



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ
ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΕΜΒΑΘΥΝΣΗ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ ΓΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ

υπό
Γεωργίου Τζώρτζη



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση
του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος 2018

© 2018 Τζώρτζης Γεώργιος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32αρ.202παρ 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής: Δρ. Δημήτριος Παντελής (Επιβλέπων)

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής: Δρ. Παναγιώτης Τσιακάρας

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Βασίλης Μποντόζογλου

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Έχοντας πλέον ολοκληρώσει την επίπονη αλλά και ταυτόχρονα δημιουργική και ευχάριστη διπλωματική μου εργασία στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των σπουδών μου στο πανεπιστήμιο Θεσσαλίας στο τμήμα της Πολυτεχνικής σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους ανθρώπους που συνέβαλαν ώστε να γίνει αυτό το έργο πραγματικότητα. Πρώτα απ' όλα, στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Παντελή για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το ενδιαφέρον αυτό θέμα, για την συνεργασία μας και την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης είμαι ευγνώμων και στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής μου εργασίας, Καθηγητές κ. Τσιακάρα Παναγιώτη και κ. Μποντόζογλου Βασίλη. Οφείλω και ένα μεγάλο ευχαριστώ στην εταιρεία WET Α.Ε για τις πολύτιμες πληροφορίες και τον εξοπλισμό που μου παρείχε έτσι ώστε να κατανοήσω όσο καλύτερα γίνεται το αντικείμενο της εργασίας μου. Κλείνοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αδερφό μου Δημήτρη, τους γονείς μου Νικόλαο και Κανέλλα για την οικονομική και ηθική στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου , καθώς και το κουράγιο που μου έδωσαν όντας δίπλα μου στις δυσκολίες που πέρασα τα τελευταία δύο χρόνια, έτσι ώστε να προχωρήσω, να σταθώ δυνατός και να τελειώσω με την σχολή μου και να κάνω τα όνειρα μου πραγματικότητα. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου για την ενθάρρυνση και τις συμβουλές τους.

Με βαθιά εκτίμηση προς όλους τους παραπάνω,

Τζώρτζης Γεώργιος

Βόλος, Μάιος 2018

*Στην γιαγιά μου
που έφυγε πριν
χρόνια....*

ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΕΜΒΑΘΥΝΣΗ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ ΓΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΤΖΩΡΤΖΗΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2018

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Δημήτριος Παντελής , Αναπληρωτής
Καθηγητής

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας με τίτλο «Τεχνοοικονομική μελέτη των μεθόδων αφαλάτωσης με εμβάθυνση στη χρήση μεμβρανών για αντίστροφη ώσμωση» είναι η περιγραφή των σημαντικότερων μεθόδων αφαλάτωσης με χρήσης οικονομικών δεδομένων καθώς και η εμβάθυνση πάνω στην αντίστροφη ώσμωση και στις μεμβράνες .Ο στόχος αυτής είναι η διερεύνηση των εμπορικών μεθόδων αφαλάτωσης που χρησιμοποιούνται σήμερα καθώς και τα κόστη που προκύπτουν βασισμένα σε βιβλιογραφικά δεδομένα και τέλος η εμβάθυνση στις μεμβράνες της αντίστροφης ώσμωσης στα χαρακτηριστικά τους και την λειτουργία τους. Αρχικά στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται λεπτομερή αναφορά στη σημασία του νερού καθώς και στο πρόβλημα της έλλειψής του σε όλο τον κόσμο και στους τρόπους αντιμετώπισης του προβλήματος όπως είναι η αφαλάτωση. Στη συνέχεια στο 2^ο ,3^ο κεφάλαιο γίνεται λεπτομερή περιγραφή των σημαντικότερων τεχνολογιών αφαλάτωσης και των τεχνικών χαρακτηριστικών που τις διέπουν καθώς και τα κόστη εγκατάστασης ,λειτουργίας και παραγωγής ανά τεχνολογία. Τέλος στο 4^ο κεφάλαιο θα δούμε αναλυτικά την μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης την χρήση των μεμβρανών και τα χαρακτηριστικά αυτών.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Ευχαριστίες	III
Περίληψη	IV
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	VIII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	IX
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	X
Κεφάλαιο 1.....	1
Η σπουδαιότητα του νερού και η έλλειψη του ως μείζον πρόβλημα παγκοσμίως.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Αιτίες έλλειψης του νερού	3
1.3 Η χρήση του νερού.....	4
1.4 Η κατάσταση των υδάτινων πόρων παγκοσμίως	5
1.5 Η κατάσταση των υδάτινων πόρων στην Ελλάδα	7
1.5.1 Η κατάσταση στα ελληνικά νησιά.....	8
1.5.2 Μεταφορά νερού στα ελληνικά νησιά	8
1.6 Το πόσιμο νερό	11
1.6.1 Κριτήρια πόσιμου νερού	12
1.7 Μέθοδοι αντιμετώπισης της λειψυδρίας	14
Κεφάλαιο 2.....	15
Ιστορική αναδρομή και κύριες μέθοδοι αφαλάτωσης.....	15
2.1 Τι είναι αφαλάτωση.....	15
2.2 Ιστορική αναδρομή της αφαλάτωσης.....	17
2.3 Κύριες μέθοδοι αφαλάτωσης και επεξεργασίας νερού.	20
2.3.1 Διεργασίες αφαλάτωσης.....	20
2.3.2 Θερμικές Διεργασίες	21
2.3.2.1 Ακαριαία απόσταξη πολλαπλών βαθμίδων ή πολυβάθμια εκτόνωση (multi stage flashing, MSF)	21
2.3.2.2 Η Απόσταξη πολλαπλής επίδρασης ή πολυβάθμια εξάτμιση (multipe effect distillation, MED)	23
2.3.2.3 Απόσταξη με συμπίεση ατμών (vapor compression distillation, VC)	26
2.3.2.4 Ηλιακή απόσταξη (solar distillation).....	28
2.3.3 Διεργασίες μεμβρανών.....	29
2.3.3.1 Αντίστροφη ώσμωση (reserve osmosis, RO).....	30

