαμβάνεται από την ίδια πλευρά με του απορριπτόμενου.

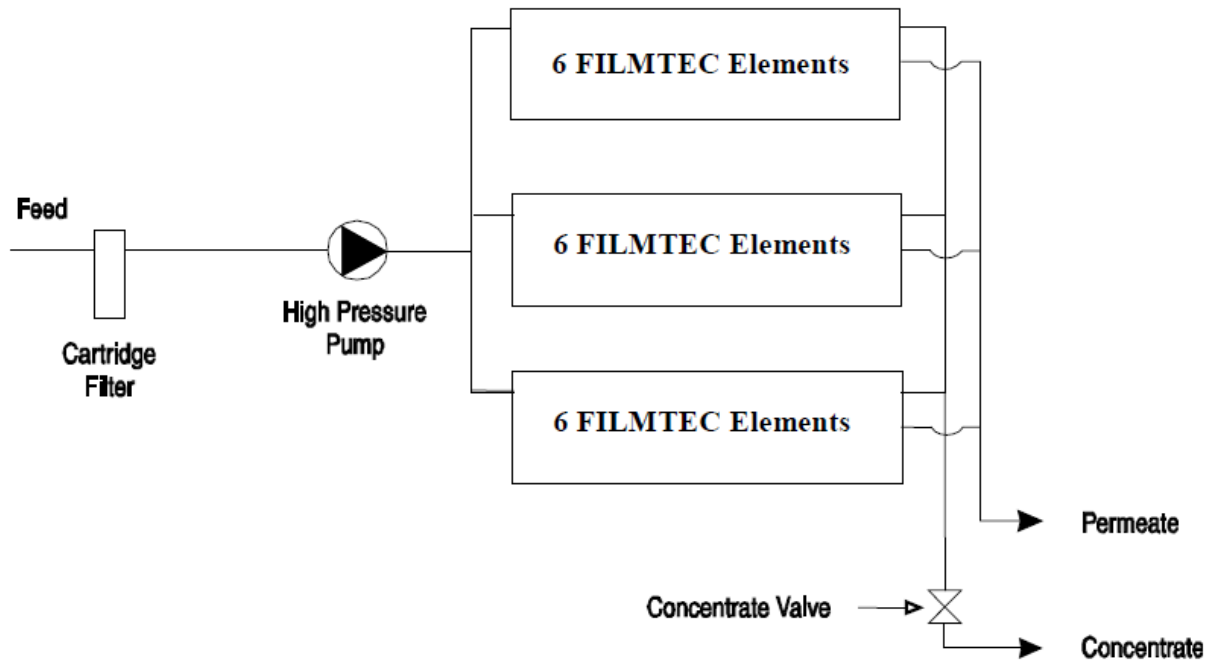
Σε ένα τόσο απλό και μικρό σύστημα συνήθως απαιτείται εσωτερική ανακυκλοφορία μέρους του συμπυκνώματος (όπως φαίνεται στην Εικόνα 44) ώστε η ανάκτηση παραγόμενου νερού ανά στοιχείο μεμβράνης να είναι εντός των προδιαγραφών. (Υφαντής, 2011)



Εικόνα 44: Σύστημα Αντίστροφης Ώσμωσης με μία μεμβρανοθήκη (Solutions, 2010)

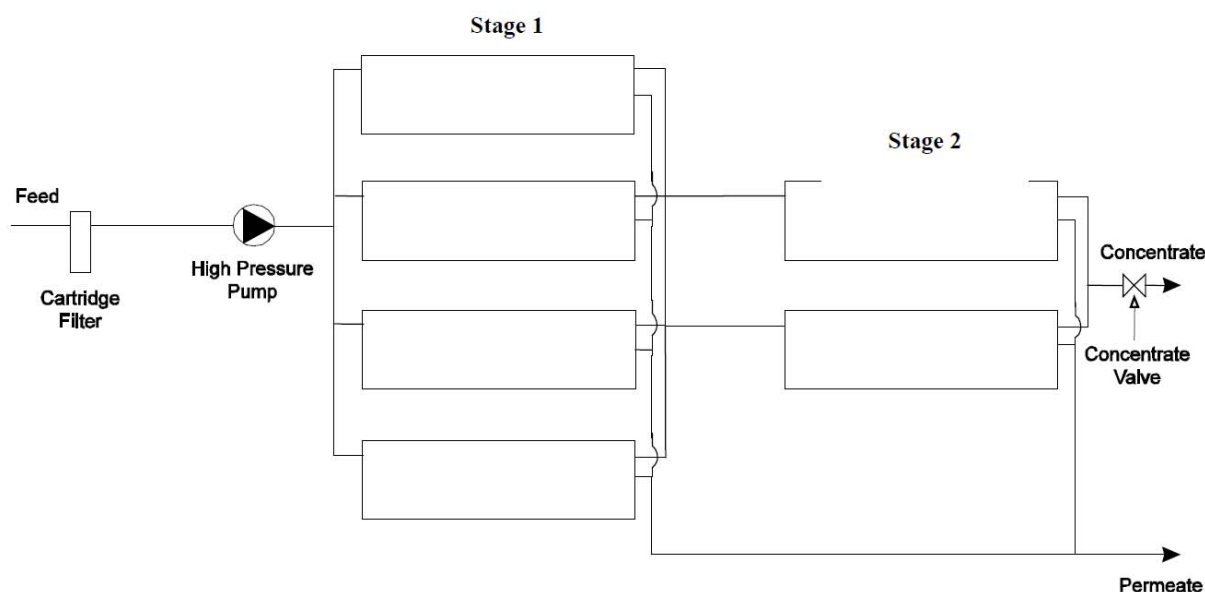
Σε ένα σύστημα ενός σταδίου (single-stage system), δύο ή περισσότερες μεμβρανοθήκες διατάσσονται παράλληλα. Οι γραμμές τροφοδοσίας, προϊόντος και συμπυκνώματος συνδέονται σε συλλέκτες. Τα συστήματα ενός σταδίου χρησιμοποιούνται συνήθως όταν η ανάκτηση του συστήματος είναι μικρότερη από 50%, π.χ. στην αφαλάτωση θαλασσινού νερού. Ένα

παράδειγμα συστήματος ενός σταδίου περιγράφεται στην Εικόνα 45, όπου σε κάθε μεμβρανοθήκη είναι εγκατεστημένα 6 στοιχεία μεμβράνης.



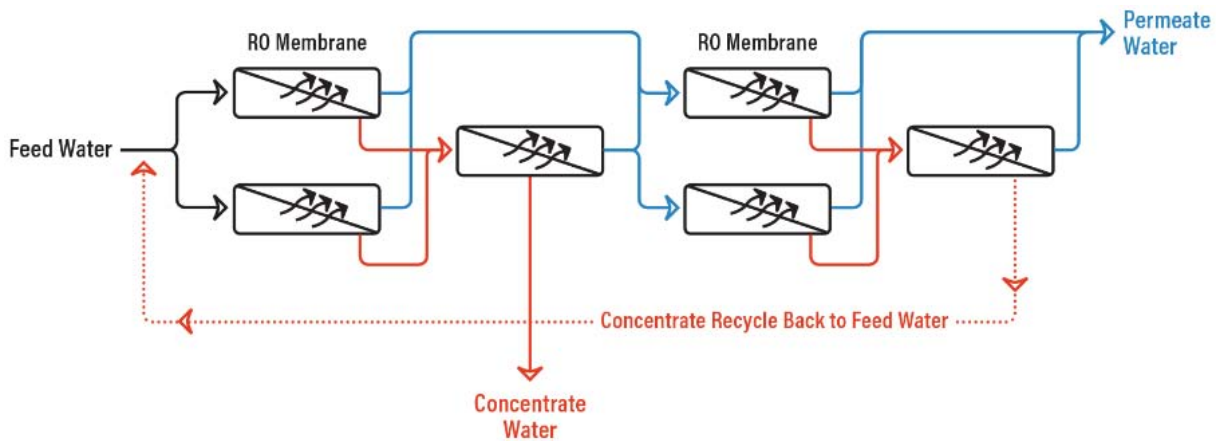
Εικόνα 45:Σύστημα Αντίστροφης Ωσμωσης ενός σταδίου με τρεις μεμβρανοθήκες (Solutions, 2010)

Η διαμόρφωση πολλαπλών σταδίων επιλέγεται όταν υπάρχει ανάγκη για νερό υψηλής καθαρότητας ή μεγάλη ανάκτηση προϊόντος. Για να αντισταθμιστεί η παροχή του παραγόμενου νερού που απομακρύνεται ανά στάδιο και για να υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή της παροχής τροφοδοσίας κάθε σταδίου, ο αριθμός των μεμβρανοθηκών ανά στάδιο μειώνεται προς την κατεύθυνση της παροχής τροφοδοσίας (Υφαντής, 2011). Σ' ένα σύστημα δύο σταδίων το απορριπτόμενο νερό από το πρώτο στάδιο, γίνεται το νερό τροφοδοσίας του δεύτερου σταδίου. Το καθαρό νερό συλλέγεται από το πρώτο στάδιο κι ενώνεται με το καθαρό νερό από το δεύτερο στάδιο. Επιπλέον στάδια, αυξάνουν την ανάκτηση του συστήματος. Στην Εικόνα 46 δίνεται ένα σύνηθες σύστημα δυο σταδίων με λόγο σταδίων 2:1. Ο λόγος σταδίων (staging ratio) για δύο διαδοχικά στάδια ορίζεται ως ο αριθμός των μεμβρανοθηκών του πρώτου προς τον αριθμό των μεμβρανοθηκών του δεύτερου.



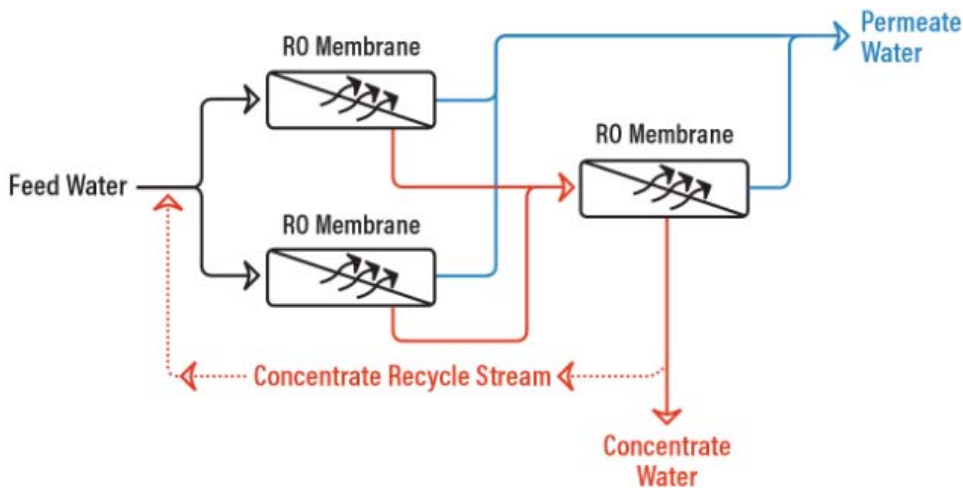
Εικόνα 46: Σύστημα Αντίστροφης Ωσμωσης δύο σταδίων (Solutions, 2010)

Σε ένα σύστημα διπλού περάσματος, το παραγόμενο νερό από το πρώτο πέρασμα γίνεται το νερό τροφοδοσίας του δεύτερου περάσματος, επομένως το τελικό νερό είναι πολύ υψηλότερης ποιότητας, καθώς ουσιαστικά έχει περάσει από 2 συστήματα αφαλάτωσης. Εκτός από την υψηλή ποιότητα του αφαλατωμένου νερού, ένα σύστημα διπλού περάσματος δίνει επίσης τη δυνατότητα να απομακρυνθεί το αέριο διοξείδιο του άνθρακα από το παραγόμενο νερό, εγγέροντας καυστική ουσία μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου περάσματος. Με την προσθήκη του καυστικού μετά το πρώτο πέρασμα, αυξάνεται το pH στο παραγόμενο νερό του πρώτου περάσματος, και το διοξείδιο του άνθρακα μετατρέπεται σε διττανθρακικό (HCO_3^-) και ανθρακικό άλας (CO_3^{2-}) για καλύτερη απόρριψη από τις μεμβράνες ΑΩ στο δεύτερο πέρασμα. Αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί με ΑΩ μονού περάσματος γιατί η έγχυση καυστικού και η δημιουργία ανθρακικού άλατος υπό την παρουσία κατιόντων όπως το ασβέστιο, μπορεί να προκαλέσει έμφραξη στις μεμβράνες.



Εικόνα 47: Σύστημα Αντίστροφης Ωσμωσης διπλού περάσματος ((Πηγή: <https://puretecwater.com/reverse-osmosis/what-is-reverse-osmosis>)

Σ' ένα σύστημα που δεν μπορεί να έχει τα κατάλληλα στάδια και με νερό τροφοδοσίας που η χημική του σύσταση το επιτρέπει, η ανακυκλοφορία συμπυκνώματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όπου ένα μέρος του συμπυκνώματος τροφοδοτείται πίσω στο νερό τροφοδοσίας του πρώτου σταδίου, ώστε να αυξηθεί η ανάκτηση του συστήματος (Εικόνα 48) . Σ' ένα απλό και μικρό σύστημα, συνήθως απαιτείται εσωτερική ανακυκλοφορία μέρους του συμπυκνώματος, ώστε η ανάκτηση παραγόμενου νερού ανά στοιχείο μεμβράνης να είναι εντός των προδιαγραφών.



Εικόνα 48: Σύστημα Αντίστροφης Ωσμωσης με ανακυκλοφορία συμπυκνώματος (Πηγή: <https://puretecwater.com/reverse-osmosis/what-is-reverse-osmosis>)

4.4 Βήματα σχεδιασμού - Εξιιώσεις

Τα βήματα που πρέπει να ληφθούν για το σχεδιασμό ενός συστήματος μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης είναι τα ακόλουθα:

Βήμα 1: Καθορισμός τύπου και ποιότητας νερού τροφοδοσίας, παροχή και ποιότητα προϊόντος.

Η επιλογή μιας πηγής αλατούχου νερού και η ενδεδειγμένη ανάλυση της ποιότητας του νερού είναι ζωτικής σημασίας για τον επιτυχή σχεδιασμό, την υλοποίηση και τη μακροπρόθεσμη λειτουργία των έργων αφαλάτωσης, και επηρεάζει την απαιτούμενη επεξεργασία και, τελικά, την ποιότητα του παραγόμενου πόσιμου νερού.

Συνήθως, η περιεκτικότητα σε ολικά διαλυμένα στερεά και η συγκέντρωση των βασικών ιόντων (νάτριο, ασβέστιο, μαγνήσιο, βρωμιούχο, βόριο, χλωριούχο, θειικό, ανθρακικό και όξινο ανθρακικό άλας) στο νερό της πηγής είναι πρωταρχικής σημασίας για τον σχεδιασμό εγκαταστάσεων αφαλάτωσης υφάλμυρου και θαλασσινού νερού. Αυτές οι παράμετροι, μαζί με τη θερμοκρασία του νερού και το pH, οδηγούν το σχεδιασμό και τη διαμόρφωση του συστήματος αντίστροφης ώσμωσης των περισσότερων έργων αφαλάτωσης. (Voutchkov, 2012)

Συνεπώς, πριν από την εκτέλεση της προσομοίωσης του σχεδιασμού ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης, πρέπει να παρέχεται μια πλήρης και ακριβής ανάλυση του νερού. Πρέπει να συμπληρώνεται ένα έντυπο ανάλυσης του νερού (Εικόνα Π3) και η ανάλυση να είναι ισορροπημένη ως προς την ηλεκτρική της ουδετερότητα (electroneutrality). Αυτό σημαίνει ότι το άθροισμα των συγκεντρώσεων των ανιόντων πρέπει να ισούται ακριβώς με το άθροισμα των συγκεντρώσεων των κατιόντων όταν ανιόντα και κατιόντα εκφράζονται ως mg/L ως CaCO_3 , δηλαδή ως ανθρακικό ασβέστιο. Εάν η ανάλυση του νερού δεν είναι ισορροπημένη, συνιστάται η προσθήκη είτε Na^+ (Νάτριο) είτε Cl^- (χλωριόντα) για την επίτευξη ηλεκτρικής ουδετερότητας.

Μια τυπική σύσταση θαλασσινού νερού για την περιοχή του Αιγαίου φαίνεται στον Πίνακα 11.