2.3.3.2 Ηλεκτροδιάλυση (electrodialysis –ED)	36
2.3.4 Άλλες διεργασίες	38
2.3.4.1 Απόσταξη μεμβράνης (membrane distillation,MD)	38
2.3.4.2 Μέθοδος ανταλλαγής ιόντων(ion-exchange)	39
2.3.4.3 Μέθοδος διαχωρισμού με ψύξη (freeze separation)	41
2.3.5 Υβριδικές μέθοδοι	42
2.4 Συμπεράσματα.....	43
Κεφάλαιο 3.....	45
Σύγκριση των μεθόδων αφαλάτωσης με χρήση οικονομικών δεδομένων και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	45
3.1 Ιστορική περιγραφή της εξέλιξης του κόστους στις μονάδες αφαλάτωσης.....	45
3.2 Παγκόσμια «ικανότητα» αφαλάτωσης και τάσεις.....	47
3.3 Κριτήρια επιλογής μεθόδων	50
3.4 Ενεργειακές πηγές αφαλάτωσης και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ...	52
3.5 Κατανάλωση ενέργειας των κυριότερων διεργασιών αφαλάτωσης.....	54
3.6 Οικονομική ανάλυση διεργασιών αφαλάτωσης.....	56
3.6.1 Παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος αφαλάτωσης.....	56
3.6.2 Κόστος αφαλάτωσης.....	57
3.6.3 Γενικά στοιχεία κόστους αντίστροφης ώσμωσης	67
3.6.3.1 Εργοστάσια που χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό.....	69
3.6.3.2 Εργοστάσια που χρησιμοποιούν υφάλμυρο νερό	71
3.7 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις αφαλάτωσης.....	72
3.7.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις αντίστροφης ώσμωσης	74
Κεφάλαιο 4.....	76
Αντίστροφη ώσμωση με εμβάθυνση στις μεμβράνες	76
4.1 Εισαγωγή.....	76
4.2 Αρχή λειτουργίας ώσμωσης.....	77
4.2.1 Ωσμωτική πίεση	80
4.3 Αρχή λειτουργίας αντίστροφης ώσμωσης.....	82
4.3.1 Περιγραφή της διεργασίας αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση.	83
4.3.2 Απόρριψη του υπολείμματος (άλμης)	86
4.4 Μεμβράνες	88

4.4.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη των διεργασιών με μεμβράνες	92
4.4.2 Υλικά παραγωγής πολυμερικών μεμβρανών.....	94
4.4.3 Τρόποι λειτουργίας των στοιχείων μεμβρανών.....	98
4.4.4 Στοιχεία μεμβρανών	99
4.4.5 Παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία των μεμβρανών	106
Βιβλιογραφία	108

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Ποσότητες νερού που μεταφέρθηκαν από το 1997 έως το 2010 και κόστη αυτών στις Κυκλάδες και στα Δωδεκάνησα,(* περιλαμβάνει περίοδο από 1-1-2010 μέχρι 30-09-2010)	9
Πίνακας 1.2: Κόσμη νερού σε ευρώ/m ³ από 1997 έως 2010 για τις Κυκλάδες και τα Δωδεκάνησα.....	9
Πίνακας 1.3: Κατηγοριοποίηση του πόσιμου νερού ως προς τη σκληρότητα του	12
Πίνακας 1.4: Προδιαγραφές πόσιμου νερού με βάση τα πρότυπα του παγκόσμιου οργανισμού υγείας(WHO).....	13
Πίνακας 2.1: Τυπική απόδοση συστημάτων ανάκτησης ενέργειας.....	32
Πίνακας 3.1: Τυπικές μέγιστες τιμές εύρους παραγωγής νερού ανά διεργασία	51
Πίνακας 3.2: Απεικόνιση των απαιτήσεων σε ενέργεια των κύριων μεθόδων αφαλάτωσης	55
Πίνακας 3.3: Απεικόνιση εκτίμησης κόστους των χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται στη θερμική αφαλάτωση και στην αφαλάτωση μεμβράνης	61
Πίνακας 3.4: Τα επιμέρους κόσμη των κυριότερων διεργασιών αφαλάτωσης	64
Πίνακας 3.5: Κόσμος παραγωγής νερού αφαλάτωσης για κάθε τεχνολογία..	65
Πίνακας 3.6: Σύγκριση κόστους μεταξύ ενός εργοστασίου που χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό και ενός που χρησιμοποιεί υφάλμυρο νερό.....	68
Πίνακας 3.7: Σύγκριση κόστους μεταξύ εργοστασίων που χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό.....	69
Πίνακας 3.8: Κυριότεροι εκπεμπόμενοι ρύποι ανά μέθοδο αφαλάτωσης	73
Πίνακας 3.9: Απεικόνιση χημικής σύστασης του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας και της άλμης που απορρίπτεται καθώς και των πρόσθετων χημικών στοιχείων κατά το στάδιο της προ-επεξεργασίας αντίστοιχα	75
Πίνακας 4.1: Απεικόνιση του εύρους επεξεργασίας μεμβρανών και «είδος» σωματιδίων απομάκρυνσης.....	91
Πίνακας 4.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά μεμβράνης τύπου SW30HR-380	96
Πίνακας 4.3: Γενικά χαρακτηριστικά μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης αρωματικά πολυαμίδια, εστέρες κυτταρίνης.....	97
Πίνακας 4.4: Συγκριτικός πίνακας των στοιχείων μεμβρανών	99

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Ο υδρολογικός κύκλος του νερού	1
Εικόνα 1.2: Παγκόσμια κατανομή απεικονίζει την έλλειψη νερού το 1995 και την πρόβλεψη για το 2025.....	2
Εικόνα 1.3: Παγκόσμιος χάρτης που απεικονίζει την φυσική και οικονομική έλλειψη νερού	6
Εικόνα 1.4: Ποσότητες νερού σε κυβικά μέτρα που μεταφέρθηκαν με υδροφόρα στα άνυδρα νησιά το 2016.....	10
Εικόνα 1.5: Ποσότητες νερού που μεταφέρθηκαν με υδροφόρα στο Καστελόριζο από το 2012 έως 2016 και κόστος σε ευρώ	10
Εικόνα 1.6: Το νερό το πολυτιμότερο αγαθό που υπάρχει στη φύση	11
Εικόνα 2.1: Μονάδα αφαλάτωσης στον κόλπο του Rupert, στο νησί της αγίας Ελένης στο Καναδά περί το 1901.....	19
Εικόνα 2.2: Μονάδα αφαλάτωσης με χρήση της τεχνολογίας (MSF) στο Ντουμπάι.....	22
Εικόνα 2.3: Μονάδα αφαλάτωσης με χρήση της τεχνολογίας (MED).....	25
Εικόνα 2.4: Εγκατάσταση αφαλάτωσης με την μέθοδο της απόσταξης με συμπίεση ατμών με δυνατότητα παραγωγής πόσιμου νερού 6000 gallons / ώρα.....	27
Εικόνα 4.1: Απεικόνιση διάταξης μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης θαλασσινού νερού SWRO.....	76
Εικόνα 4.2: Αντλία υψηλής πίεσης κατάλληλη για αντίστροφη ώσμωση	84
Εικόνα 4.3: Εργοστάσιο αντίστροφης ώσμωσης RO στη Μάλτα με ικανότητα παραγωγής 24,000 m ³ /ημέρα.....	86
Εικόνα 4.4: Εγκάρσια τομή στοιχείου σπειροειδούς περιέλιξης	100
Εικόνα 4.5: Εγκάρσια τομή κοίλης ίνας στοιχείου κοίλων ινών.....	101

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Τυπική απεικόνιση μονάδας αφαλάτωσης.....	16
Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου πολυβάθμιας εκτόνωσης(MSF) σε τέσσερις βαθμίδες	21
Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση της διεργασίας πολυβάθμιας εξάτμισης(MED) σε τρεις βαθμίδες.....	24
Σχήμα 2.4: Απεικόνιση της διαδικασίας της απόσταξης με συμπίεση ατμών(VC)	26
Σχήμα 2.5: Απεικόνιση της διεργασίας με ηλιακή απόσταξη	28
Σχήμα 2.6: Περιγραφή της αντιστροφής ώσμωσης με εφαρμογή πίεσης μεγαλύτερης της ωσμωτικής ώστε να κινηθεί το διάλυμα διαμέσου της μεμβράνης	31
Σχήμα 2.7: Αναλυτική περιγραφή των μερών της μεμβράνη αντιστροφής ώσμωσης τύπου σπειροειδής μεμβράνης(spiral wound)	31
Σχήμα 2.8: Αναλυτική περιγραφή των μερών της μεμβράνη αντιστροφής ώσμωσης τύπου κοίλων ινών (hollow fine fibre)	32
Σχήμα 2.9: Λειτουργία συστήματος αφαλάτωσης αντιστροφής ώσμωσης με στροβίλο τύπου Pelton	33
Σχήμα 2.10: Περιγραφή της εσωτερικής δομής του εναλλάκτη πίεσης (PX).....	33
Σχήμα 2.11: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας της αντλίας Clark.....	34
Σχήμα 2.12: Σχηματική περιγραφή της διεργασίας της ηλεκτροδιάλυσης α)	36
Σχήμα 2.13: Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτροδιάλυσης β)	37
Σχήμα 2.14: Βασική Αρχή της MD διεργασίας και απεικόνιση τυπικού συστήματος απόσταξης μεμβράνης MD.....	39
Σχήμα 2.15: Απεικόνιση ανταλλαγής ιόντων κατά την διεργασία ion-exchange	40
Σχήμα 2.16: Αναλυτική απεικόνιση της μεθόδου διαχωρισμού με ψύξη (freeze separation)	42
Σχήμα 2.17: Παγκόσμια κατανομή μονάδων αφαλάτωσης ανά ηπείρους.....	44
Σχήμα 3.1: Τάσεις του κόστους για τις διεργασίες MSF και SWRO	46
Σχήμα 3.2: Απεικόνιση συνολικής «ικανότητας» παραγωγής των μονάδων αφαλάτωσης ανά τεχνολογία (MSF, MED, RO)ανά έτος	47
Σχήμα 3.3: Παγκόσμια δυναμικότητα αφαλάτωσης ανά διεργασία και είδος νερού επεξεργασίας για την RO.....	48
Σχήμα 3.4: Μερίδιο αγοράς αφαλάτωσης 2007 – 2016.....	49