Σύμφωνα με το σύγγραμμα του Voutchkov (2012) κάποιες βασικές παράμετροι, με τις οποίες υπολογίζουμε κατά πόσο το νερό τροφοδοσίας θα προκαλέσει έμφραξη των μεμβρανών λόγω σωματιδίων και τι είδους προκατεργασία θα χρειαστεί είναι οι εξής:

Πίνακας 11: Τυπική σύσταση θαλασσινού νερού για την περιοχή του Αιγαίου (Καλλονιάτη,2008)

| Φυσικοχημικές παράμετροι | | |
|---|------------|--------|
| Παράμετρος | Αποτέλεσμα | Μονάδα |
| pH | 7,3 | -- |
| Αγωγιμότητα | 56.300 | μS/cm |
| Ολικά διαλυμένα στερεά,(TDS) | 40.080 | mg/l |
| Χημικές παράμετροι | | |
| Ανθρακικά, (CO ₃ ⁻) | 56 | mg/l |
| Όξινα ανθρακικά, (HCO ₃ ⁻) | 159 | mg/l |
| Χλώριο, (Cl ⁻) | 22.010 | mg/l |
| Νιτρικά, (NO ₃ ⁻) | <5 | mg/l |
| Νιτρώδη, (NO ₂ ⁻) | <0,05 | mg/l |
| Αμμωνιακά, (NH ₄ ⁺) | <0,2 | mg/l |
| Θειικά, (SO ₄ ⁻) | 2.800 | mg/l |
| Πυριτικά, (SiO ₂) | <1 | mg/l |
| Ασβέστιο, (Ca ⁺⁺) | 380 | mg/l |
| Μαγνήσιο, (Mg ⁺) | 1.500 | mg/l |
| Κάλιο, (K ⁺) | 55 | mg/l |
| Νάτριο, (Na ⁺) | 11.600 | mg/l |
| Σίδηρος, (Fe ⁺⁺) | <0,04 | mg/l |
| Χαλκός, (Cu ⁺⁺) | 0,10 | mg/l |
| Μαγγάνιο, (Mn ⁺⁺) | <0,04 | mg/l |
| Ψευδάργυρος, (Zn ⁻) | 0,04 | mg/l |
| Χρώμιο, (Cr ⁺⁺⁺) | 0,11 | mg/l |

1. Θολότητα (Turbidity)

Η θολότητα είναι μια παράμετρος που μετρά την περιεκτικότητα των σωματιδιακών ρύπων στο θαλασσινό νερό πηγής. Το επίπεδο θολότητας στο νερό πηγής είναι ενδεικτικό της περιεκτικότητας σε πηλό, λάσπη, αιωρούμενη οργανική ύλη και μικροσκοπική υδρόβια ζωή, όπως το φυτό και το ζωοπλαγκτόν. Εκφράζεται σε μονάδες νεφλομετρικής θολότητας (nephelometric turbidity units, NTU).

2. Δείκτης SDI (Silt Density Index)

Παρέχει μια ένδειξη του δυναμικού ρύπανσης σωματιδίων του πηγαίου νερού. Εάν το σύστημα RO λειτουργεί σε σταθερή διαμεμβρανική πίεση, η ρύπανση μεμβρανών σωματιδίων θα έχει ως αποτέλεσμα μείωση της παραγωγικότητας του συστήματος (ροή μεμβράνης) με την πάροδο του

χρόνου. Το SDI δίνει μια ένδειξη του ρυθμού μείωσης της ροής μέσω ενός φίλτρου τυπικού μεγέθους και διαμέτρου που λειτουργεί σε σταθερή πίεση για μια δεδομένη χρονική περίοδο.

3. Συνολική συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών (Total suspended solids, TSS)

Είναι ένα μέτρο του συνολικού βάρους των στερεών υπολειμμάτων που περιέχονται στο νερό πηγής και μετριέται συνήθως σε χλιοστόγραμμα ανά λίτρο (mg/l).

4. Συγκέντρωση Χλωροφύλλης α (Chlorophyll a) και άλγης.

Πίνακας 12: Παράμετροι ποιότητας νερού για το χαρακτηρισμό των μολυσματικών σωματιδίων (Voutchkov, 2012)

| Source Water Quality Parameter | Pretreatment Issues and Considerations |
|---|---|
| Turbidity, NTU | Levels above 0.1 mg/L are indicative of a high potential for fouling. Spikes above 50 NTU for more than 1 h would require sedimentation or dissolved air flotation treatment prior to filtration. |
| Silt density index (SDI ₁₅) | Source seawater levels consistently below 2 all year round indicate that no pretreatment is needed. An SDI greater than 4 indicates that pretreatment is necessary. |
| Total suspended solids, mg/L | Needed to assess the amount of residuals generated during pretreatment. It does not correlate well with turbidity beyond 5 NTU. |
| Chlorophyll a | Indicative of algal bloom occurrence. If water contains more 0.5 µg/L, the source water may be in an algal bloom condition. |
| Algal count, cells per milliliter | Indicative of algal bloom occurrence. If water contains more than 2000 cells per milliliter, the source water is in an algal bloom condition. |

Στην Εικόνα Π4 φαίνεται η ανάλυση ποιότητας νερού πηγής για αφαλάτωση αντίστροφης ώσμωσης.

Δύο από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή της ποιότητας νερού του προϊόντος είναι το περιεχόμενο συγκεκριμένων μετάλλων (π.χ. νάτριο, χλωρίδιο, βόριο και βρωμίδια) στο νερό και το συνολικό κόστος παραγωγής του νερού. Αυτοί οι δύο παράγοντες είναι αλληλένδετοι - η παραγωγή αφαλατωμένου νερού υψηλότερης ποιότητας είναι δυνατή με (15 έως 50 τοις εκατό) υψηλότερο κόστος. Στις περισσότερες δημοτικές εφαρμογές, οι μονάδες αφαλάτωσης έχουν σχεδιαστεί τουλάχιστον για να παράγουν νερό ποιότητας που συμμορφώνεται με τους κανονισμούς πόσιμου νερού, ειδικά εάν αυτό το νερό είναι η κύρια πηγή τροφοδοσίας για την περιοχή εξυπηρέτησης.

Επομένως, ο σχεδιασμός του συστήματος μεμβράνης εξαρτάται από το διαθέσιμο νερό τροφοδοσίας και την εφαρμογή, και οι πληροφορίες σχεδιασμού του συστήματος σύμφωνα με

τον Πίνακα στην Εικόνα Π2 και η ανάλυση του νερού τροφοδοσίας σύμφωνα με τον Πίνακα στην Εικόνα Π3 πρέπει να συλλεχθούν πρώτα.

Βήμα 2: Καθορισμός τρόπου ροής και αριθμός περασμάτων

Η τυπική διαμόρφωση ροής για αφαλάτωση νερού είναι αυτή όπου ο όγκος τροφοδοσίας περνά μία φορά μέσω του συστήματος. Η επανακυκλοφορία συμπυκνώματος είναι κοινή σε μικρότερα συστήματα που χρησιμοποιούνται σε εμπορικές εφαρμογές, καθώς και σε μεγαλύτερα συστήματα όταν ο αριθμός των στοιχείων είναι πολύ μικρός για να επιτευχθεί μια αρκετά υψηλή ανάκτηση συστήματος. Η επανακυκλοφορία συμπυκνώματος χρησιμοποιείται και σε ειδικές εφαρμογές, όπως η επεξεργασία υγρών και απόβλητων.

Ένα σύστημα αντίστροφης ώσμωσης συνήθως σχεδιάζεται για συνεχή ροή, αλλά ανάλογα με το είδος της εφαρμογής και τις απαιτήσεις ποιότητας του προϊόντος, μπορεί η τροφοδοσία να είναι διακοπτόμενη (βιομηχανικά ή δημοτικά απόβλητα), οπότε μέρος της άλμης επιστρέφει σε μια δεξαμενή και αναμιγνύεται με το τροφοδοτικό νερό για να καλύψει τις ασυνέχειες στην παροχή τροφοδοσίας.

Το σύστημα μπορεί να είναι ενός ή πολλαπλών σταδίων. Η παραγωγή νερού για φαρμακευτική και ιατρική χρήση είναι τυπικές εφαρμογές συστημάτων πολλαπλών σταδίων. Ως εναλλακτική λύση για ένα δεύτερο πέρασμα, μπορεί επίσης να εξεταστεί η ανταλλαγή ιόντων

Βήμα 3: Επιλογή κατάλληλης μεμβράνης

Τα στοιχεία μεμβρανών επιλέγονται σύμφωνα με την αλατότητα του νερού τροφοδοσίας, την τάση ρύπανσης του νερού τροφοδοσίας, τις απαιτούμενες απορρίψεις και τις ενεργειακές απαιτήσεις. Το τυπικό μέγεθος στοιχείου για συστήματα μεγαλύτερα από 10 gpm (2,3 m³/hr) έχει διάμετρο 8 ιντσών και μήκος 40 ιντσών. Μικρότερα στοιχεία είναι διαθέσιμα για μικρότερα συστήματα. Για εφαρμογές υψηλής ποιότητας νερού όπου απαιτείται πολύ χαμηλή αλατότητα προϊόντος, οι ρητίνες ανταλλαγής ιόντων χρησιμοποιούνται συχνά για την καθαριότητα του νερού διαπέρασης.

Βήμα 4: Επιλογή μέσης ροής συστήματος

Η επιλογή της ροής, f (gfd ή L/ m²-h) γίνεται με βάση πιλοτικά δεδομένα, ή την εμπειρία. Οι τυπικές ροές σχεδιασμού σύμφωνα με την πηγή τροφοδοσίας, που φαίνονται στην Εικόνα Π5, δίνονται στο τεχνικό εγχειρίδιο της εταιρίας FILMTEC™, έχουν προκύψει από την υπάρχουσα εμπειρία και είναι ένα μέτρο – όριο που σχετίζεται με τη φθορά της μεμβράνης από τις διαλυμένες ουσίες που περιέχονται στο τροφοδοτικό νερό και οι οποίες συσσωρεύονται στην

επιφάνειά της. Αν δεν τηρηθεί το όριο αυτό τότε θα αυξηθούν οι απαιτούμενες συντηρήσεις και κατά συνέπεια τα λειτουργικά κόστη.

Βήμα 5: Υπολογισμός του αναγκαίου αριθμού στοιχείων μεμβρανών

Ο αριθμός των στοιχείων που απαιτούνται υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$N_E = \frac{Q_P}{f \cdot S_E}$$

όπου:

N_E = ο αριθμός των αναγκαίων στοιχείων

Q_P = η απαιτούμενη παροχή προϊόντος

f = η μέση ροή του συστήματος (Βήμα 4)

S_E = η ονομαστική επιφάνεια της μεμβράνης

Βήμα 6: Υπολογισμός του αναγκαίου αριθμού δοχείων πίεσης

Ο αριθμός των δοχείων πίεσης υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο, στρογγυλοποιώντας στον πλησιέστερο ακέραιο:

$$N_V = \frac{N_E}{N_{EPV}}$$

όπου:

N_V = ο αριθμός των δοχείων πίεσης

N_E = ο αριθμός των στοιχείων από το Βήμα 5

N_{EPV} = ο αριθμός των στοιχείων ανά δοχείο πίεσης

Για μεγάλα συστήματα, τα δοχεία 6 στοιχείων είναι σπάνια, αλλά είναι διαθέσιμα δοχεία με έως και 8 στοιχεία. Για μικρότερα ή/και συμπαγή συστήματα, μπορούν να επιλεγούν μικρότερα δοχεία.

Βήμα 7: Επιλογή αριθμού σταδίων

Ο αριθμός σταδίων καθορίζει από πόσα δοχεία πίεσης σε σειρά θα περάσει το νερό τροφοδοσίας μέχρι να εξέλθει από το σύστημα και να απορριφθεί ως άλμη. Κάθε στάδιο αποτελείται από συγκεκριμένο αριθμό δοχείων πίεσης εν παραλλήλω. Ο αριθμός σταδίων είναι συνάρτηση της προγραμματισμένης ανάκτησης του συστήματος, του αριθμού των στοιχείων ανά δοχείο και της ποιότητας του νερού τροφοδοσίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η ανάκτηση του συστήματος και όσο χειρότερη η ποιότητα του νερού τροφοδοσίας, τόσο μεγαλύτερη διαδρομή χρειάζεται να κάνει το νερό και άρα θα περάσει από περισσότερα στάδια και μεμβράνες. Όπως

φαίνεται και στους παρακάτω πίνακες, ο αριθμός των στοιχείων σε σειρά συνδέεται με την ανάκτηση του συστήματος και με τον αριθμό των σταδίων.

Πίνακας 13: Αριθμός σταδίων για υφάλμυρο νερό τροφοδοσίας (Solutions, 2010)

| System recovery (%) | Number of serial element positions | Number of stages (6-element vessels) |
|---------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 40 – 60 | 6 | 1 |
| 70 – 80 | 12 | 2 |
| 85 – 90 | 18 | 3 |

Για τα συστήματα ενός σταδίου μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη ανάκτηση με επανακυκλοφορία της άλμης.

Πίνακας 14: Αριθμός σταδίων για θαλασσινό νερό τροφοδοσίας (Solutions, 2010)

| System recovery (%) | Number of serial element positions | Number of stages (6-element vessels) | Number of stages (7-element vessels) | Number of stages (8-element vessels) |
|---------------------|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 35 – 40 | 6 | 1 | 1 | — |
| 45 | 7 – 12 | 2 | 1 | 1 |
| 50 | 8 – 12 | 2 | 2 | 1 |
| 55 – 60 | 12 – 14 | 2 | 2 | — |

Είναι φανερό πως τα συστήματα που χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό τροφοδοσίας έχουν μικρότερη ανάκτηση από τα συστήματα που χρησιμοποιούν υφάλμυρο νερό.

Βήμα 8: Επιλογή λόγου σταδίων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η σχέση του αριθμού των δοχείων πίεσης σε διαδοχικά στάδια ονομάζεται λόγος σταδίων R και δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{N_V(i)}{N_V(i + 1)}$$

Σε συστήματα θαλασσινού νερού 2 σταδίων, με 6 στοιχεία ανά δοχείο, ο τυπικός λόγος σταδίων είναι 3:2.

Η ιδανική διαβάθμιση ενός συστήματος είναι όταν κάθε στάδιο λειτουργεί στο ίδιο κλάσμα της ανάκτησης του συστήματος, με την προϋπόθεση ότι όλα τα δοχεία έχουν τον ίδιο αριθμό στοιχείων. Ο λόγος σταδίων για ένα σύστημα με n στάδια και λόγο ανάκτησης συστήματος Y δίνεται από τη σχέση:

$$R = \left[\frac{1}{(1 - Y)} \right]^{\frac{1}{n}}$$

Βήμα 9: Εξισορρόπηση της ροής του προϊόντος

Ο ρυθμός ροής του προϊόντος στα τελευταία στοιχεία ενός συστήματος, δηλαδή στα στοιχεία που βρίσκονται πιο κοντά στην έξοδο της άλμης, είναι συνήθως χαμηλότερος από τον

ρυθμό ροής των στοιχείων στην αρχή του συστήματος, στην είσοδο τροφοδοσίας. Αυτό είναι αποτέλεσμα της πτώσης πίεσης στο κανάλι τροφοδοσίας / άλμης και της αύξησης της οσμωτικής πίεσης από την τροφοδοσία μέχρι την έξοδο της άλμης. Υπό ορισμένες συνθήκες, ο λόγος του ρυθμού ροής του προϊόντος του στοιχείου στην αρχή και του στοιχείου στο τέλος μπορεί να γίνει πολύ υψηλή:

- Υψηλή ανάκτηση συστήματος
- Υψηλή αλατότητα του νερού τροφοδοσίας
- Χαμηλή πίεση στις μεμβράνες
- Υψηλή θερμοκρασία νερού
- Καινούριες μεμβράνες

Ο στόχος ενός καλού σχεδιασμού είναι να εξισορροπήσει το ρυθμό ροής των στοιχείων σε διάφορες θέσεις. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους:

- Αυξάνοντας την πίεση τροφοδοσίας μεταξύ των σταδίων. Αυτό προτιμάται για αποδοτικότερη χρήση της ενέργειας.
- Εφαρμόζοντας μια υποπίεση στο προϊόν, μόνο στο πρώτο στάδιο ενός συστήματος δύο σταδίων: εναλλακτική λύση χαμηλού κόστους συστήματος
- Υβριδικό σύστημα: χρήση μεμβρανών με χαμηλότερη διαπερατότητα νερού στις πρώτες θέσεις και μεμβράνες με υψηλότερη διαπερατότητα νερού στις τελευταίες θέσεις: π.χ., μεμβράνες θαλασσινού νερού υψηλής απόρριψης στο πρώτο και μεμβράνες θαλασσινού νερού υψηλής παραγωγικότητας στο δεύτερο στάδιο ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης θαλασσινού νερού

Βήμα 10: Ανάλυση και βελτιστοποίηση του συστήματος

Στη συνέχεια, το επιλεγμένο σύστημα θα πρέπει να αναλυθεί και να τελειοποιηθεί χρησιμοποιώντας κάποιο αντίστοιχο πρόγραμμα, όπως είναι το “Water Application Value Engine” (Wave) της εταιρείας DuPont.

4.4.1 Εφαρμογή βημάτων σχεδιασμού για το νησί της Πάτμου

Ο παραπάνω σχεδιασμός θα εφαρμοστεί για το νησί της Πάτμου. Η Πάτμος είναι νησί του Αιγαίου και υπάγεται στα Δωδεκάνησα. Η Πάτμος αντιμετώπιζε έντονα προβλήματα λειψυδρίας. Παλαιότερα, η μοναδική πηγή κάλυψης των αναγκών ήταν οι υπόγειοι υδροφορείς. Από το 1996 άρχισε η μεταφορά ύδατος σε ολοένα και αυξανόμενες ποσότητες. Το κόστος του

δημοσίου για τη μεταφορά νερού στην Πάτμο με πλοία υδροφόρες, άγγιζε κατά μέσον όρο τα τελευταία χρόνια, το 1,2 εκατ. ευρώ ετησίως. Μόλις το 2017 έγινε υδατικά αυτόνομη με την εγκατάσταση δύο μονάδων αφαλάτωσης θαλασσινού νερού αντίστροφης ώσμωσης, δυναμικότητας 600 m³ πόσιμο νερού ανά ημέρα, έκαστη.

1. Αρχικά, για το σχεδιασμό της μονάδας θα πρέπει να καθοριστεί ο τύπος και η ποιότητα του νερού τροφοδοσίας, καθώς και η παροχή του προϊόντος.

Το νερό που θα τροφοδοτήσει τη μονάδα είναι βέβαια θαλασσινό με χημική ανάλυση που φαίνεται στον Πίνακα 11. Η παροχή του προϊόντος θα υπολογιστεί με βάση των παρακάτω Πίνακα, όπου φαίνεται η ζήτηση νερού ανά μήνα για τα έτη 2001-2030.

Πίνακας 15: Ζήτηση νερού ανά μήνα σε m³/day για τα έτη 2001-2030 για το νησί της Πάτμου (Καλλονιάτη, 2008)

| Έτος | ΙΑΝ | ΦΕΒ | ΜΑΡ | ΑΠΡ | ΜΑΙ | ΙΟΥ | ΙΟΥ | ΑΥΓ | ΣΕΠ | ΟΚΤ | ΝΟΕ | ΔΕΚ | ΜΙΝ (ΔΕΚ) κυβ/ώρα 12 ώρες | ΜΑΧ (ΑΥΓ) κυβ/ώρα 12 ώρες |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|------------------------------------|------------------------------------|
| 2001 | 494 | 494 | 547 | 557 | 573 | 633 | 669 | 679 | 580 | 537 | 537 | 488 | 40 | 56 |
| 2002 | 509 | 509 | 562 | 573 | 590 | 651 | 689 | 699 | 597 | 552 | 552 | 502 | 41 | 58 |
| 2003 | 518 | 518 | 572 | 583 | 601 | 663 | 702 | 712 | 608 | 562 | 562 | 511 | 42 | 59 |
| 2004 | 527 | 527 | 583 | 594 | 612 | 675 | 715 | 726 | 619 | 572 | 572 | 520 | 43 | 60 |
| 2005 | 537 | 537 | 593 | 604 | 623 | 688 | 729 | 740 | 631 | 582 | 582 | 529 | 44 | 61 |
| 2006 | 546 | 546 | 604 | 615 | 634 | 700 | 743 | 754 | 642 | 592 | 592 | 538 | 44 | 62 |
| 2007 | 556 | 556 | 614 | 626 | 646 | 713 | 757 | 769 | 654 | 603 | 603 | 548 | 45 | 64 |
| 2008 | 565 | 565 | 625 | 638 | 658 | 726 | 771 | 783 | 666 | 613 | 613 | 557 | 46 | 65 |
| 2009 | 575 | 575 | 636 | 649 | 670 | 739 | 785 | 798 | 678 | 624 | 624 | 567 | 47 | 66 |
| 2010 | 585 | 585 | 648 | 661 | 682 | 753 | 800 | 813 | 691 | 635 | 635 | 577 | 48 | 67 |
| 2011 | 596 | 596 | 659 | 672 | 695 | 766 | 815 | 829 | 704 | 646 | 646 | 587 | 48 | 69 |
| 2012 | 606 | 606 | 671 | 684 | 707 | 780 | 831 | 844 | 716 | 657 | 657 | 597 | 49 | 70 |
| 2013 | 617 | 617 | 682 | 697 | 720 | 794 | 846 | 860 | 730 | 668 | 668 | 607 | 50 | 71 |
| 2014 | 628 | 628 | 694 | 709 | 733 | 809 | 862 | 877 | 743 | 680 | 680 | 618 | 51 | 73 |
| 2015 | 638 | 638 | 706 | 721 | 746 | 823 | 878 | 893 | 756 | 691 | 691 | 628 | 52 | 74 |
| 2016 | 650 | 650 | 719 | 734 | 760 | 838 | 895 | 910 | 770 | 703 | 703 | 639 | 53 | 75 |
| 2017 | 661 | 661 | 731 | 747 | 774 | 853 | 911 | 927 | 784 | 715 | 715 | 650 | 54 | 77 |
| 2018 | 672 | 672 | 744 | 760 | 787 | 868 | 928 | 944 | 798 | 728 | 728 | 661 | 55 | 78 |
| 2019 | 684 | 684 | 757 | 774 | 802 | 884 | 945 | 962 | 813 | 740 | 740 | 673 | 56 | 80 |
| 2020 | 696 | 696 | 770 | 787 | 816 | 900 | 963 | 980 | 827 | 753 | 753 | 684 | 57 | 81 |
| 2021 | 708 | 708 | 783 | 801 | 831 | 916 | 981 | 999 | 842 | 766 | 766 | 696 | 58 | 83 |
| 2022 | 720 | 720 | 797 | 815 | 845 | 932 | 999 | 1017 | 858 | 778 | 778 | 708 | 59 | 84 |
| 2023 | 732 | 732 | 810 | 829 | 860 | 948 | 1017 | 1036 | 873 | 792 | 792 | 720 | 60 | 86 |
| 2024 | 745 | 745 | 824 | 843 | 876 | 965 | 1036 | 1055 | 889 | 805 | 805 | 732 | 61 | 87 |
| 2025 | 757 | 757 | 838 | 858 | 891 | 982 | 1055 | 1075 | 905 | 819 | 819 | 744 | 62 | 89 |
| 2026 | 770 | 770 | 853 | 873 | 907 | 1000 | 1075 | 1095 | 921 | 832 | 832 | 757 | 63 | 91 |
| 2027 | 783 | 783 | 867 | 888 | 923 | 1017 | 1094 | 1115 | 937 | 846 | 846 | 769 | 64 | 92 |
| 2028 | 797 | 797 | 882 | 904 | 940 | 1035 | 1114 | 1136 | 954 | 861 | 861 | 782 | 65 | 94 |
| 2029 | 810 | 810 | 897 | 919 | 956 | 1053 | 1135 | 1157 | 971 | 875 | 875 | 795 | 66 | 96 |
| 2030 | 824 | 824 | 912 | 935 | 973 | 1072 | 1156 | 1178 | 988 | 889 | 889 | 809 | 67 | 98 |

Η μονάδα θα πρέπει να καλύπτει τις ανάγκες κάθε μήνα κάθε έτους. Η μέγιστη ζήτηση είναι τον Αύγουστο του 2030 με 98m³/h, επομένως η απαιτούμενη παροχή προϊόντος θα είναι 100m³/h . Το πρόβλημα που παρουσιάζεται με τη συγκεκριμένη απαιτούμενη ροή προϊόντος είναι ότι το παραγόμενο νερό θα είναι πολύ περισσότερο από αυτό που καταναλώνεται με αποτέλεσμα η δεξαμενή να υπερχειλίζει. Αυτό μπορεί να διευθετηθεί με την εγκατάσταση ενός συστήματος ελέγχου συνδεδεμένο με υπολογιστή ώστε να ελέγχει τη στάθμη του νερού μέσα στη δεξαμενή και ανάλογα να διακόπτει την λειτουργία της μονάδας. Η μονάδα αφαλάτωσης θα λειτουργεί από τις 7 το πρωί έως τις 7 το απόγευμα δηλαδή 12 ώρες συνολικά.

2. Η εταιρεία DOW προτείνει για τις συγκεκριμένες προδιαγραφές, δηλαδή για πόσιμο νερό κοινότητας και υδροληψία ανοικτής θάλασσας, τη μεμβράνη FILMTEC™ SW30HRLE-440i.

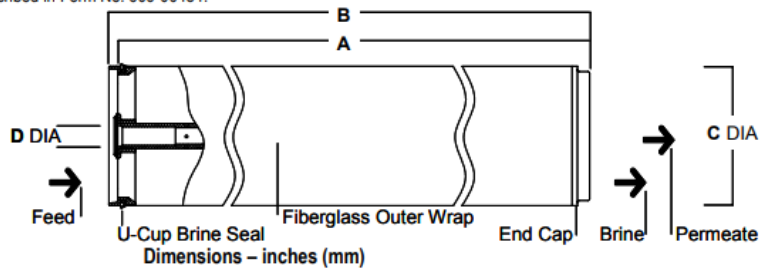
Οι προδιαγραφές της μεμβράνης και οι διαστάσεις της φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 16: Κύρια χαρακτηριστικά μεμβράνης FILMTEC™ SW30HRLE-440i (Πηγή: <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Dow-Filmtec-SW30HRLE-440i.pdf>)

| Μεμβράνη FILMTEC™ SW30HRLE-440i. | |
|--|---------------------------------------|
| Ενεργός επιφάνεια (m ²) | 40.8 |
| Μέγιστη πίεση λειτουργίας (bar) | 83 |
| Μέγιστη παροχή προϊόντος (m ³ /ημέρα) | 31 |
| Ελάχιστη απόρριψη άλατος (%) | 99.65 |
| Σταθερή απόρριψη άλατος (%) | 99.80 |
| Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας (°C) | 45.0 |
| Μέγιστη πτώση πίεσης ανά στοιχείο (bar) | 1.0 |
| Εύρος pH για συνεχή λειτουργία | 2-11 |
| Εύρος pH για συντήρηση (30 min.) | 1-13 |
| Όριο ελεύθερου χλωρίου | <0.01 ppm |
| SDI (Silt Density Index) | <5 |
| Τύπος μεμβράνης | Συνθετική, λεπτού φιλμ από πολυαμίδιο |

| Product | Part number | Active area ft ² (m ²) | Maximum operating pressure psig (bar) | Permeate flow rate gpd (m ³ /d) | Stabilized boron rejection % | Minimum salt rejection % | Stabilized salt rejection % |
|----------------|-------------|--|--|---|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| SW30HR LE-440i | | 440 (41) | 1,200 (83) | 8,200 (31) | 92 | 99.65 | 99.80 |

1. The above values are normalized to the following conditions: 32,000 ppm NaCl, 5 ppm boron, 800 psi (5.5 MPa), 77°F (25°C), pH 8, 8% recovery.
2. Permeate flows for individual elements may vary +/-15%.
3. Product specifications may vary slightly as improvements are implemented.
4. Active area guaranteed +/-5%. Active area as stated by Dow Water & Process Solutions is not comparable to the nominal membrane area figure often stated by some element suppliers. Measurement method described in Form No. 609-00434.



| Product | Feed spacer (mil) | Dimensions – inches (mm) | | | |
|----------------|-------------------|--------------------------|--------------|-----------|------------|
| | | A | B | C | D |
| SW30HR LE-440i | 28 | 40 (1,016) | 40.5 (1,029) | 7.9 (201) | 1.125 (29) |

1. Refer to Dow Design Guidelines for multiple-element systems.
2. Elements fit nominal 8-inch (203 mm) I.D. pressure vessel
3. Individual μ LEC elements measure 40.5 inches (1,029 mm) in length (B). The net length (A) of μ LEC elements when connected is 40 inches (1,016 mm).
1 inch = 25.4 mm

Εικόνα 49: Προδιαγραφές και μέγεθος μεμβράνης FILMTEC™ SW30HRLE-440i (Πηγή: <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Dow-Filmtec-SW30HRLE-440i.pdf>)

Σύμφωνα με την εταιρεία, οι μεμβράνες με το χαρακτηριστικό HR (High Rejection) έχουν υψηλό λόγο απόρριψης άλατος (99,65% η συγκεκριμένη) με αποτέλεσμα να μη χρειάζεται περίπλοκη εγκατάσταση και πολλά στοιχεία με επανακυκλοφορία του προϊόντος. Επίσης παρουσιάζει μικρή πτώση πίεσης ανά στοιχείο (< 1,0 bar) και λειτουργεί σε μεγάλο εύρος pH, τόσο κατά τη μόνιμη λειτουργία όσο και κατά τη συντήρηση.

3. Η επιλογή της μέσης ροής συστήματος, f , γίνεται από εμπειρικά δεδομένα που βρίσκονται στον Πίνακα του παραρτήματος (Εικόνα Π5) από το τεχνικό εγχειρίδιο της εταιρείας DOW.

Σύμφωνα με τον τύπο του νερού τροφοδοσίας (θαλασσινό νερό) και τη μεμβράνη που έχει επιλεχθεί, η μέση ροή έχει την τιμή $f = 12 - 17 \text{ lt/m}^2\text{hr}$ (7-10gfd)

4. Ο υπολογισμός του αναγκαίου αριθμού στοιχείων μεμβρανών N_E γίνεται σύμφωνα με τον τύπο του βήματος 5.

Η απαιτούμενη παροχή προϊόντος είναι $Q_P = 100 \text{ m}^3/\text{h}$, η μέση ροή του συστήματος $f = 16 \text{ lt/m}^2\text{hr}$, μία ενδιάμεση τιμή από αυτές που προτείνει η εταιρεία, και η ονομαστική επιφάνεια της μεμβράνης ισούται με $S_E = 40.8 \text{ m}^2$. Επομένως:

$$N_E = \frac{Q_P}{f \cdot S_E} = \frac{100 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{16 * 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{hr}} * 40.8 \text{ m}^2} = 153.19$$

Άρα στρογγυλοποιώντας προς τα πάνω, απαιτούνται 154 στοιχεία (μεμβράνες)

5. Ο αριθμός των δοχείων πίεσης υπολογίζεται από τον τύπο του βήματος 6.

Σε μεγάλα συστήματα μπορούν να μπουν 6 ή και 8 μεμβράνες σε ένα δοχείο πίεσης. Επειδή, τα στοιχεία μεμβρανών είναι $N_E = 154$ μεμβράνες, είναι καλύτερα να τοποθετηθούν $N_{EpV} = 7$ στοιχεία ανά δοχείο, για να προκύψει ακέραιος αριθμός. Επομένως:

$$N_V = \frac{N_E}{N_{EpV}} = \frac{154}{7} = 22 \text{ δοχεία πίεσης}$$

6. Το επόμενο βήμα σχεδιασμού απαιτεί τον καθορισμό του αριθμού σταδίων.

Αρχικά θα πρέπει να επιλεγεί η ανάκτηση του συστήματος. Από τον Πίνακα 9 φαίνεται πως για συστήματα με θαλασσινό νερό τροφοδοσίας, η ανάκτηση είναι 35%-45%. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή θα επιλεγεί μία μέση τιμή της ανάκτησης, δηλαδή 40%. Έπειτα, από τον Πίνακα 14, προτείνεται ένα στάδιο, για σύστημα με ανάκτηση 40% και 7 στοιχεία ανά δοχείο.

Το επιλεγμένο σύστημα πρέπει στη συνέχεια να αναλυθεί χρησιμοποιώντας κάποιο πρόγραμμα Ανάλυσης Συστήματος Αντίστροφης Όσμωσης, όπως είναι το WAVE. Αυτό το πρόγραμμα υπολογίζει την πίεση τροφοδοσίας και την ποιότητα διαπέρασης του συστήματος καθώς και τα δεδομένα λειτουργίας όλων των μεμονωμένων στοιχείων. Στη συνέχεια, είναι εύκολο να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός του συστήματος αλλάζοντας τον αριθμό και τον τύπο των στοιχείων και τη διάταξή τους.

4.5 Τρέχοντα Προγράμματα

Για το σχεδιασμό του κυρίως συστήματος αντίστροφης ώσμωσης, διατίθενται από τις εταιρίες παραγωγής στοιχείων μεμβρανών ειδικά λογισμικά. Το “Water Application Value Engine” (Wave) της εταιρίας DuPont, που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία, είναι ένα ισχυρό εργαλείο λογισμικού που επιτρέπει το σχεδιασμό και τη μοντελοποίηση διαδικασιών επεξεργασίας νερού χρησιμοποιώντας τρεις μεθόδους αφαλάτωσης: υπερδιήθηση (UF), αντίστροφη ώσμωση (RO), και ανταλλαγή ιόντων (IX).