Σχήμα 3.5: Λόγος απόδοσης για διεργασίες αφαλάτωσης MSF, MED, VC, RO	51
Σχήμα 3.6: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τεχνολογίες αφαλάτωσης	53
Σχήμα 3.7: Ετήσιες κεφαλαιουχικές δαπάνες ανά διεργασία αφαλάτωσης στον κόσμο (2007-2016)	59
Σχήμα 3.8: Σχηματική απεικόνιση του λειτουργικού κόστους των κυριότερων διεργασιών αφαλάτωσης.....	62
Σχήμα 3.9: Απεικόνιση παγκόσμιας παραγωγικής ικανότητας από το 2007 έως το 2016 σε σύγκριση με το συνολικό λειτουργικό κόστος και το κόστος κεφαλαίου των νεοσύστατων εγκαταστάσεων.....	66
Σχήμα 3.10: Αφαλάτωση θαλασσινού νερού: Καταμερισμός κόστους.....	70
Σχήμα 4.1: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της ώσμωσης μεταξύ: α) διαλύματος και διαλύτη και β) διαλυμάτων διαφορετικών συγκεντρώσεων.	79
Σχήμα 4.2: Για να μη συμβεί ώσμωση μπορούμε να ασκήσουμε εξωτερική πίεση (Ρεξ) ίση με την ωσμωτική, δηλ. $P_{εξ} = \Pi$	81
Σχήμα 4.3: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου (α) της ώσμωσης και (β) της αντιστροφής ώσμωσης	82
Σχήμα 4.4: Απεικόνιση λειτουργίας μονάδας αφαλάτωσης με τη μέθοδο της αντιστροφής ώσμωσης.....	83
Σχήμα 4.5: Σχηματική απεικόνιση ενός διαφασικού συστήματος διαχωριζόμενου από μεμβράνη	89
Σχήμα 4.6: Τρόποι λειτουργίας στοιχείων μεμβρανών: α) διήθηση εφαπτομενικής ροής και β) κατά μέτωπο διήθηση.....	98
Σχήμα 4.7: Στοιχεία μεμβρανών: α) σπειροειδούς διαμόρφωσης και β) κοίλων ινών	101
Σχήμα 4.8: Κύρια είδη μεμβρανών. Πάνω: Συμμετρικές μεμβράνες και Κάτω: Ασύμμετρες μεμβράνες.....	105
Σχήμα 4.9: Η επίδραση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη αλάτων	106

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

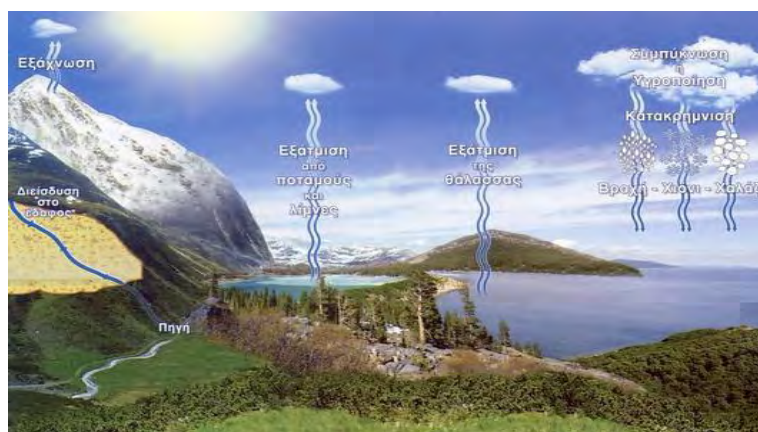
Η ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ Η ΕΛΛΕΙΨΗ ΤΟΥ ΩΣ ΜΕΙΖΟΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΠΑΓΚΟΣΜΙΩΣ

1.1 Εισαγωγή

Το νερό, “ο λευκός χρυσός” όπως ονομάζεται, είναι το πιο πολύτιμο αγαθό που διαθέτουμε μιας και αποτελεί πηγή ζωής για τον πλανήτη και τους κατοίκους του. Χωρίς αυτό δεν υπάρχει ζωή ! Είναι απαραίτητο σε όλες τις μορφές ζωής καθώς όλοι οι οργανισμοί αποτελούνται κυρίως από νερό. Οι άνθρωποι και τα ζώα έχουν στον οργανισμό τους 55% έως 80% νερό, ενώ τα κύτταρα περιέχουν έως και 90%.

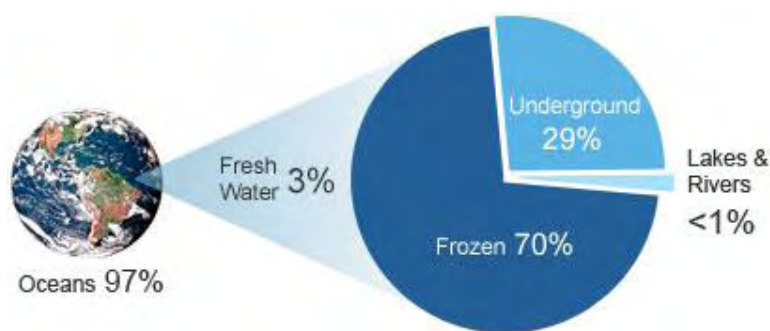
Το νερό συναντάται στις τρεις καταστάσεις της ύλης στη γη: Στερεή (πάγος, χιόνι), υγρή (νερό πηγών, ποταμών, θαλασσών) και αέρια (υδρατμοί στην ατμόσφαιρα). Το νερό στη Γη κινείται συνέχεια μέσω του «κύκλου του νερού» (Εικόνα 1.1). Καθώς το αλμυρό νερό των ωκεανών εξατμίζεται, το αλάτι αφήνεται πίσω και το νερό μετακινείται στην ατμόσφαιρα. Έτσι, το νερό στα σύννεφα που τελικά πέφτει ως βροχή είναι γλυκό νερό.