Το Wave επιτρέπει στους μηχανικούς και τους σχεδιαστές να προβλέπουν την απόδοση των διεργασιών UF, RO και IX - ή οποιονδήποτε συνδυασμό αυτών - όπου το νερό τροφοδοσίας περιέχει συγκεκριμένα υδατικά άλατα και / ή οργανικό περιεχόμενο. Το λογισμικό ενσωματώνει θεωρητικά μοντέλα (π.χ. Νόμος του Darcy) και λειτουργικά δεδομένα που συλλέγονται και αναλύονται από τον κατασκευαστή. Ως αποτέλεσμα, το Wave μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των συστημάτων κάτω από μια ποικιλία διαφορετικών συνθηκών,

όπως θερμοκρασιών, πιέσεων και επιλογής / προσδιορισμού αλληλουχίας λειτουργίας της μονάδας. Το λογισμικό θα υπολογίσει παραμέτρους διαδικασίας όπως η απόδοση συστήματος, συμπεριλαμβανομένων συνθέσεων ροής και ρυθμών ροής για κάθε σημαντική ροή στο σχεδιασμό, απαιτήσεις λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένων διαστημάτων μεταξύ καθαρισμού και το εκτιμώμενο λειτουργικό κόστος που απαιτείται για την επίτευξη των στόχων (π.χ. ρυθμός ροής τροφοδοσίας, σύνθεση προϊόντος).

Το Wave παρέχεται δωρεάν από την DuPont μέσω της ιστοσελίδας της.

(<https://www.dupont.com/water/resources/design-software.html>)

4.5.1 Περιβάλλον λογισμικού WAVE

Κατά το άνοιγμα του προγράμματος, εμφανίζονται στην αρχική οθόνη οι τέσσερις κύριες ενότητες για τη δημιουργία και την εκτέλεση μιας προσομοίωσης (Εικόνα 49):

1. **Οι καρτέλες της γραμμής του μενού.** Στο επάνω μέρος της οθόνης υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής μιας ποικιλίας ρυθμίσεων και προτιμήσεων προσομοίωσης, όπως είναι οι μονάδες μέτρησης, οι ρυθμίσεις χρήστη, οι ρυθμίσεις του νερού τροφοδοσίας.
2. **Οι καρτέλες ρυθμίσεων του έργου.** Κάτω από τη γραμμή μενού, υπάρχουν οι καρτέλες που επιτρέπουν την προσαρμογή των ρυθμίσεων σε σχέση με το τρέχον έργο και εμφανίζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.
3. **Το διάγραμμα ροής του έργου.** Όταν είναι επιλεγμένη η καρτέλα της αρχικής σελίδας (Home tab) εμφανίζεται το διάγραμμα ροής του έργου, το οποίο δείχνει ποιες τεχνολογίες επεξεργασίας και με ποια σειρά θα χρησιμοποιηθούν. Οι ακριβείς προδιαγραφές λειτουργίας αυτών των «μπλοκ» μπορούν να προσαρμοστούν σε εύθετο χρόνο.
4. **Οι τεχνολογίες επεξεργασίας.** Οι διαδικασίες που μπορούν να μοντελοποιηθούν από το Wave βρίσκονται στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος ροής του έργου. Αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να προστεθούν με μεταφορά και απόθεση μεταξύ των βελών Feed Water (νερό τροφοδοσίας) και Product Water (νερό προϊόντος). Μπορούν να αναδιαταχθούν ή να διαγραφούν με τον ίδιο τρόπο.

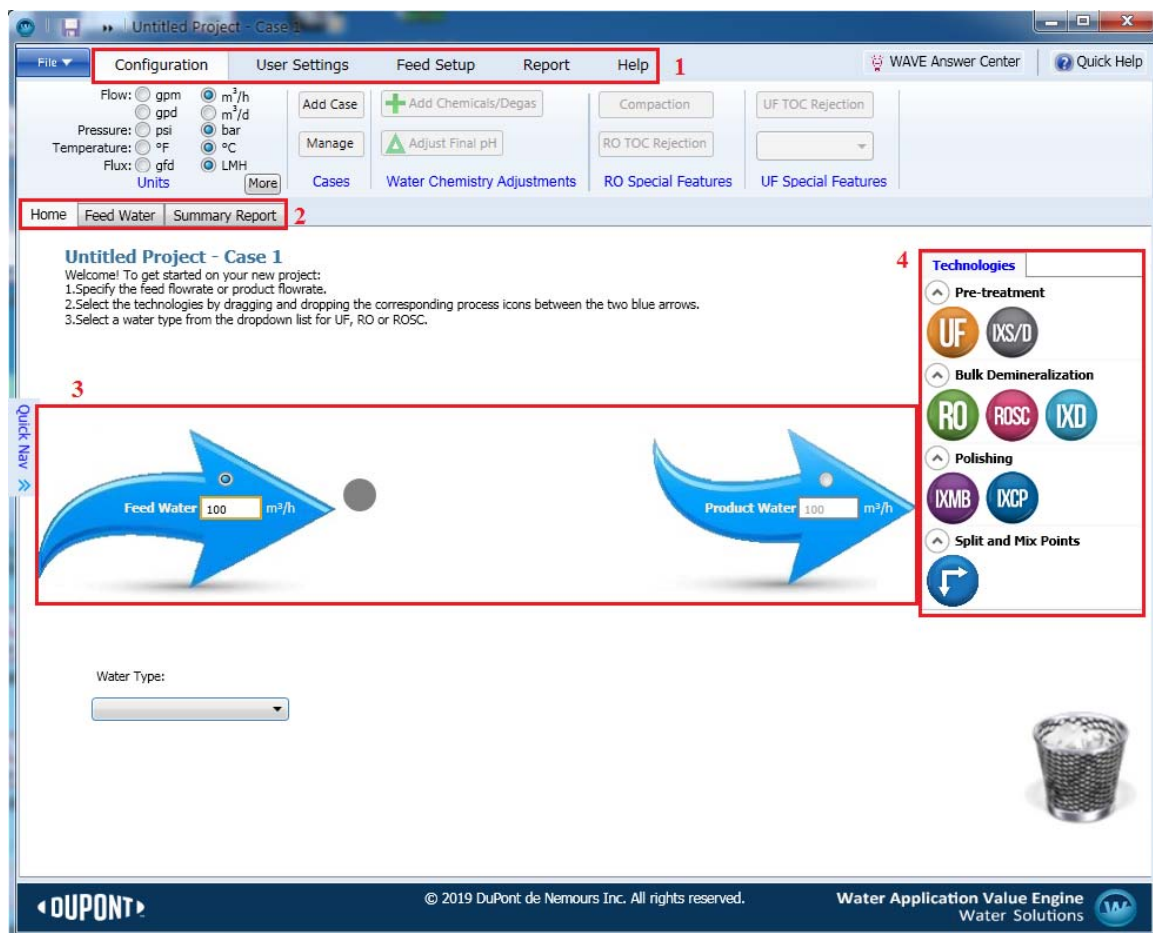
Διατίθενται επτά τεχνολογίες ομαδοποιημένες σε τρεις κατηγορίες:

- Προεργασία: υπερδιήθηση (UF) και ανταλλαγή ιόντων για αποσκλήρυνση / αφαλάτωση (IXS / D).

- Απομετάλλωση: αντίστροφη ώσμωση (RO), αντίστροφη ώσμωση για μικρά εμπορικά συστήματα (ROSC), και ανταλλαγή ιόντων για απιονισμό (IXD).
- Τελευταίο στάδιο καθαρισμού (Polishing): μικτή κλίνη ανταλλαγής ιόντων (ion exchange mixed bed, IXMB) και καθαρισμός συμπυκνωμάτων ανταλλαγής ιόντων (IXCP).

Για τη λειτουργία και εκτέλεση του προγράμματος WAVE θα πρέπει να δοθούν συγκεκριμένα δεδομένα όπως :

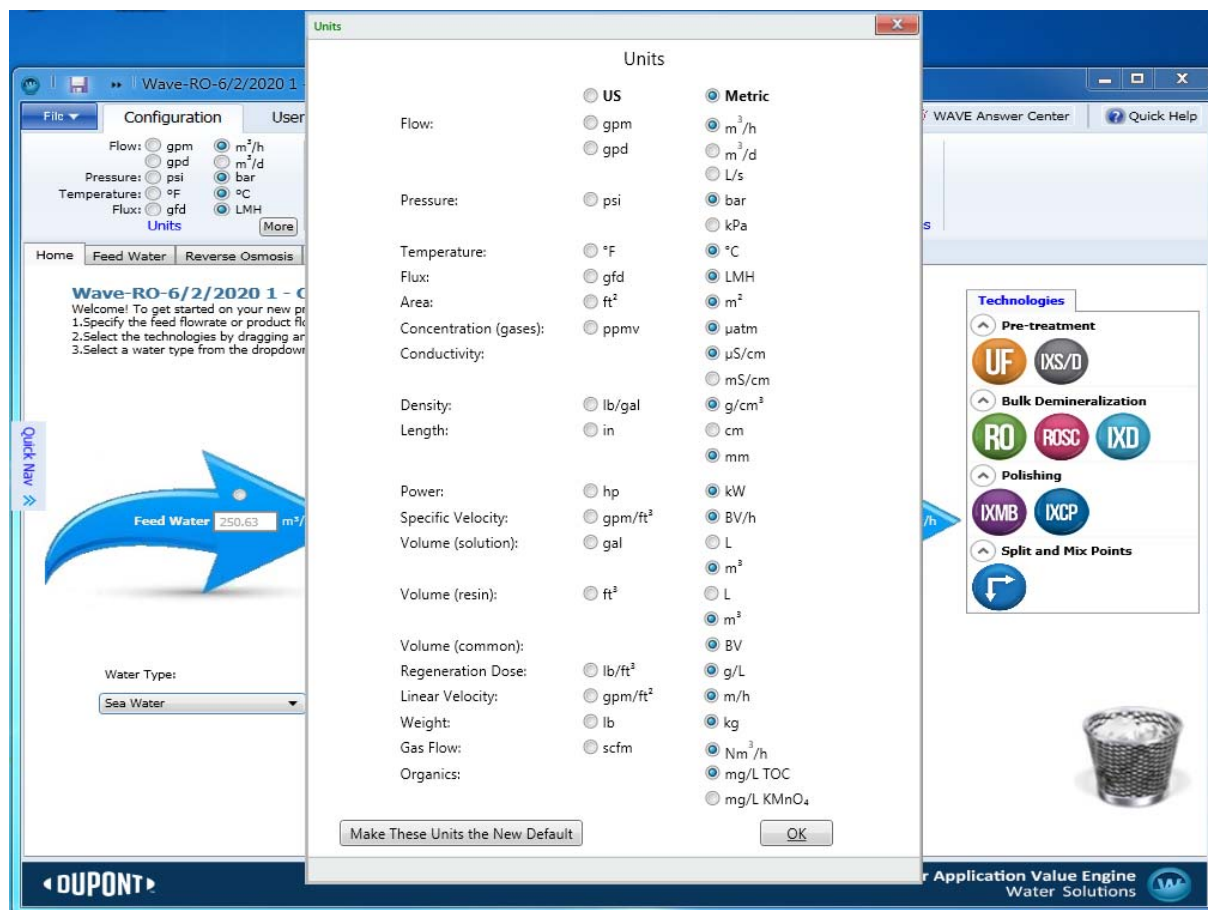
1. Η σύσταση του διαλύματος τροφοδοσίας
2. Η θερμοκρασία λειτουργίας
3. Το pH του διαλύματος τροφοδοσίας
4. Το είδος και ο αριθμός μεμβρανών
5. Η πίεση λειτουργίας (προαιρετικά)
6. Η επιθυμητή παραγωγή νερού ή η επιθυμητή ροή τροφοδοσίας



Εικόνα 50: Αρχική οθόνη προγράμματος WAVE και οι τέσσερις κύριες ενότητες

4.5.2 Εφαρμογή του προγράμματος για το νησί της Πάτμου

Ρύθμιση των μονάδων μέτρησης. Επιλέγοντας την καρτέλα ‘Configuration’, από της καρτέλες της γραμμής του μενού, δίνεται η δυνατότητα καθορισμού των μονάδων μέτρησης. (Εικόνα 51). Πατώντας την επιλογή ‘More’, δίνεται η δυνατότητα καθορισμού των μονάδων μέτρησης για όλα τα μεγέθη του σχεδιασμού.



Εικόνα 51: Καθορισμός μονάδων μέτρησης

Προσδιορισμός της ποιότητας νερού τροφοδοσίας. Τα δεδομένα της χημικής σύστασης του νερού, θα πρέπει να εισαχθούν στο πρόγραμμα, είτε από την καρτέλα Feed Setup στη γραμμή μενού ή από την Feed Water, στις καρτέλες ρυθμίσεων του έργου.

- Στον πίνακα με τις Παραμέτρους τροφοδοσίας και κάτω από τα αναπτυσσόμενα μενού ‘Water type’ και ‘Water Sub-type’, επιλέγονται οι κατηγορίες που περιγράφουν καλύτερα το νερό τροφοδοσίας σε σχέση με τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS) και τη θολότητα (Turbidity) και στη συγκεκριμένη περίπτωση ‘Sea water’ και ‘With conventional pretreatment, SDI<5’.

- Στον πίνακα ‘Solid Content’, υπάρχει δυνατότητα καθορισμού των παραμέτρων: Turbidity, TSS, και του δείκτη SDI και το περιεχόμενο οργανικών (TOC). Όλες αυτές οι παράμετροι είναι προαιρετικοί.

- Δίπλα από τον παραπάνω πίνακα, υπάρχουν πεδία για τη θερμοκρασία και το pH του νερού του συστήματος. Οι «ελάχιστες» και «μέγιστες» θερμοκρασίες σχεδιασμού είναι τα όρια μεταξύ των οποίων πρέπει να λειτουργεί το σύστημα.

- Στο κάτω μέρος της οθόνης, συμπληρώνονται οι πίνακες κατιόντων, ανιόντων και ουδετεροτήτων με τιμές από τον Πίνακα 11. Εάν ένα είδος δεν προσδιορίζεται, η σειρά αυτή αφήνεται κενή (δηλαδή 0 mg / L). Πολλές τιμές ενημερώνονται καθώς συμπληρώνονται τα πεδία. Για παράδειγμα, το Wave αθροίζει τις συνολικές διαλυμένες ουσίες και εκτιμά την αγωγιμότητα του διαλύματος. Αθροίζει επίσης τα συνολικά κατιόντα, ανιόντα και υπολογίζει τη συνολική συγκέντρωση φορτίου (μονάδες: meq / L). Παρόλο που δεν έχει προσδιοριστεί καμία συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα, το Wave έχει ενημερώσει αυτό το πεδίο σε μη μηδενική τιμή λόγω της χημικής ισορροπίας που υπάρχει στο νερό σε δεδομένο pH και θερμοκρασία. (Εικόνα 52)

Στο κάτω μέρος της οθόνης, η τιμή ‘Charge Balance’ είναι περίπου -35.29 meq / L. Η ερμηνεία αυτής της τιμής είναι ότι δεδομένης της σύνθεσης των αλάτων / στερεών του νερού, το διάλυμα έχει ένα συνολικό αρνητικό φορτίο ίσο με αυτήν την τιμή. Η ανάλυση του νερού (Πίνακας 11) ενδέχεται να μην έχει ανιχνεύσει επιπλέον κατιόντα στο διάλυμα (π.χ. υπολειμματικό Fe, Ni κ.λπ.) που θα εξισορροπούσε το αρνητικό φορτίο. Σε ένα διάλυμα όμως, τα ιόντα είναι πάντα ισορροπημένα από τα αντίθετά τους, δεν υπάρχει περίσσεια θετικού ή αρνητικού φορτίου. Καθώς το διάλυμα στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει αρνητικό φορτίο, πρέπει να «ισορροπηθεί» με πιο θετικά ιόντα. Το λογισμικό δίνει αυτή τη δυνατότητα είτε (α) προσθέτοντας ιόντα νατρίου, (β) προσθέτοντας ιόντα ασβεστίου, (γ) προσθέτοντας ιόντα αμμωνίας (αμμωνίου) ή (δ) προσαρμόζοντας το pH (προσθέτοντας ιόντα H⁺). Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, το φορτίο θα εξισορροπηθεί προσθέτοντας ιόντα νατρίου. Η χρήση περισσότερου νατρίου είναι απίθανο να αλλάξει κρίσιμα αποτελέσματα (π.χ. ρύπανση) καθώς τα άλατα νατρίου είναι γενικά διαλυτά σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών διεργασίας. Ωστόσο, επιπρόσθετα ιόντα Na⁺ μπορεί να μειώσουν την ποιότητα του παραγόμενου νερού λόγω του μικρού μεγέθους και της ικανότητας αυτών των ιόντων να διασχίζουν τις μεμβράνες RO (σε αντίθεση με το

Ca²⁺). Μετά την εξισορρόπηση του φορτίου η τιμή Charge Balance γίνεται 0 meq / L. Το ολοκληρωμένο αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 53.