Ως γνωστό, οι υδάτινοι πόροι αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη κάθε είδους οικονομικής δραστηριότητας και έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες, τόσο για την εκδήλωση της ίδιας της ζωής, όσο και για την επιβίωση του ανθρώπου. Ωστόσο η ανάπτυξη νέων δραστηριοτήτων, η ανάγκη αύξησης της παραγωγικότητας, καθώς και η ανύψωση του βιοτικού επιπέδου μιας χώρας συνεπάγονται την ολοένα και μεγαλύτερη οικιακή και βιομηχανική χρήση του. Όσο πολύτιμο όμως, παρουσιάζεται το νερό, τόσο δύσκολη φαίνεται πλέον πως είναι και η πρόσβαση των ανθρώπων σε αυτό, τουλάχιστον στην πόσιμη μορφή του.



Εικόνα 1.1: Ο υδρολογικός κύκλος του νερού

Ο άνθρωπος στην ιστορική του διαδρομή επέλεξε περιοχές κοντά σε ποτάμια, λίμνες και θάλασσες για να κατοικήσει και να ιδρύσει πόλεις με έντονη εμπορική δραστηριότητα και με οικονομική και πολιτιστική ανάπτυξη. Ο πλανήτης μας καλύπτεται κατά ένα μεγάλο μέρος από νερό, αλλά μόνο το 3% είναι πόσιμο ή γλυκό, ενώ το υπόλοιπο 97% αποτελείται από νερό των θαλασσών και των ωκεανών (Εικόνα 1.2). Από το 3% του γλυκού νερού περίπου το 70% είναι δεσμευμένο στους παγετώνες, το 29% είναι υπόγειο νερό και μόνο το 1-2% είναι επιφανειακό νερό διαθέσιμο για άμεση χρήση. Τα παγκόσμια αποθέματα νερού συνεχώς μειώνονται και η δυνατότητα εύρεσης νέων πηγών νερού έχει περιοριστεί. Η λειψυδρία έχει ως αποτέλεσμα μεγάλο μέρος του πληθυσμού να μην έχει πρόσβαση σε πόσιμο νερό.



Εικόνα 1.2: Παγκόσμια κατανομή του νερού στον πλανήτη

Υπολογίζεται ότι περίπου 1,8 δισεκατομμύρια άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση σε καθαρό νερό και είναι εκτεθειμένοι σε ασθένειες και μολύνσεις που οδηγούν στο θάνατο. Ο πληθυσμός του λεγόμενου τρίτου κόσμου πλήττεται περισσότερο και υπολογίζεται ότι περίπου 3.900 παιδιά πεθαίνουν καθημερινά από ασθένειες που οφείλονται στην έλλειψη φρέσκου νερού. Πολλές περιοχές του πλανήτη θεωρούνται ως άγονες, λόγω των ελάχιστων βροχοπτώσεων και των κλιματικών συνθηκών που επικρατούν εκεί και ταλαιπωρούνται από προβλήματα λειψυδρίας. Μεγαλύτερο πρόβλημα παρουσιάζεται στις παράκτιες περιοχές, καθώς υπολογίζεται ότι υπάρχουν 33.000 km άγονων ακτών, κυρίως στην Αφρική, τον Ινδικό Ωκεανό και την Αραβική χερσόνησο. Μεγάλες εκτάσεις γης απειλούνται με ερημοποίηση, μερικές από τις οποίες βρίσκονται στη Μεσόγειο και περιλαμβάνουν περιοχές της Ελλάδας όπως είναι η Κρήτη, οι Κυκλάδες και τα Δωδεκάνησα. Παγκοσμίως υπάρχουν περίπου 260 κύρια ποτάμια, που τροφοδοτούν με φρέσκο νερό πολλές χώρες, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται διαμάχες για τον έλεγχο των υδάτινων αποθεμάτων. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα των ποταμών Τίγρη και Ευφράτη, που παρέχουν φρέσκο νερό στην Τουρκία, τη Συρία και το Ιράκ.

1.2 Αιτίες έλλειψης του νερού

- Η υπερθέρμανση του πλανήτη θεωρείται ένας παράγοντας που ευθύνεται για την έλλειψη νερού. Η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη προκαλεί αύξηση των βροχοπτώσεων και μείωση των χιονοπτώσεων, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ποσότητα νερού που παραμένει στις ορεινές περιοχές με τη μορφή χιονιού ή πάγου, που αποδίδεται κατά τους θερινούς μήνες και τις περιόδους ξηρασίας[2].
- Η εκρηκτική αύξηση του πληθυσμού σε συνδυασμό με τη γενικότερη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, κυρίως στις ανεπτυγμένες χώρες, οδηγεί σε αύξηση της ζήτησης. Προβλέψεις που έγιναν μετά από σχετικές στατιστικές μελέτες δείχνουν ότι ο παγκόσμιος πληθυσμός θα σταθεροποιηθεί στα 8,5 - 9 δισεκατομμύρια έως το 2050 [2].
- Η γεωργία, καταναλώνει το 80-85% των διαθέσιμων υδατικών πόρων και αναπτύσσεται συνεχώς για να μπορέσει να καλύψει τις αυξανόμενες ανάγκες του πληθυσμού, ενώ η αλόγιστη χρήση φυτοφαρμάκων και χημικών λιπασμάτων που παρασύρονται από το νερό της βροχής, ρυπαίνουν τόσο τα επιφανειακά νερά όσο και τα υπόγεια αποθέματα, αποτελώντας ένα ακόμα επιβαρυντικό παράγοντα που προκαλεί λειψυδρία[2].
- Η μεγάλη αύξηση της βιομηχανικής παραγωγής, η οποία προσπαθεί να καλύψει τις συνεχώς αυξανόμενες καταναλωτικές ανάγκες, που οφείλονται στην αύξηση του βιοτικού επιπέδου των ανθρώπων κυρίως στις οικονομικά ανεπτυγμένες χώρες. Η συγκέντρωση μεγάλου πληθυσμού στις πόλεις, δημιουργεί τεράστιες καταναλώσεις νερού σε τοπική κλίμακα, ενώ στις μεγάλες πόλεις μεγάλες ποσότητες επιφανειακών υδάτων εκτρέπονται και τελικά οδηγούνται στη θάλασσα ανεκμετάλλευτα μη επιτρέποντας στη γη να τα απορροφήσει.
- Η κακή διαχείριση των υδατικών πόρων και η έλλειψη στρατηγικού σχεδιασμού, που περιλαμβάνει την κατασκευή έργων υποδομής, την αντικατάσταση ή συντήρηση των δικτύων και γενικότερα τη διαχείριση της ζήτησης, είναι παράγοντες που διογκώνουν το πρόβλημα[2].
- Η σπατάλη του νερού που οφείλεται κυρίως στη μη ορθολογική χρήση του στην άρδευση, είναι άλλος ένας παράγοντας που επιδεινώνει το πρόβλημα. Σε παγκόσμιο επίπεδο υπολογίζεται ότι το 80% της αύξησης της ζήτησης τροφής μετά το 1960, καλύφθηκε από γεωργική παραγωγή που βασίζεται στην άρδευση. Η υπεράντληση νερού με γεωτρήσεις προκαλεί την υφαλμύρωση του υδροφόρου ορίζοντα. Επίσης διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες, μπορεί να προκαλέσουν την μόλυνση του[2].

1.3 Η χρήση του νερού

Το νερό χρησιμοποιείται ευρύτατα σε διάφορες δραστηριότητες και σκοπούς, σε ποσότητες που εξαρτώνται από παράγοντες που έχουν σχέση με το γεωγραφικό χώρο, το πολιτιστικό, το κοινωνικό και το οικονομικό επίπεδο των ανθρώπων.

Οι χρήσεις του νερού διακρίνονται στην οικιακή χρήση, στην βιομηχανική χρήση και στην γεωργική χρήση. Η κάθε χρήση απαιτεί νερό διαφορετικής ποιότητας τόσο ως προς την περιεκτικότητα των αλάτων όσο και ως προς τη βιολογική καθαρότητα. Οι προδιαγραφές του νερού είναι διαφορετικές και είναι περισσότερο ή λιγότερο ελαστικές ανάλογα με τη χρήση του. Το νερό παρουσιάζει μεγάλη διαλυτική ικανότητα, καθώς διαλύει στερεά, υγρά και αέρια συστατικά με μεγάλη ευκολία. Τα φυσικά νερά των πηγών, των ποταμών και των λιμνών έχουν πολύ χαμηλή περιεκτικότητα αλάτων, ενώ στο θαλασσινό νερό η περιεκτικότητα των αλάτων είναι μεγαλύτερη, κυρίως σε χλωριούχο νάτριο το οποίο του προσδίδει την αλμυρότητα.

Ένας τρόπος κατάταξης του είδους του νερού μπορεί να γίνει με την ποσότητα της πάσης φύσεως διαλυμένων στερεών ουσιών (total dissolved solids, TDS) και μετράται ως μέρη στο εκατομμύριο (part per million, ppm). Σύμφωνα λοιπόν με την περιεκτικότητα σε ολικά διαλυτά στερεά (άλατα) TDS το νερό μπορεί να διαχωριστεί σε διάφορες κατηγορίες[3]:

- ✚ **Πόσιμο νερό (potable water)** με TDS < 500ppm
- ✚ **Ελαφρά υφάλμυρο νερό**, με 1,000 ppm TDS μπορεί να είναι και πόσιμο σύμφωνα με τις σχετικές οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και την σχετική Ελληνική νομοθεσία
- ✚ **Αλμυρό νερό** με $1,000 < \text{TDS} < 2,000 \text{ppm}$ το οποίο μόνο σε ακραίες περιπτώσεις γίνεται αποδεκτό για οικιακή χρήση
- ✚ **Υφάλμυρο νερό ή γλυφό νερό (brackish water)**, μη πόσιμο και συνήθως ακατάλληλο για καλλιέργειες $2,000 < \text{TDS} < 10,000 \text{ppm}$
- ✚ **Πολύ αλμυρό νερό** με $\text{TDS} > 10,000 \text{ppm}$ (heavily brackish/ Seawater)
- ✚ **Θαλασσινό νερό (sea water)**, $30,000 < \text{TDS} < 42,000 \text{ppm}$