Feed Water - Stream 1

Stream Definition: Stream 1, 100.00 %

Water Type: Sea Water
Water Sub-type: With conventional pretreatment, SC

Turbidity: 0.00 NTU
Total Suspended Solids (TSS): 0.00 mg/L
SDI₁₅: 0.00
Organics (TOC): 0.00 mg/L

Temperature: 10.0 °C (Minimum), 22.0 °C (Design), 40.0 °C (Maximum)
pH @22.0°C: 7.30, pH @25.0°C: 1.62

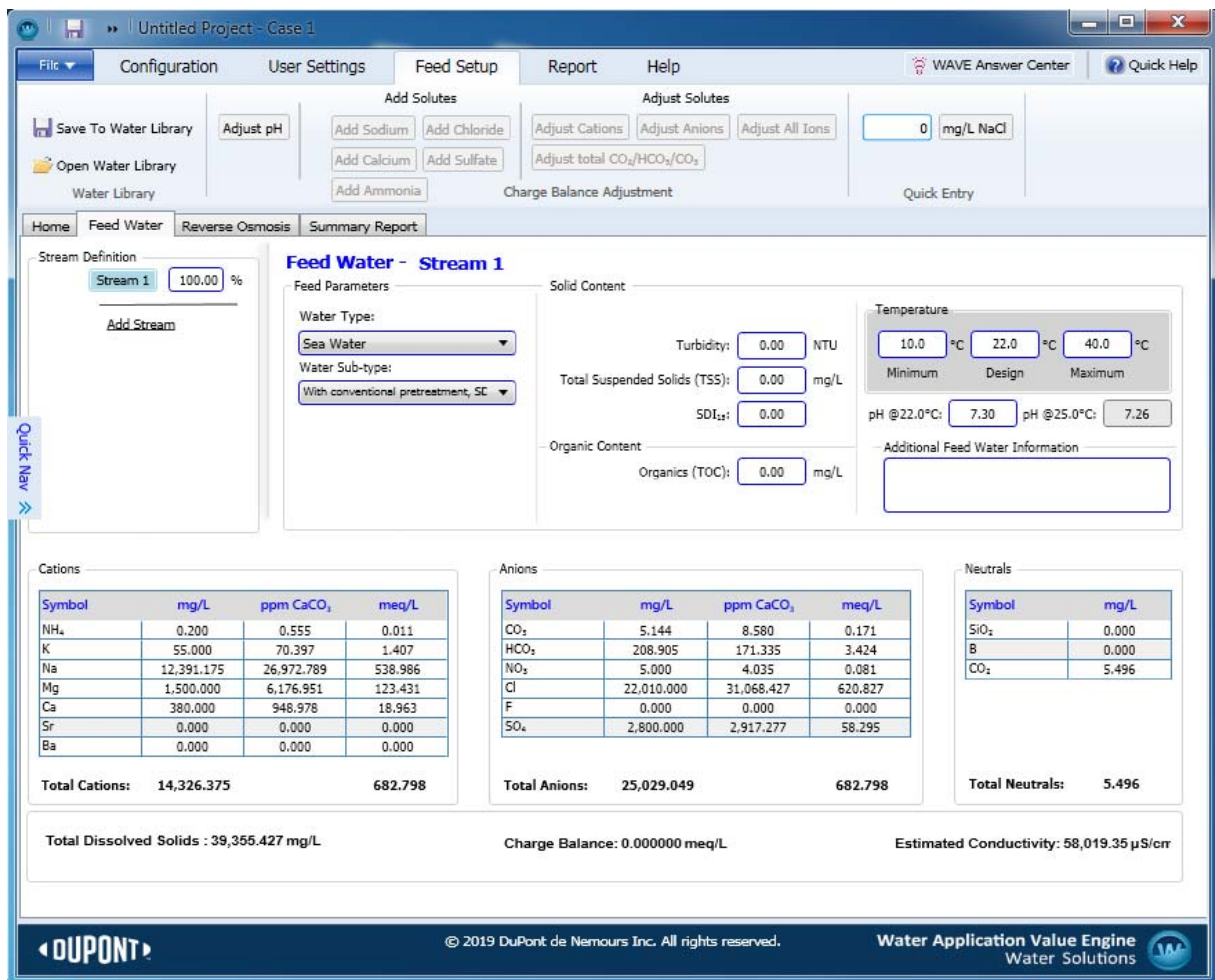
| Symbol | mg/L | ppm CaCO ₃ | meq/L |
|-----------------------|-------------------|-----------------------|----------------|
| NH ₄ | 0.200 | 0.555 | 0.011 |
| K | 55.000 | 70.397 | 1.407 |
| Na | 11,600.000 | 25,250.579 | 504.572 |
| Mg | 1,500.000 | 6,176.951 | 123.431 |
| Ca | 380.000 | 948.978 | 18.963 |
| Sr | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Ba | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Total Cations: | 13,535.200 | | 648.384 |

| Symbol | mg/L | ppm CaCO ₃ | meq/L |
|----------------------|-------------------|-----------------------|----------------|
| CO ₂ | 56.000 | 93.400 | 1.866 |
| HCO ₃ | 159.000 | 130.405 | 2.606 |
| NO ₃ | 5.000 | 4.035 | 0.081 |
| Cl | 22,010.000 | 31,068.427 | 620.827 |
| F | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| SO ₄ | 2,800.000 | 2,917.277 | 58.295 |
| Total Anions: | 25,030.000 | | 683.675 |

| Symbol | mg/L |
|------------------------|--------------|
| SiO ₂ | 0.000 |
| B | 0.000 |
| CO ₃ | 4.194 |
| Total Neutrals: | 4.194 |

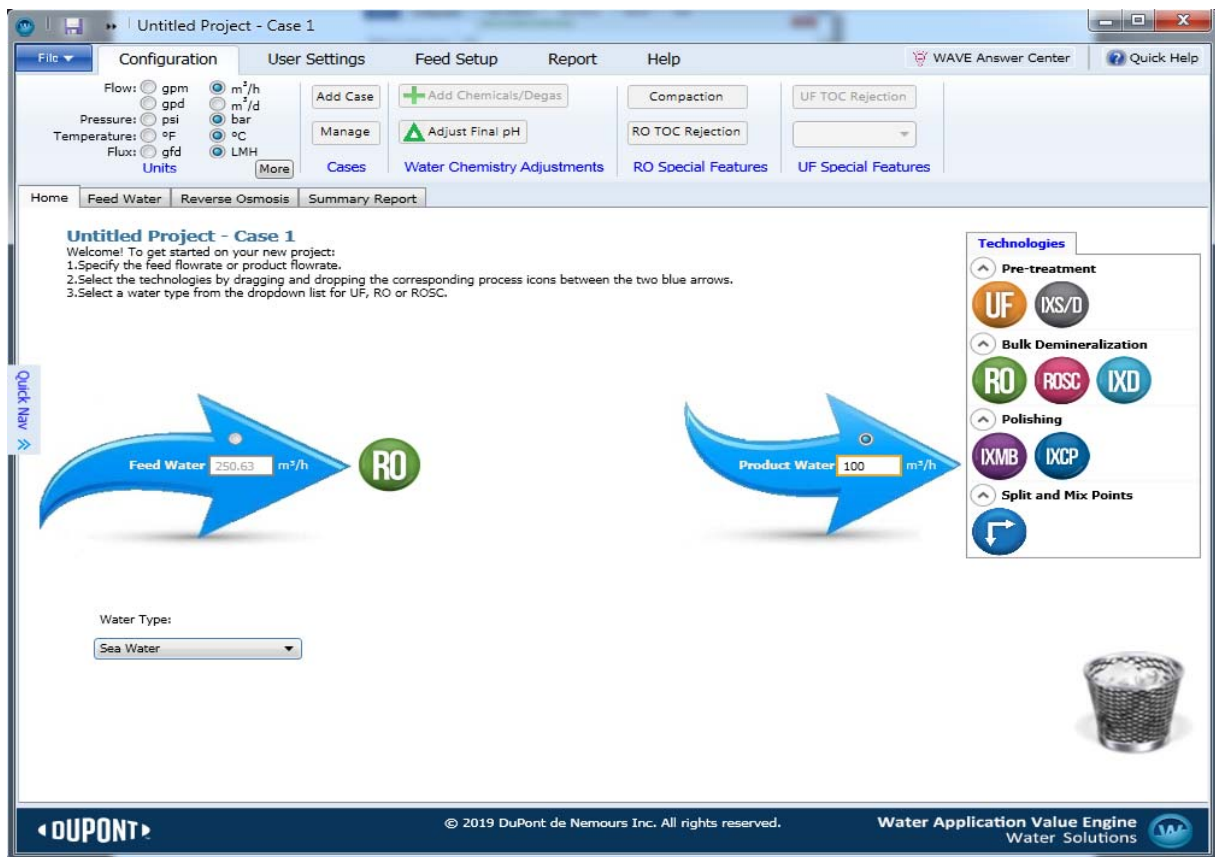
Total Dissolved Solutes: 38,571.113 mg/L
Charge Balance: -35.291255 meq/L
Estimated Conductivity: 57,054.00 µS/cm

Εικόνα 52: Προσδιορισμός της ποιότητας νερού τροφοδοσίας



Εικόνα 53: Ποιότητα νερού τροφοδοσίας μετά την ισορροπία των ιόντων και κατιόντων

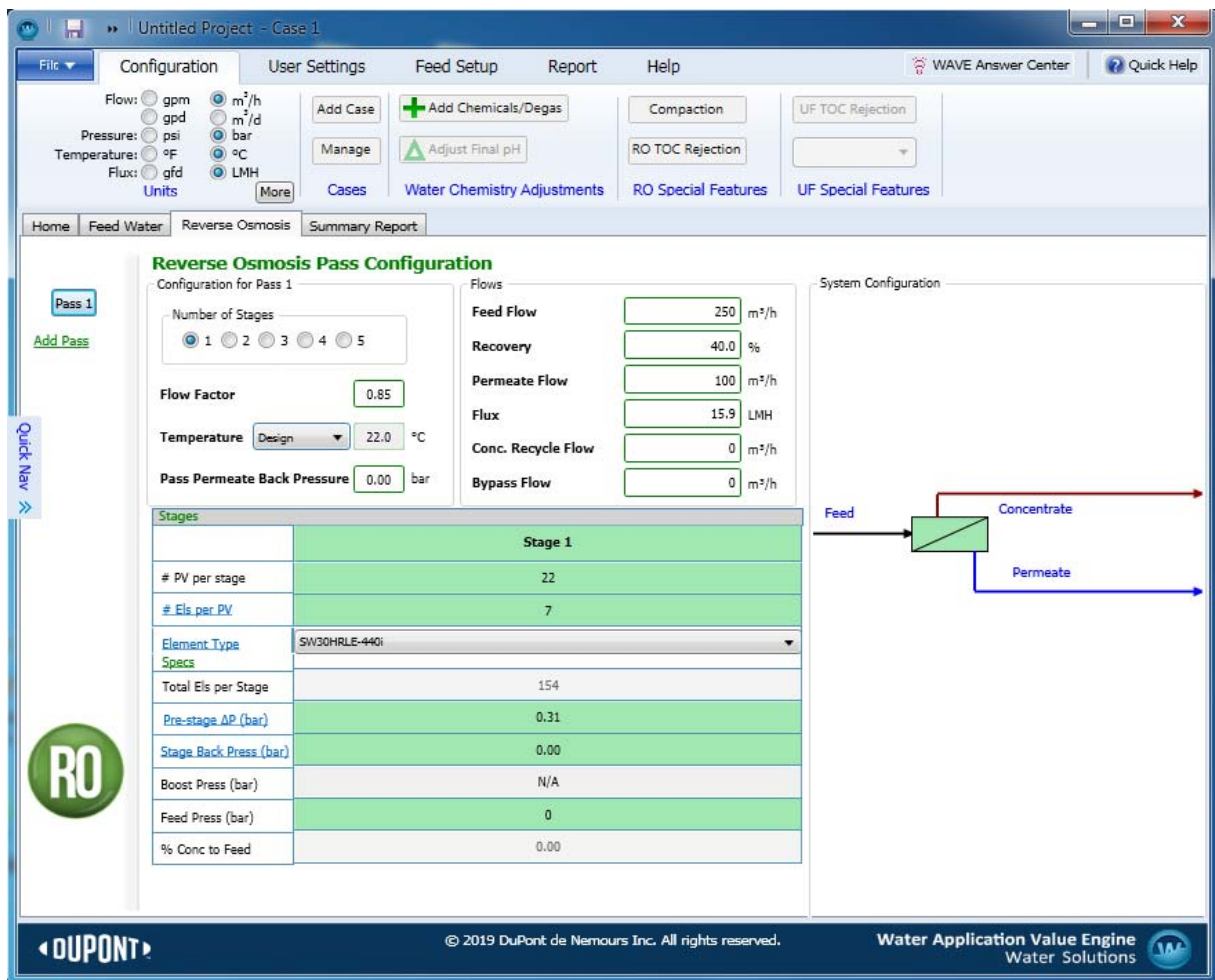
Καθορισμός επιθυμητών παροχών. Το Wave απαιτεί από τον χρήστη να καθορίσει είτε τον συνολικό ρυθμό ροής της τροφοδοσίας είτε του παραγόμενου νερού, έτσι ώστε να μπορεί να εκτελεί τους υπολογισμούς του. Για το νησί της Πάτμου, όπως έχει ήδη αναφερθεί η απαιτούμενη παροχή προϊόντος είναι 100m³/h. (Εικόνα 54)



Εικόνα 54: Προσδιορισμός απαιτούμενης παροχής προϊόντος

Επεξεργασία παραμέτρων σχεδιασμού για συστήματα RO. Στην καρτέλα Reverse Osmosis, θα γίνει η εισαγωγή των παρακάτω στοιχείων, που υπολογίστηκαν στο κεφάλαιο 4.4.1 (Εικόνα 55) :

Το σύστημα θα λειτουργεί με ένα στάδιο, η ανάκτηση θα είναι 40%, θα χρησιμοποιηθούν 22 δοχεία πίεσης, με 7 στοιχεία ανά δοχείο και οι μεμβράνες θα είναι τύπου SW30HR LE-440i.



Εικόνα 55: Παράμετροι σχεδιασμού για το σύστημα Αντίστροφης Ωσμωσης

Το πρόγραμμα τώρα έχει τα απαραίτητα στοιχεία για να κάνει την προσομοίωση (Καρτέλα 'Summary Report').

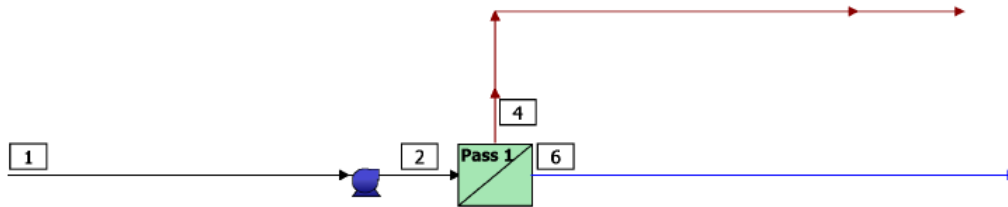
4.5.3 Αποτελέσματα ανάλυσης

Τα αποτελέσματα της επίλυσης των εξισώσεων του συστήματος από το WAVE φαίνονται αναλυτικά παρακάτω:

RO System Flow Diagram. Στον πρώτο πίνακα, ακριβώς κάτω από το διάγραμμα της διεργασίας, γίνεται μία σύνοψη των συνθηκών των παροχών του συστήματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 56. Το νερό τροφοδοσίας εισέρχεται στο σύστημα με παροχή $250\text{m}^3/\text{h}$ και συγκέντρωση διαλυμένων στερεών $\text{TDS}=39.355\text{mg/L}$, (υπό πίεση $60,9\text{ bar}$) εκ των οποίων μόνο τα $100\text{m}^3/\text{h}$ εξέρχονται ως καθαρό, παραγόμενο νερό, εφόσον η ανάκτηση είναι 40%, και

συγκέντρωση μόλις TDS=135mg/L. Το ρεύμα συμπυκνώματος έχει παροχή 150,3m³/h και υψηλό TDS=65547mg/L.