1.4 Η κατάσταση των υδάτινων πόρων παγκοσμίως

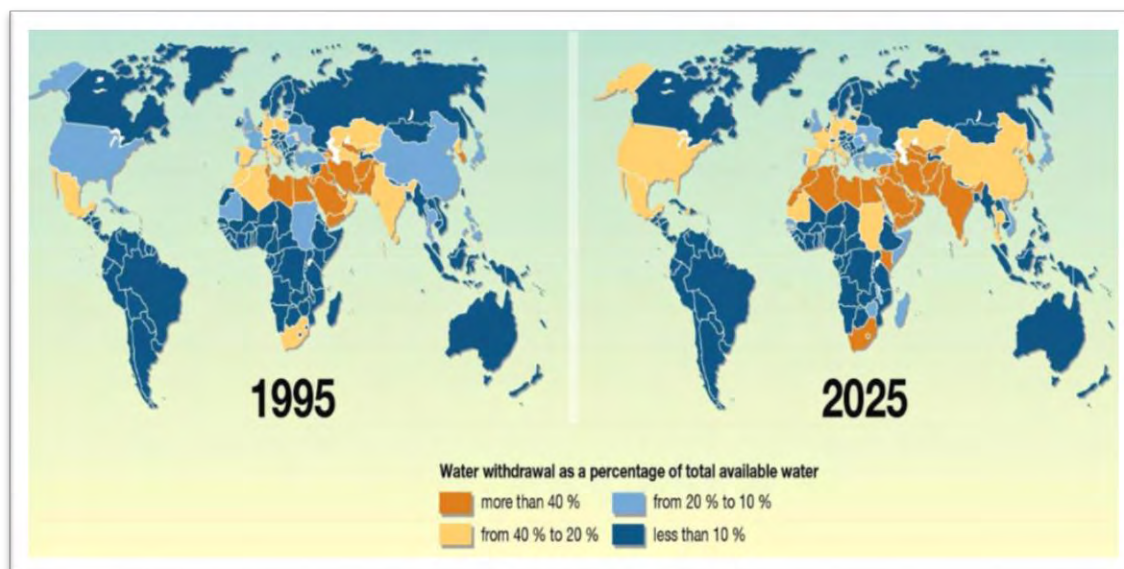
Η έλλειψη νερού είναι παγκόσμιο φαινόμενο και συνιστά ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα του πλανήτη. Οι διεθνείς οργανισμοί πολλές φορές το χρόνο επισημαίνουν με καμπάνιες τη χρησιμότητά του. Παράλληλα εκπέμπουν σήμα κινδύνου υπογραμμίζοντας ότι το πόσιμο νερό δεν είναι ανεξάντλητο, εφόσον η ανανέωση των αποθεμάτων γίνεται με πιο βραδύ ρυθμό σε σχέση με την κατανάλωσή του. Για αυτό επισημαίνουν πως εάν δεν γίνουν οι αναγκαίες παρεμβάσεις, τότε το αργότερο μέσα σε δύο γενιές η πλειοψηφία των εννέα δισεκατομμυρίων κατοίκων του πλανήτη θα ζει με σοβαρές ελλείψεις γλυκού νερού.

Τα στοιχεία της UNESCO για την έλλειψη του πολύτιμου αγαθού είναι απογοητευτικά. Υπολογίζεται ότι η κατανάλωση του νερού στη βιομηχανία θα διπλασιαστεί. Σύμφωνα με αυτά προβλέπεται ότι η έλλειψή του θα αναχθεί σε μείζον γεωπολιτικό θέμα, καθώς μέχρι το 2050, ο παγκόσμιος πληθυσμός θα έχει ξεπεράσει τα 9 δισεκατομμύρια, ενώ η ζήτηση για νερό θα αυξηθεί κατά 64 δις. κυβικά μέτρα ετησίως. Παράλληλα το 2030, περισσότεροι από 5 δις άνθρωποι δεν θα έχουν πρόσβαση σε αξιόπιστο σύστημα καθαρισμού του νερού. Επίσης στις αναπτυσσόμενες χώρες το 80% των ασθενειών συνδέονται με το νερό, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τουλάχιστον 3 εκατομμύρια άνθρωποι να χάνουν τη ζωή τους κάθε χρόνο εξαιτίας της κακής ποιότητας πόσιμου νερού που καταναλώνουν.

Οι αλλαγές στο κλίμα είναι αισθητές και ικανές να μας αναδείξουν το πρόβλημα καθώς οι λιγότερες βροχές και οι περισσότερες θερμές μέρες έχουν ως συνέπεια τη μείωση στις στάθμες των λιμνών και των ποταμών παγκοσμίως. Ένας σημαντικός παράγοντας ακόμα είναι η ανισοκατανομή των υδάτινων πόρων. Για παράδειγμα, η Λατινική Αμερική διαθέτει 12 φορές περισσότερο πόσιμο νερό από τη νότια Ασία. Στη Βραζιλία και τον Καναδά υπάρχει πλεόνασμα στα αποθέματα νερού, ενώ οι χώρες που βρίσκονται στη βόρεια Αφρική και τη Μέση Ανατολή αντιμετωπίζουν προβλήματα, καθώς τα αποθέματα δεν φτάνουν να καλύψουν τις ανάγκες του πληθυσμού. Στη Μέση Ανατολή υπάρχει μόλις το 1 % του γλυκού νερού του κόσμου, για να το μοιραστεί εκεί το 5% του παγκόσμιου πληθυσμού. Η Κίνα η οποία φιλοξενεί σχεδόν το 22% του παγκόσμιου πληθυσμού, διαθέτει μόλις το 8% των παγκόσμιων αποθεμάτων γλυκού νερού. Έτσι λοιπόν οι χώρες που παραδοσιακά αντιμετωπίζουν πρόβλημα, είναι οι χώρες της Μέσης Ανατολής όπου εκεί ο κύριος λόγος είναι η απουσία υδάτινων πόρων λόγω ξηρότητας του εδάφους και έχει να κάνει με τα φυσικά γεωλογικά στοιχεία των περιοχών αυτών.

Παράλληλα στις αναπτυσσόμενες χώρες το κύριο πρόβλημα συνίσταται στη μόλυνση των διαθέσιμων υδάτων από βιομηχανικές δραστηριότητες. Το 70% των βιομηχανικών αποβλήτων απορρίπτονται χωρίς επεξεργασία σε ποταμούς και λίμνες όπου μολύνουν τον υδροφόρο ορίζοντα. Με στοιχεία του περιβαλλοντικού προγράμματος του ΟΗΕ (UNEP), χύνονται στη Γη ημερησίως 2 εκατομμύρια τόνοι μη επεξεργασμένων βοθρολυμάτων και βιομηχανικών και γεωργικών αποβλήτων, καταστρέφοντας αυτόματα τα υδάτινα συστήματα. Τα βιομηχανικά και αστικά απόβλητα έγιναν αιτία να μολυνθεί ο υδροφόρος ορίζοντας και όλο το οικοσύστημα. Το πρόβλημα αυτό είναι σοβαρότατο αφού ο υδροφόρος ορίζοντας, τα ποτάμια, οι λίμνες και οι θάλασσες αποτελούν συγκοινωνούντα δοχεία.