RO System Flow Diagram



| # | Description | Flow (m ³ /h) | TDS (mg/L) | Pressure (bar) |
|---|-------------------------------|--------------------------|------------|----------------|
| 1 | Raw Feed to RO System | 250.7 | 39,355 | 0.0 |
| 2 | Net Feed to Pass 1 | 250.0 | 39,464 | 60.9 |
| 4 | Total Concentrate from Pass 1 | 150.3 | 65,547 | 58.7 |
| 6 | Net Product from RO System | 100.0 | 135.0 | 0.0 |

Εικόνα 56:Συνοπτικός πίνακας παροχών και διάγραμμα της διεργασίας

RO System Overview. Το Wave δίνει μια σύνοψη του σχεδιασμού, της διαμόρφωσης και της απόδοσης του συστήματος σε αυτόν τον πίνακα (Εικόνα 57). Μερικά αξιοσημείωτα δεδομένα είναι: η ανάκτηση του συστήματος RO έχει οριστεί κι είναι σταθερή στο 40%, η συνολική ενεργή περιοχή μεμβράνης είναι 6295 m² και η ενέργεια για τη διεργασία της υφιστάμενης ροής τροφοδοσίας θαλασσινού νερού υπολογίζεται στα 5,31 kWh /m³.

RO Flow Table (Stage Level). Το Wave συνοψίζει σε αυτόν τον πίνακα (Εικόνα 58) μια ποικιλία παραμέτρων ροής / συγκέντρωσης για κάθε στάδιο. Αυτός ο πίνακας είναι χρήσιμος για να προσδιοριστεί εάν ο σχεδιασμός κάθε σταδίου είναι επαρκής. Στην προκειμένη περίπτωση, φυσικά, έχει επιλεγεί ένα στάδιο.

RO System Overview

| | | | | | | | |
|-------------------|---------------------|------------|-------|---------------|-------|-------------|--------|
| Total # of Trains | 1 | Online = | 1 | Standby = | 0 | RO Recovery | 39.9 % |
| System Flow Rate | (m ³ /h) | Net Feed = | 250.7 | Net Product = | 100.0 | | |

| Pass | | Pass 1 |
|------------------------|-----------------------|---|
| Stream Name | | Stream 1 |
| Water Type | | Sea Water (With conventional pretreatment, SDI < 5) |
| Number of Elements | | 154 |
| Total Active Area | (m ²) | 6295 |
| Feed Flow per Pass | (m ³ /h) | 250.0 |
| Feed TDS* | (mg/L) | 39,464 |
| Feed Pressure | (bar) | 60.9 |
| Flow Factor | | 0.85 |
| Permeate Flow per Pass | (m ³ /h) | 100.0 |
| Pass Average flux | (LMH) | 15.9 |
| Permeate TDS* | (mg/L) | 135.0 |
| Pass Recovery | | 40.0 % |
| Average NDP | (bar) | 21.8 |
| Specific Energy | (kWh/m ³) | 5.31 |
| Temperature | (°C) | 22.0 |
| pH | | 7.3 |
| Chemical Dose | | |
| RO System Recovery | | 39.9 % |
| Net RO System Recovery | | 39.9% |

Footnotes:

*Total Dissolved Solids includes ions, SiO₂ and B(OH)₃. It does not include NH₃ and CO₂

Εικόνα 57: Σύνοψη του σχεδιασμού, της διαμόρφωσης και της απόδοσης του συστήματος αντίστροφης ώσμωσης

RO Flow Table (Stage Level) - Pass 1

| Stage | Elements | #PV | #Els per PV | Feed | | | | Concentrate | | | Permeate | | | |
|-------|---------------|-----|-------------|---------------------|---------------------|------------|-------------|---------------------|------------|------------|---------------------|----------|------------|----------|
| | | | | Feed Flow | Recirc Flow | Feed Press | Boost Press | Conc Flow | Conc Press | Press Drop | Perm Flow | Avg Flux | Perm Press | Perm TDS |
| | | | | (m ³ /h) | (m ³ /h) | (bar) | (bar) | (m ³ /h) | (bar) | (bar) | (m ³ /h) | (LMH) | (bar) | (mg/L) |
| 1 | SW30HRLE-440i | 22 | 7 | 250.0 | 0.00 | 60.6 | 0.0 | 150.3 | 58.7 | 2.0 | 100.0 | 15.9 | 0.0 | 135.0 |

Εικόνα 58: Παράμετροι ροής / συγκέντρωσης για κάθε στάδιο

RO Solute Concentrations. Αυτός ο πίνακας συνοψίζει τη συγκέντρωση κάθε διαλυμένου ιόντος σε κάθε στάδιο και ροή. Ο πίνακας φαίνεται στην Εικόνα 60. Από τη σύγκριση των τιμών με την Ανώτατη επιτρεπόμενη συγκέντρωση (Εικόνα 59), προκύπτει πως όλες οι τιμές είναι εντός προδιαγραφών, εξαιρουμένης της τιμής του pH, άρα στο στάδιο της μετεπεξεργασίας θα γίνει διόρθωση της οξύτητας.

RO Solute Concentrations - Pass 1

| Concentrations (mg/L as ion) | | | | |
|-------------------------------|--------|------------|----------|-------|
| | Feed | Concentrat | Permeate | |
| | | e | Stage1 | Total |
| NH ₄ ⁺ | 0.20 | 0.33 | 0.00 | 0.00 |
| K ⁺ | 55.00 | 91.57 | 0.25 | 0.25 |
| Na ⁺ | 12,391 | 20,634 | 49.96 | 49.96 |
| Mg ⁺² | 1,500 | 2,501 | 1.44 | 1.44 |
| Ca ⁺² | 380.0 | 633.6 | 0.36 | 0.36 |
| Sr ⁺² | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Ba ⁺² | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| CO ₃ ⁻² | 5.15 | 12.34 | 0.00 | 0.00 |
| HCO ₃ ⁻ | 208.9 | 340.2 | 1.15 | 1.15 |
| NO ₃ ⁻ | 5.00 | 8.29 | 0.07 | 0.07 |
| Cl ⁻ | 22,010 | 36,656 | 80.76 | 80.76 |
| F ⁻ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| SO ₄ ⁻² | 2,800 | 4,669 | 1.03 | 1.03 |
| SiO ₂ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Boron | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| CO ₂ | 5.49 | 7.75 | 6.12 | 6.12 |
| TDS ^a | 39,355 | 65,547 | 135.0 | 135.0 |
| pH | 7.3 | 7.4 | 5.5 | 5.5 |

Footnotes:

^aTotal Dissolved Solids includes ions, SiO₂ and B(OH)₃. It does not include NH₃ and CO₂

Εικόνα 60: Συγκέντρωση ιόντων ανά στάδιο και ροή

| Ιόντα | Ανώτατη Επιτρεπόμενη συγκέντρωση ^(*) (mg/lit) |
|------------------|---|
| NH ₄ | 0,5 |
| K | 12 |
| Na | 200 |
| Mg | 50 |
| Ca | - |
| Sr | - |
| Ba | - |
| CO ₃ | - |
| HCO ₃ | - |
| NO ₃ | 50 |
| Cl | 250 |
| F | 1,5 |
| SO ₄ | 250 |
| SiO ₂ | - |
| B | 1,0 |
| CO ₂ | - |
| TDS | 1500 |
| pH | 6,5 – 9,5 |

Εικόνα 59: Ανώτατη επιτρεπόμενη συγκέντρωση (Κοινή Υπουργική Απόφαση Υ2/2600/2001 – ΦΕΚ-892 Β'/11-7-01)

RO Design warnings. Το Wave παρουσιάζει προειδοποιήσεις για τον σχεδιασμό όταν μία ή περισσότερες υπολογισμένες παράμετροι (π.χ. ρυθμοί ροής) είναι εκτός των προτεινόμενων προδιαγραφών σχεδιασμού. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή δεν εμφανίζεται κάποιο πρόβλημα. (Εικόνα 61)

RO Flow Table (Element Level). Το Wave συνοψίζει τα αποτελέσματα ροής / συγκέντρωσης για κάθε στοιχείο μεμβράνης του συστήματος. (Εικόνα 61)

RO Design Warnings

None

RO Flow Table (Element Level) - Pass 1

| Stage | Element | Element Name | Recovery (%) | Feed Flow (m ³ /h) | Feed Press (bar) | Feed TDS (mg/L) | Conc Flow (m ³ /h) | Perm Flow (m ³ /h) | Perm Flux (LMH) | Perm TDS (mg/L) |
|-------|---------|---------------|--------------|-------------------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 1 | SW30HRLE-440i | 8.9 | 11.4 | 60.6 | 39,463 | 10.4 | 1.01 | 24.6 | 71.24 |
| 1 | 2 | SW30HRLE-440i | 8.5 | 10.4 | 60.2 | 43,283 | 9.48 | 0.88 | 21.5 | 88.14 |
| 1 | 3 | SW30HRLE-440i | 7.9 | 9.48 | 59.9 | 47,277 | 8.73 | 0.75 | 18.4 | 110.5 |
| 1 | 4 | SW30HRLE-440i | 7.2 | 8.73 | 59.6 | 51,330 | 8.10 | 0.63 | 15.4 | 140.2 |
| 1 | 5 | SW30HRLE-440i | 6.4 | 8.10 | 59.3 | 55,307 | 7.58 | 0.52 | 12.7 | 179.9 |
| 1 | 6 | SW30HRLE-440i | 5.5 | 7.58 | 59.1 | 59,071 | 7.17 | 0.42 | 10.3 | 232.8 |
| 1 | 7 | SW30HRLE-440i | 4.7 | 7.17 | 58.9 | 62,509 | 6.83 | 0.33 | 8.2 | 303.4 |

Εικόνα 61: Προειδοποιήσεις για το σχεδιασμό και αποτελέσματα ροής / συγκέντρωσης για κάθε στοιχείο του συστήματος

RO Solubility Warnings. Δεν εμφανίζεται καμία προειδοποίηση για τη συγκέντρωση ιόντων. (Εικόνα 62)

RO Solubility Warnings

None

RO Chemical Adjustments

| | Pass 1 Feed | RO 1 st Pass Conc |
|--------------------------------------|-------------|------------------------------|
| pH | 7.3 | 7.4 |
| Langelier Saturation Index | 0.43 | 0.97 |
| Stiff & Davis Stability Index | -0.59 | -0.09 |
| TDS ^a (mg/l) | 39,355 | 65,547 |
| Ionic Strength (molal) | 0.82 | 1.40 |
| HCO ₃ ⁻ (mg/L) | 208.9 | 340.2 |
| CO ₂ (mg/l) | 5.50 | 7.75 |
| CO ₃ ⁻² (mg/L) | 5.15 | 12.34 |
| CaSO ₄ (% saturation) | 18.8 | 35.5 |
| BaSO ₄ (% saturation) | 0.00 | 0.00 |
| SrSO ₄ (% saturation) | 0.00 | 0.00 |
| CaF ₂ (% saturation) | 0.00 | 0.00 |
| SiO ₂ (% saturation) | 0.00 | 0.00 |
| Mg(OH) ₂ (% saturation) | 0.04 | 0.10 |

Footnotes:

^aTotal Dissolved Solids includes ions, SiO₂ and B(OH)₃. It does not include NH₃ and CO₂

Εικόνα 62: Solubility warnings και Chemical Adjustments

RO Chemical Adjustments. Εάν προστεθούν χημικές ουσίες όπως ρυθμιστές pH (οξέα, βάσεις), αντι-ρυπαντικά (anti-scalants) ή αποχλωριωτές, αυτός ο πίνακας συνοψίζει τις επιπτώσεις τους στο σύστημα, καλές ή κακές. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 62, η μόνη προειδοποίηση αφορά το δείκτη Langelier (Langelier Saturation index, LSI).

Ο δείκτης Langelier είναι ένα μέτρο της ικανότητας ενός διαλύματος να διαλύει ή να εναποθέτει ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3), και χρησιμοποιείται συχνά ως δείκτης της διαβρωτικότητας του νερού. Οι ενδείξεις για το LSI και το βελτιωμένο LSI από το Carrier βασίζονται στις ακόλουθες τιμές:

| LSI | Indication |
|-------|---|
| LSI<0 | Water is undersaturated with respect to calcium carbonate. Undersaturated water has a tendency to remove existing calcium carbonate protective coatings in pipelines and equipment. |
| LSI=0 | Water is considered to be neutral. Neither scale-forming nor scale removing. |
| LSI>0 | Water is supersaturated with respect to calcium carbonate (CaCO_3) and scale forming may occur. |

| LSI (Carrier) | Indication |
|---------------|--|
| -2.0<-0.5 | Serious corrosion |
| -0.5<0 | Slightly corrosion but non-scale forming |
| LSI = 0,0 | Balanced but pitting corrosion possible |
| 0.0<0.5 | Slightly scale forming and corrosive |
| 0.5<2 | Scale forming but non corrosive |

Εικόνα 63: Ενδείξεις δείκτη Langelier

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, το WAVE προειδοποιεί το χρήστη ότι η έμφραξη των μεμβρανών, λόγω CaCO_3 , είναι πιθανή.

5 Συμπεράσματα: Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

Το υδατικό στρες σε αρκετές περιοχές του πλανήτη αποτελεί ένα ενεργό πρόβλημα που αναμένεται να κλιμακωθεί υπό την επίδραση της αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού και τις κλιματικής αλλαγής (Kalogirou, 1997; Altman et al., 2011).

Το κόστος της μεταφοράς γλυκού νερού σε περιοχές που εμφανίζουν λειψυδρία είναι σημαντικά υψηλότερο σε σχέση με τις μεθόδους αφαλάτωσης που μπορούν να εφαρμοστούν για την παραγωγή του (Γιαννέλης, 2018).

Η παραγωγή αφαλατωμένου νερού με τη διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης κυριαρχεί συντριπτικά έναντι των διαδικασιών θερμικής αφαλάτωσης καθώς έχει αποδειχθεί πιο αξιόπιστη και ενεργειακά αποδοτική (Buenaventura, 2015).

Η αφαλάτωση θαλασσινού νερού με αντίστροφη ώσμωση προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων μεθόδων αφαλάτωσης, συμπεριλαμβανομένης της υψηλής απόδοσης και της εκλεκτικότητας, της εύκολης διαχείρισης, της ευελιξίας και της καταλληλότητας για πληθώρα εφαρμογών (Ramato et al., 2019; Urrea et al., 2019).

Από την άλλη πλευρά, η αντίστροφη ώσμωση ως μέθοδος αφαλάτωσης είναι συνήθως πιο ακριβή από την εφαρμογή οποιασδήποτε άλλης συμβατικής μεθόδου επεξεργασίας του νερού (Kim & Hong, 2018), καθώς πρόκειται για μέθοδο που απαιτεί υψηλή ενεργειακή κατανάλωση (Schunke et al., 2020).

Ωστόσο, οι τεχνολογικές βελτιώσεις των διατάξεων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση έχουν οδηγήσει τη μέθοδο αυτή να κυριαρχήσει στις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης μεγάλης κλίμακας στον πλανήτη (Schunke et al., 2020). Επιπλέον, είναι η μόνη μέθοδος που εγγυάται τη δραστική μείωση της συγκέντρωσης αλάτων στο νερό στο βαθμό που να το καθιστά πόσιμο (Wilf, 2014).

Στην Ελλάδα κυριαρχούν οι μικρές μονάδες αφαλάτωσης (ως 1000 m³/ημέρα), αλλά το πλήθος τους αυξάνεται συνεχώς (Μπακογιάννη, 2016).

Κρίσιμος παράγοντας για την οικονομική βελτίωση των επενδύσεων στην αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση είναι η εξέλιξη της τεχνολογίας των μεμβρανών. Η αύξηση της ενεργού επιφάνειας των μεμβρανών και η πυκνότερη αναδίπλωσή τους είναι οι βασικοί στόχοι της υφιστάμενης τεχνολογικής έρευνας για την αύξηση της παραγωγής γλυκού νερού χρησιμοποιώντας διατάξεις της ίδιας διαμέτρου (IWA, 2016).

Κορυφαία τεχνολογική πρόκληση αποτελεί το φαινόμενο της έμφραξης των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης, καθώς καμία από τις τεχνικές που αναλύθηκαν στο πλαίσιο της εργασίας δεν μπορεί να το αποτρέψει πλήρως. Ιδιαίτερα όταν το ακατέργαστο νερό παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις στην χημική του σύσταση και στην ποιότητά του, δεν είναι καθόλου εύκολο να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος προεργασίας του νερού, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε σχεδιαστικά σφάλματα και γρήγορη φθορά της διάταξης σε επόμενα στάδια. (Vedavyasan, 2007). Ως εκ τούτου, ο συνδυασμός τεχνικών προεργασίας του νερού, παρότι ανεβάζει το αρχικό κόστος σχεδιασμού της διάταξης αφαλάτωσης, ωστόσο μακροπρόθεσμα μπορεί να μειώσει σημαντικά τα λειτουργικά κόστη παρατείνοντας το χρόνο ζωής των μεμβρανών (Valavala, 2011).

Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την ενεργειακή τροφοδοσία των διατάξεων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος παραγωγής γλυκού νερού, ενώ η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων μειώνει σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. (Khan Meer, 2018)

Η διαδικασία αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση που αξιοποιεί τη φωτοβολταϊκή τεχνολογία (PV) φαίνεται μία ελκυστική λύση. Ωστόσο, αρκετές τεχνικοοικονομικές μελέτες πρέπει ακόμη να διεξαχθούν προκειμένου να εκτιμηθεί η οικονομική βιωσιμότητά της (Ghafoor et al., 2020). Ωστόσο, η ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας είναι πολλά υποσχόμενη και παρουσιάζει ενδιαφέρουσες προοπτικές.

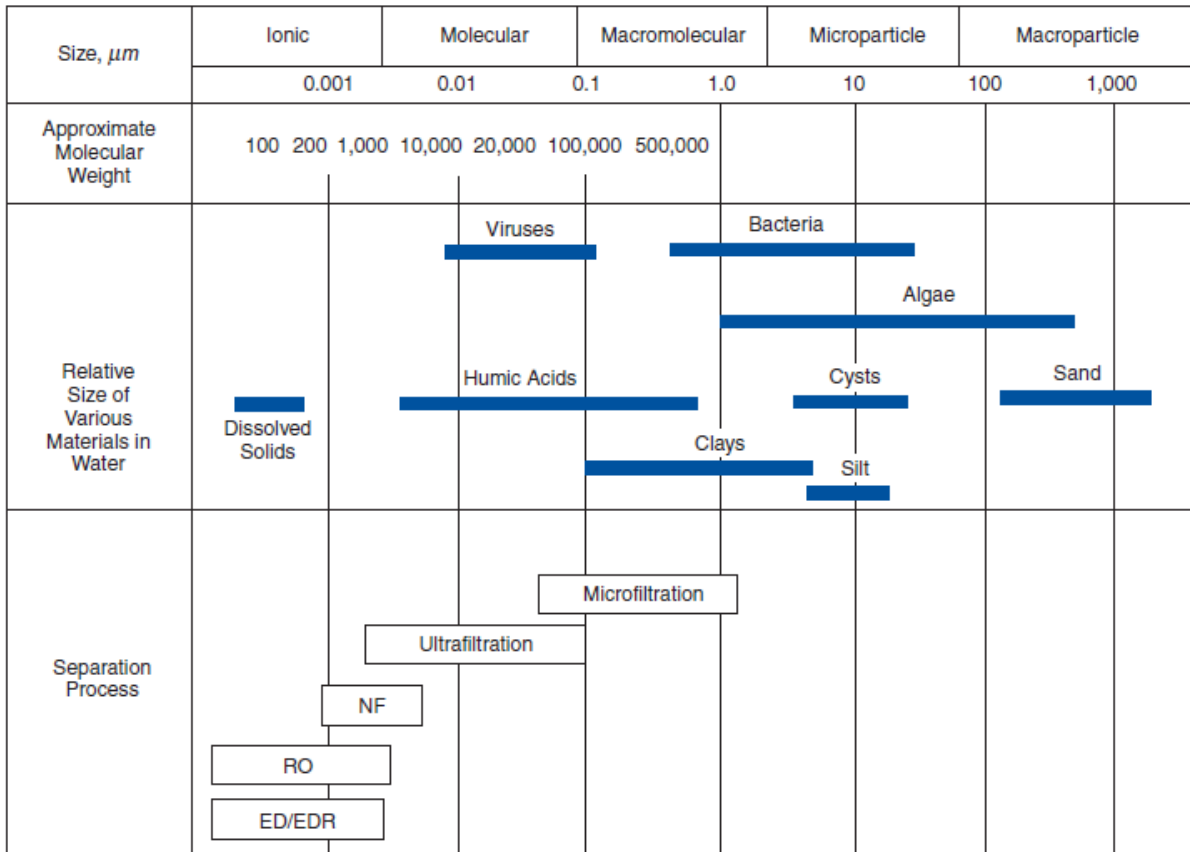
Τα απαραίτητα στάδια για το σχεδιασμό μιας διάταξης αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση είναι: 1) ο καθορισμός της ποιότητας του νερού τροφοδοσίας, 2) ο έλεγχος της ροής, 3) η επιλογή κατάλληλης μεμβράνης, 4) η επιλογή μέσης ροής συστήματος, 5,6) ο προσδιορισμός του αναγκαίου αριθμού των στοιχείων μεμβρανών και των αντίστοιχων δοχείων πίεσης, 7) η επιλογή του αριθμού των σταδίων, 8) η επιλογή του λόγου των σταδίων, 9) η εξισορρόπηση της ροής προϊόντος και 10) η ανάλυση και βελτιστοποίηση του συστήματος. (Voutchkov, 2012)

Ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός συστήματος αφαλάτωσης εξαρτάται από τη σχέση ανάμεσα στην απαιτούμενη ροή του προϊόντος με την ελαχιστοποίηση της πίεσης τροφοδοσίας και του κόστους της μεμβράνης και την ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της ποιότητας και της ανάκτησης του προϊόντος. Αυτή η χρυσή τομή εντοπίζεται κυρίως μέσα από την εμπειρία και τη σύγκριση με αντίστοιχες διατάξεις. (Solutions, 2010)

Η σταθερή μείωση του κόστους παραγωγής γλυκού νερού με τη μέθοδο της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση πρόκειται να επιταχύνει την υφιστάμενη στροφή στο θαλασσινό νερό ως πηγή γλυκού νερού σε πολλές παράκτιες χώρες και περιοχές που αντιμετωπίζουν πρόβλημα λειψυδρίας. (IWA, 2016). Ως εκ τούτου, η μέθοδος της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση συνεχίζει να αποτελεί μία σύγχρονη τεχνολογία αφαλάτωσης με την εφαρμογή της να παρουσιάζει δυναμική εξάπλωσης σε πολλές γωνιές του πλανήτη.

Παράρτημα

Εικόνα Π1: Απεικόνιση των κυριότερων μεθόδων καθαρισμού του νερού σε σχέση με τα μεγέθη των σωματιδίων και των στοιχείων που φιλτράρουν.



Εικόνα Π3: Ανάλυση νερού για αντίστροφη ώσμωση

| | | | |
|---|------------------------------------|-------------------------------|-------|
| Sample identification: | | | |
| Feed source: | | | |
| Conductivity: | pH: | Temperature (°C): | |
| Feed water analysis: | NH ₄ ⁺ | CO ₂ | |
| Please indicate units (mg/L as ion | K ⁺ | CO ₃ ²⁻ | |
| or ppm as CaCO ₃ or meq/L) | Na ⁺ | HCO ₃ ⁻ | |
| | Mg ²⁺ | NO ₃ ⁻ | |
| | Ca ²⁺ | Cl ⁻ | |
| | Ba ²⁺ | F ⁻ | |
| | Si ²⁺ | SO ₄ ²⁻ | |
| | Fe ²⁺ | PO ₄ ²⁻ | |
| | Fe (tot) | S ²⁻ | |
| | Mn ²⁺ | SiO ₂ (colloidal) | |
| | Boron | SiO ₂ (soluble) | |
| | Al ³⁺ | | |
| Other ions: | | | |
| TDS (by method): | | | |
| TOC: | | | |
| BOD: | | | |
| COD: | | | |
| AOC: | | | |
| BDOC: | | | |
| Total alkalinity (m-value): | | | |
| Carbonate alkalinity (p-value): | | | |
| Total hardness: | | | |
| Turbidity (NTU): | | | |
| Silt density index (SDI): | | | |
| Bacteria (count/mL): | | | |
| Free chlorine: | | | |
| Remarks: | | | |
| (odor, smell, color, biological activity, etc.) | | | |
| | | | |
| | | | |
| Analysis by: | | | |
| Date: | | | |

Εικόνα Π4: Ανάλυση ποιότητας νερού πηγής για αφαλάτωση αντίστροφης ώσμωσης

| Parameter | | Unit |
|---|---------------|--|
| Key Minerals | | mg/L |
| Cations | Anions | |
| Sodium | Chloride | |
| Magnesium | Carbonate | |
| Calcium | Bicarbonate | |
| Potassium | Sulfate | |
| Barium | Nitrate | |
| Strontium | Fluoride | |
| Boron | Phosphate | |
| Bromide | Sulfur | |
| Other Key RO System Design-Related Parameters | | |
| Salinity | | mg/L |
| Conductivity | | μS/cm |
| Temperature | | °C |
| pH | | units |
| Total alkalinity | | mg/L as CaCO ₃ |
| Total hardness | | mg/L as CaCO ₃ |
| Iron in reduced form (Fe ²⁺), mg/L | | Foulant if > 0.05 mg/L |
| Iron in oxidized form, mg/L | | Foulant if > 2.0 mg/L Membrane damage by chlorine if > 0.5 mg/L |
| Manganese, mg/L | | Foulant if > 0.02 mg/L |
| Aluminum, mg/L | | Foulant if > 0.1 mg/L |
| Copper, μg/L | | Potential membrane damage if > 50 μg/L |
| Arsenic | | Potential toxicant if > 10 μm/L in permeate |
| Turbidity | | Accelerated fouling if > 0.1 NTU |
| Total suspended solids (TSS), mg/L | | Accelerated fouling if > 1 mg/L |
| Silt density index (SDI) | | Accelerated fouling if > 5 |
| Total hydrocarbons, mg/L | | Foulant if > 0.02 mg/L |
| Silica (colloidal), mg/L | | Foulant if > 100 mg/L in concentrate |
| Total organic carbon (TOC), mg/L | | Potential for accelerated fouling if > 2 mg/L |
| UV ₂₅₄ , cm ⁻¹ | | Potential for accelerated fouling if > 0.5 cm ⁻¹ |
| Total algal count, algal cells per milliliter | | Algal bloom if > 2000 algal cells per milliliter |
| Hydrogen sulfide | | Odor and membrane fouling if > 0.1 mg/L. |
| Ammonia, mg/L | | Membrane damage if bromide > 0.4 mg/L |
| Free chlorine, mg/L | | Membrane damage if > 0.01 mg/L |
| Oxidation reduction potential, mV | | Membrane damage if > 250 mV |
| Total coliform count, Most Probable Number (MPN) per 100 mL | | Potential pathogen contamination if > 10 ⁴ |

Εικόνα Π15: Οδηγίες σχεδιασμού για στοιχεία FILMTEC 8 ιντσών σε εφαρμογές επεξεργασίας νερού

| Feed source | RO Permeate | Well Water | Surface Water | | | Wastewater (Filtered Municipal Effluent or Industrial Effluent) | | | Seawater | | | |
|--|--|---|---|---|-----------------------------------|---|---|---------------------------|---|--|--|---------|
| | | | Surface Water with DOW™ Ultrafiltration | Generic membrane filtration or advanced conventional pretreatment | Generic conventional pretreatment | DOW™ Ultrafiltration | Generic membrane filtration (MBR/MF/UF) | Conventional pretreatment | Well or Open Intake with DOW™ Ultrafiltration | Open Intake with generic membrane filtration or advanced conventional pretreatment | Open Intake with generic conventional pretreatment | |
| Feed silt density index (%/min) | SDI < 1 | SDI < 3 | SDI < 2.5 | SDI < 3 | SDI < 5 | SDI < 2.5 | SDI < 3 | SDI < 5 | SDI < 2.5 | SDI < 3 | SDI < 5 | |
| Maximum element recovery % | 30 | 19 | 19 | 17 | 15 | 14 | 13 | 12 | 15 | 14 | 13 | |
| Active Membrane Area | Maximum permeate flow, gpd or maximum permeate flux, gfd | | | | | | | | | | | |
| 365-ft ² elements | 10,200 | 8,500 | 8,500 | 7,200 | 6,600 | 6,300 | 5,900 | 5,200 | — Not Recommended — | | | |
| 370-ft ² elements | 10,200 | 8,500 | 8,500 | 7,200 | 6,600 | 6,300 | 5,900 | 5,200 | 7,800 | 7,400 | 7,000 | |
| 380-ft ² elements | 10,700 | 8,900 | 8,900 | 7,500 | 6,900 | 6,500 | 6,000 | 5,300 | 7,900 | 7,600 | 7,200 | |
| 390-ft ² elements | 10,920 | 9,200 | — Not Recommended — | | | — Not Recommended — | | | — Not Recommended — | | | |
| 400-ft ² elements | 11,200 | 9,300 | 9,300 | 7,900 | 7,300 | 6,800 | 6,400 | 5,700 | 8,400 | 8,000 | 7,600 | |
| 440-ft ² elements | 12,300 | 10,300 | 10,300 | 8,700 | 8,000 | 7,600 | 7,100 | 6,300 | 9,200 | 8,800 | 8,360 | |
| Maximum element flux (gfd) | 28 | 22.7 | 22.7 | 20 | 18 | 17 | 16 | 14 | 21 | 20 | 19 | |
| Design Flux range | 21 – 25 | 16 – 20 | 16 – 20 | 13 – 17 | 12 – 16 | 11 – 15 | 10 – 14 | 8 – 12 | 9 – 11 | 8 – 10 | 7 – 10 | |
| Element type | Minimum concentrate flowrate², gpm (m³/h) | | | | | | | | | | | |
| BW elements (365 ft ²) | 10 (2.3) | 13 (3.0) | 13 (3.0) | 13 (3.0) | 15 (3.4) | 16 (3.6) | 16 (3.6) | 18 (4.1) | — Not Recommended — | | | |
| BW elements (400 ft ² and 440 ft ²) | 10 (2.3) | 13 (3.0) | 13 (3.0) | 13 (3.0) | 15 (3.4) | 18 (4.1) | 18 (4.1) | 20 (4.6) | — Not Recommended — | | | |
| NF elements | 10 (2.3) | 13 (3.0) | 13 (3.0) | 13 (3.0) | 15 (3.4) | 18 (4.1) | 18 (4.1) | 18 (4.1) | — Not Recommended — | | | |
| Fullfit elements | 25 (5.7) | 25 (5.7) | — Not Recommended — | | | — Not Recommended — | | | — Not Recommended — | | | |
| SW elements | 10 (2.3) | — NR — | — Not Recommended — | | | — Not Recommended — | | | 13 (3.0) | 14 (3.2) | 15 (3.4) | |
| Element type | Active area ft² (m²) | Maximum feed flowrate², gpm (m³/h) | | | | | | | | | | |
| BW elements | 365 (33.9) | 65 (15) | 65 (15) | 65 (15) | 63 (14) | 58 (13) | 52 (12) | 52 (12) | 52 (12) | — Not Recommended — | | |
| BW/NF elements | 400 (37.2) | 75 (17) | 75 (17) | 75 (17) | 73 (17) | 67 (15) | 61 (14) | 61 (14) | 61 (14) | — Not Recommended — | | |
| BW elements | 440 (40.9) | 75 (17) | 75 (17) | 75 (17) | 73 (17) | 67 (15) | 61 (14) | 61 (14) | 61 (14) | — Not Recommended — | | |
| Fullfit elements | 390 (36.2) | 85 (19) | 75 (17) | — Not Recommended — | | | — Not Recommended — | | | — Not Recommended — | | |
| SW elements | 370 (34.4) | 65 (15) | — NR — | — Not Recommended — | | | — Not Recommended — | | | 63 (14) | 60 (13.5) | 56 (13) |
| SW elements | 380 (35.3) | 72 (16) | — NR — | — Not Recommended — | | | — Not Recommended — | | | 70 (16) | 66 (15) | 62 (14) |
| SW elements | 400 (37.2) | 72 (16) | — NR — | — Not Recommended — | | | — Not Recommended — | | | 70 (16) | 66 (15) | 62 (14) |

Βιβλιογραφία

- Ali, Aamer & Tufa, Ramato Ashu & Macedonio, F. & Curcio, Efrem & Drioli, Enrico. (2018). Membrane technology in renewable-energy-driven desalination. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 81. 1-21. 10.1016/j.rser.2017.07.047.
- Alkaisi, A., Mossad, R., & Sharifian-Barforoush, A. (2017). A review of the water desalination systems integrated with renewable energy. *Energy Procedia*, 110, 268-274.
- Alkhatib, Ammar. (2014). Reverse-Osmosis Desalination of Water Powered by Photo-Voltaic Modules. *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering*. 03. 22-29. 10.4236/cweee.2014.31003.
- Altman S.J., R. P. Jensen, M.A. Cappelle A.L. Sanchez, R.L. Everett, H.L. Anderson and L.K. McGrath, Nanofiltration Treatment of Side-Stream Cooling Tower Water for Reduction of Water Usage. *Desalination* 285, 177–183 (2011).
- Aristotle with E.W. Webster, trans., *Meteorologica*, in: Ross, W. D., ed., *The Works of Aristotle*, vol. 3, (Oxford, England: Clarendon Press, 1931), Book III, §358: 16–18 and §359: 1–5.
- Bixio, D., Thoeye, C., De Koning, J., Joksimovic, D., Savic, D., Wintgens, T., & Melin, T. (2006). Wastewater reuse in Europe. *Desalination*, 187(1-3), 89–101. doi:10.1016/j.desal.2005.04.070
- Buenaventura A., (2015). A short history of desalination. *The energy of change*. Ανακτήθηκε 16 Απριλίου 2020 από <http://www.theenergyofchange.com/short-history-of-desalination>
- Buros, O. 1980. *The USAID desalination manual*. Englewood, N.J.: IDEA Publications.
- Cadotte, John E. (1981). Interfacially synthesized reverse osmosis membrane. U.S. Patent 4,277,344
- Cassano Alfredo, Rastogi Navin K., Basile Angelo. (2020). 10 - Reverse osmosis in food processing. Editor(s): Angelo Basile, Alfredo Cassano, Navin K. Rastogi. *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*. Elsevier. Pages 229-257. ISBN 9780128167779. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816777-9.00010-1>.
- Central Intelligence Agency. (2008). «CIA- The world fact book».

- Central intelligence agency. 2019. Central Intelligence Agency. [Online]. [19 April 2019]. Available from: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/xx.html>
- City of Cape Coral. (2019). Annual Consumer Report on the Quality of Tap Water. https://www.capecoral.net/departments/utilities_department/docs/2019%20Citywide%20CR.pdf
- Costa L.M. and P.J. McCabe. US Patent 7514001 B2 High recovery reverse osmosis process and apparatus (2009).
- Council Directive of 15 July 1980 on the approximation of the laws of the Member States relating to the exploitation and marketing of natural mineral waters. eur-lex.europa.eu
- Crittenden, John; Trussell, Rhodes; Hand, David; Howe, Kerry and Tchobanoglous, George (2005). Water Treatment Principles and Design, 2nd ed. John Wiley and Sons. New Jersey. ISBN 0-471-11018-3
- Culp A., Principles of Energy Conversion; McGraw Hill: New York, NY (1991).
- Das Rasel, Ali Md. Equb, Abd Hamid Sharifah Bee, Ramakrishna Seeram, Chowdhury Zaira Zaman. (2014). Carbon nanotube membranes for water purification: A bright future in water desalination. Desalination. Volume 336, 2014, Pages 97-109. ISSN 0011-9164. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.12.026>.
- Dow. (2017). Water & Process Solutions. FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes. Technical Manual. Form No. 609-00071-0416
- E. Maxwell, R. George and S. Wilcox Climatological Solar Radiation Model; the National Climatic Data Center: Asheville, NC (1998).
- Ebbing, Darrell D., Steven D. Gammon. (2011) "Γενική Χημεία". Νικόλαος Δ. Κλούρας (μετάφραση) (έκτη έκδοση). Αθήνα: Τραυλός, σελ. 539-540. ISBN 960-7990-66-8. Ανακτήθηκε στις 19-04-2019
- Ebrahimi, Atieh; Najafpour, Ghasem D; Yousefi Kebria, Daryoush (2019). "Performance of microbial desalination cell for salt removal and energy generation using different catholyte solutions". Desalination. 432: 1. doi:10.1016/j.desal.2018.01.002

- Elimelech, M.; Phillip, W.A. (2011). The Future of Seawater Desalination: Energy, Technology, and the Environment. *Science*. 333, 712–717.
- European Environmental Agency, Sustainable water use — Part 1: Sectoral use of water; 1999.
- Featherstone J.L., Geothermal plant silica control system. US Patent 4429535 (1984).
- Fischetti, Mark (2007). Fresh from the Sea. *Scientific American*. 297 (3): 118–119. Bibcode:2007SciAm.297c.118F. doi:10.1038/scientificamerican0907-118. PMID 17784633.
- Ghaffour, Noreddine; Missimer, Thomas M.; Amy, Gary L. (2013). "Technical review evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability". *Desalination*. 309: 197–207. doi:10.1016/j.desal.2012.10.015. hdl:10754/562573
- Ghafoor, A., Ahmed, T., Munir, A., Arslan, Ch., Ahmadd, S.A. (2020). Techno-economic feasibility of solar based desalination through reverse osmosis. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114464>
- Glater, J. (1998). "The early history of reverse osmosis membrane development". *Desalination*. 117: 297–309. doi:10.1016/S0011-9164(98)00122-2.
- Grabowski, Andrej (2010). Electromembrane desalination processes for production of low conductivity water. Berlin: Logos-Verl. ISBN 978-3832527143.
- Gude, Veera Ganeswar; Nirmalakhandan, Nagamany; Deng, Shuguang; Maganti, Anand. (2012). Low temperature desalination using solar collectors augmented by thermal energy storage. *Applied Energy*. Volume 91, Issue 1. Pages 466-474. ISSN 0306-2619. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.10.018>.
- Heihsel, M., Lenzen, M., Malik, A., and Geschke, A. (2019). The carbon footprint of desalination—an input-output analysis of seawater reverse osmosis desalination in Australia for 2005–2015. *Desalination* 454, 71–81. doi: 10.1016/j.desal.2018.12.008
- Heins, W. F. (2010). "Is a paradigm shift in produced water treatment technology occurring at SAGD facilities?" *Journal of Canadian Petroleum Technology* 49: 10-15.

- Heins, W. F., R. McNeill, et al. (2005). World's first SAGD facility using evaporators, drum boilers, and zero discharge crystallizers to treat produced water. Paper 2005-115. Canadian International Petroleum Conference.
- Hermoso, Virgilio; Abell, Robin; Linke, Simon; Boon, Philip (2016). "The role of protected areas for freshwater biodiversity conservation: challenges and opportunities in a rapidly changing world". *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. 26 (S1): 3–11. doi:10.1002/aqc.2681
- Hochstrat R. and T. Wintgens, eds., AQUAREC, Report on Milestone M3.I, Draft of wastewater reuse potential estimation, Interim report, 2003.
- Huehmer, R.; Wang, F. (2009). Energy in Desalination: Comparison of Energy Requirements for Developing Desalination Techniques, 2009. In Proceedings of the AWWA Membrane Technology Conference, Memphis, TN, USA, 15–18 March 2009.
- International Desalination Association. (2015). Desalination By the Numbers. Available online: <http://idadesal.org/desalination-101/desalination-by-the-numbers/>
- International Water Association, (2016). Desalination – Past, Present and Future. Author: NIKOLAY VOUTCHKOV. Published: AUGUST 17, 2016. Πηγή: <https://iwa-network.org/desalination-past-present-future/>
- Jacobsen, Rowan. (2016). Israel Proves the Desalination Era Is Here. *Scientific American*. Republished from *Enzia* on July 29, 2016. <https://www.scientificamerican.com/article/israel-proves-the-desalination-era-is-here/> January 2003.
- Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T., Smakhtin, V., & Kang, S. M. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343-1356.
- Joseph Needham, Ho Ping-Yu, Lu Gwei-Djen, Nathan Sivin, *Science and Civilisation in China: Volume 5, Chemistry and Chemical Technology* (Cambridge, England: Cambridge University Press, 1980), p. 60.

- Kalogirou S.. Survey of solar desalination systems and system selection. *Energy* 22, 69–81 (1997).
- Kalogirou, S. (2005). Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(3), 242–281. doi:10.1016/j.pecs.2005.03.001
- Karabelas A.J., Koutsou C.P., Sioutopoulos D.C., Plakas K.V., Kostoglou M. (2017) Desalination by Reverse Osmosis. In: Figoli A., Criscuoli A. (eds) *Sustainable Membrane Technology for Water and Wastewater Treatment. Green Chemistry and Sustainable Technology*. Springer, Singapore. 978-981-10-5623-9.
- Khan Meer A.M., Rehman S., Al-Sulaiman Fahad A. (2018). A hybrid renewable energy system as a potential energy source for water desalination using reverse osmosis: A review. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.049>
- Khawaji, Akili D.; Kutubkhanah, Ibrahim K.; Wie, Jong-Mihn (2008). "Advances in seawater desalination technologies". *Desalination*. 221 (1–3): 47–69. doi:10.1016/j.desal.2007.01.067
- Kim, J., and Hong, S. (2018). A novel single-pass reverse osmosis configuration for high-purity water production and low energy consumption in seawater desalination. *Desalination* 429, 142–154. doi: 10.1016/j.desal.2017.12.026
- Knorr, Erik; Voigt, Henry; Jaeger, Dietrich. (2012). *Securing Safe Water Supplies : comparison of applicable technologies* (Online-Ausg. ed.). Oxford: Academic Press. p. 33. ISBN 978-0124058866.
- Ko, W. (2013). A Grid-Connected Desalination Plant Operation. https://pdfs.semanticscholar.org/3b9e/e1acd2296a78a9165b155fd20c1ec345e0a1.pdf?_ga=2.144694965.1814559272.1589563456-252606464.1589563456
- Kucera J., (2014) *Desalination: Water from Water*. United States of America: Scrivener Publishing LLC
- Marchena, F. A., & Halman, J. I. (2018). Seawater desalination, the solution for drinking water augmentation in Aruba for more than 85 years: A historical overview. *Aqua-LAC: Journal of the International Hydrological Program for Latin America and Caribbean*, 10(2), 22-37.

- Mattson J.V. and T.G.I. Harris. Zero Discharge of Cooling Water by Sidestream Softening. *Water Pollution Control Federation* 51, 2602–2614 (1979).
- Maxwell E. , R. George and S. Wilcox Climatological Solar Radiation Model; the National Climatic Data Center: Asheville, NC (1998).
- Miller, J.E., (2003). Review of Water Resources and Desalination Technologies. Materials Chemistry Department, Sandia National Laboratories.
- Mito Mohamed T., Ma Xianghong, Albuflasa Hanan, Davies Philip A. (2019). Reverse osmosis (RO) membrane desalination driven by wind and solar photovoltaic (PV) energy: State of the art and challenges for large-scale implementation. doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.008.
- National Academy of Sciences, (2004). Review of the Desalination and Water Purification Technology Roadmap. Committee to Review the Desalination and Water Purification Technology Roadmap, National Research Council. Available from: <http://www.nap.edu/catalog/10912.html> • [Accessed April 2020]
- Panagopoulos, Argyris (2019). Process simulation and techno-economic assessment of a zero liquid discharge/multi-effect desalination/thermal vapor compression (ZLD/MED/TVC) system. *International Journal of Energy Research*. n/a (n/a). doi:10.1002/er.4948. ISSN 1099-114X.
- Panagopoulos, Argyris; Haralambous, Katherine-Joanne; Loizidou, Maria (2019). «Desalination brine disposal methods and treatment technologies - A review» (στα Αγγλικά). *Science of The Total Environment* 693: 133545. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.07.351. ISSN 0048-9697
- Peng Wanxi, Maleki Akbar, Rosen Marc A., Azarikhah Pouria. (2018). Optimization of a hybrid system for solar-wind-based water desalination by reverse osmosis: Comparison of approaches. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.03.021>
- Poulson T., Future Trends Analysis (Draft Phase I Document). U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, Central Arizona Salinity Study (2003).
- Ramato, A. T., Noviello, Y., Di Profio, G., Macedonio, F., Ali, A., Drioli, E., et al. (2019). Integrated membrane distillation-reverse electro dialysis system for energy efficient seawater desalination. *Appl. Energy* 253:113551. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113551

- Sandia National Laboratories. Energy-Water Challenges and Research and Development Issues. Albuquerque, NM, Sandia National Laboratories (2009).
- Schunke Andrew James, Hernandez Herrera German Alberto, Padhye Lokesh, Berry Terri-Ann. (2020). Energy Recovery in SWRO Desalination: Current Status and New Possibilities. *Frontiers in Sustainable Cities*. v.2, page 9 doi: 10.3389/frsc.2020.00009. ISSN=2624-9634
- Shah, Vishal. (2008). *Emerging Environmental Technologies*. Dordrecht: Springer Science. p. 108. ISBN 978-1402087868
- Singh H.N., G.N. Tiwari, Monthly performance of passive and active solar stills for different Indian climatic conditions. *Desalination* 168, 145–150 (2004).
- Solutions, D. W. (2010). Filmtec™ Reverse Osmosis Membranes. Technical Manual, Form, (609-00071), 1-180.
- Stillwell, A.S. & Webber, Michael. (2016). Predicting the Specific Energy Consumption of Reverse Osmosis Desalination. *Water*. 8. 10.3390/w8120601.
- Tripathi R. , G.N. Tiwari, Effect of water depth on internal heat and mass transfer for active solar distillation. *Desalination* 173, 187–200 (2005).
- Tzen E. (2003) "New Desalination Plants in the Greek Islands", EDS Newsletter, Issue 17,
- Tzen, E. (2015) DESALINATION IN GREECE-THE PAST AND THE RECENT DEVELOPMENT.
- Urrea, S. A., Reyes, F. D., Suárez, B. P., and de la Fuente Bencomo, J. A., (2019). Technical review, evaluation and efficiency of energy recovery devices installed in the Canary Islands desalination plants. *Desalination* 450, 54–63. doi: 10.1016/j.desal.2018.07.013
- Voutchkov Nikolay. (2013). *Desalination Engineering Planning and Design*. ISBN: 978-0-07-177716-2
- Voutchkov, N. (2012). *Desalination engineering: planning and design*. McGraw Hill Professional.
- Warsinger, David M.; Mistry, Karan H.; Nayar, Kishor G.; Chung, Hyung Won; Lienhard V, John H. (2015). "Entropy Generation of Desalination Powered by Variable Temperature

Waste Heat". *Entropy*. 17 (11): 7530–7566. Bibcode:2015Entrp..17.7530W. doi:10.3390/e17117530

Warsinger, David M.; Tow, Emily W.; Nayar, Kishor G.; Maswadeh, Laith A.; Lienhard V, John H. (2016). "Energy efficiency of batch and semi-batch (CCRO) reverse osmosis desalination". *Water Research*. 106: 272–282. doi:10.1016/j.watres.2016.09.029. hdl:1721.1/105441. PMID 27728821.

Wilf M. (2014). *The Reverse Osmosis Process. Desalination: Water from Water*. Co-published by John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, and Scrivener Publishing LLC, Salem, Massachusetts. ISBN 978-1-118-20852-6

Wimalawansa, Sunil. (2013). *Purification of Contaminated Water with Reverse Osmosis: Effective Solution of Providing Clean Water for Human Needs in Developing Countries*. *Int. J. Emerging Technology Adv. Engin.* 9001.

Zander, A.K.; Elimelech, M.; Furukawa, D.H.; Gleick, P.; Herd, K.; Jones, K.L.; Rolchigo, P.; Sethi, S.; Tonner, J.; Vaux, H.J.; et al. (2008). *Desalination: A National Perspective; Technical Report; Committee on Advancing Desalination Technology, National Research Council: Washington, DC, USA*.

Zotalis, K., Dialynas, E. G., Mamassis, N., & Angelakis, A. N. (2014). Desalination technologies: Hellenic experience. *Water*, 6(5), 1134-1150.

Γιαννέλης, Ι.(17 Απριλίου 2018). Δύο νέες μονάδες αφαλάτωσης θα εγκαινιάσει στο Καστελόριζο ο πρωθυπουργός. Αθηναϊκό-Μακεδονικό Πρακτορείο ειδήσεων. Αναρτήθηκε 19 Απριλίου 2019 από <https://www.amna.gr/ota/article/248649/Duo-nees-monades-afalatosis-egkainiase-o-prothupourgος-sto-Kastelorizo>.

Καλλονιάτη, Α. (2008). Εφαρμογή μονάδας αφαλάτωσης με χρήση αιολικής ενέργειας στο νησί της Πάτμου. Πολυτεχνείο Κρήτης

Καραχάλιος, Π. (2010) «Τεχνολογίες αφαλάτωσης και προοπτικές εφαρμογής στον ελληνικό χώρο», ΕΜΠ Διπλωματική εργασία

Μιχαλόπουλος Βασίλης. (2013). Θερμοδυναμική ανάλυση συστημάτων αντίστροφης ώσμωσης για αφαλάτωση θαλασσινού νερού. Διπλωματική Εργασία. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μπακογιάννη, Δ. (2016). Χωρική κατανομή μονάδων αφαλάτωσης στην Ελλάδα. Διερεύνηση δυνατοτήτων αξιοποίησης της άλμης από τη βιομηχανία.

Τζεν, Ε. (2001). ΚΑΠΕ, «Μέθοδοι Αφαλάτωσης – Συγκριτική Αξιολόγηση και Εφαρμογές στα Νησιά του Αιγαίου»

Υφαντής, Ν. (2011). Σχεδιασμός και λειτουργία μονάδων αφαλάτωσης νερού με αντίστροφη ώσμωση: μελέτες περιπτώσεων (Doctoral dissertation, National Technical University of Athens (NTUA); Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ)).