Από την άλλη στις ήδη αναπτυγμένες περιοχές του πλανήτη η κύρια αιτία έλλειψης είναι η αύξηση του πληθυσμού κάτι το οποίο σε συνδυασμό με την βελτίωση του βιοτικού επιπέδου έχουν ως αποτέλεσμα την υπερκατανάλωση των ήδη ελλειμματικών για την περιοχή υδάτων (Εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.3: Παγκόσμιος χάρτης που απεικονίζει την έλλειψη νερού το 1995 και την πρόβλεψη για το 2025 [1]

Τέλος στον αγροτικό τομέα απαιτούνται μεγάλες ποσότητες νερού, όπως επίσης στους τομείς της ενέργειας και της βιομηχανίας. Ενδεικτικά αναφέρονται παρακάτω κάποια στοιχεία σύμφωνα με διεθνείς μελέτες των Ηνωμένων εθνών, της UNESCO και άλλων οργανισμών. Το νερό που είναι κατάλληλο για χρήση παγκοσμίως, χρησιμοποιείται σύμφωνα με στοιχεία ερευνών κατά 70% για ανάγκες άρδευσης στη γεωργία, το 22% για τη βιομηχανία και το 8% για της ανάγκες ενός νοικοκυριού.

1.5 Η κατάσταση των υδάτινων πόρων στην Ελλάδα

Στον ελλαδικό ηπειρωτικό χώρο το φαινόμενο της λειψυδρίας δεν είναι τόσο έντονο. Συγκεκριμένα σε περιοχές όπου η αγροτική δραστηριότητα είναι έντονη, όπως στο Θεσσαλικό κάμπο, και σε συνδυασμό με τις περιόδους ξηρασίας, δημιουργούνται συχνά προβλήματα έλλειψης. Τα μεγάλα αστικά κέντρα της Ελλάδας αν και δεν έχουν μείνει ανεπηρέαστα από τη συνεχή αύξηση του πληθυσμού τους, εντούτοις δεν αντιμετωπίζουν ιδιαίτερα προβλήματα. Όμως αυτό δεν είναι αρκετό για να πει κανείς ότι υπάρχει επάρκεια καθώς τα αποθέματα μειώνονται. Οι εκτιμήσεις για το ετήσιο υδατικό δυναμικό της χώρας μας ποικίλουν. Σύμφωνα όμως με τη βάση δεδομένων AQUASTAT (Διεθνείς Οργάνωση Τροφίμων και Γεωργίας)[56] οι υδατικοί πόροι της χώρας μας ανέρχονται στα 74,2 δις. κυβικά μέτρα. Από αυτά περίπου το 85,1% του συνολικού υδατικού δυναμικού αποτελείται από επιφανειακά νερά, ενώ το 10,6% είναι υπόγεια νερά. Παρόλα αυτά εμφανίζονται σημαντικά προβλήματα, λόγω της γεωγραφικής ανισοκατανομής του υδάτινου δυναμικού (συγκέντρωση στα δυτικά και βόρεια της χώρας, λειψυδρία στα νησιά) και της ανορθολογικής διαχείρισης του.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τη διαχείριση του, το 86% των συνολικών υδατικών πόρων της χώρας μας χρησιμοποιείται για αγροτική χρήση, περίπου το 11% για αστική χρήση και 3% για βιομηχανική και ενεργειακή χρήση. Τα μεγαλύτερα μερίδια για αγροτική χρήση κατέχουν οι περιοχές της Θεσσαλίας (25,1%), της Ανατολικής Στερεάς (12,5%) και της Κεντρικής Μακεδονίας (10,5%). Για την αστική χρήση, που το μεγαλύτερο ποσοστό της πηγαινει στη ύδρευση, πρωτιά κατέχει η Αττική (37,1%) ζήτηση υπερτριπλάσια της Κεντρικής Μακεδονίας (10,5%). Από την άλλη αρκετά υδατικά διαμερίσματα της χώρας είναι ελλειμματικά κατά τους θερινούς μήνες, λόγω των αυξημένων αναγκών του γεωργικού και του τουριστικού τομέα. Το πρόβλημα αυτό εντοπίζεται κυρίως στα νησιά του Αιγαίου και τη Θεσσαλία.

Επίσης η υπερβολική χρήση πόσιμου νερού προερχόμενου από γεωτρήσεις, αποτελεί κατασπατάληση και υπερεκμετάλλευση πολύτιμων και δύσκολα ανανεώσιμων πόρων. Σύμφωνα με εκτιμήσεις λειτουργούν στη χώρα μας περίπου 300.000 γεωτρήσεις. Αυτή η ανεξέλεγκτη εκμετάλλευση έχει σαν συνέπεια την μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Σημαντικά προβλήματα ποιότητας του πόσιμου νερού δημιουργεί και η ρύπανση των υπόγειων υδάτων με απόβλητα. Τέλος η κατάσταση των υπογείων υδάτων φαίνεται μη αναστρέψιμη, αφού η φυσική απορρύπανση των υπογείων υδάτων βεβαρημένων περιοχών θα απαιτούσε τουλάχιστον μία

20ετία με παύση των γεωτρήσεων και φυσικό εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφόρων.

1.5.1 Η κατάσταση στα ελληνικά νησιά

Στη νησιωτική Ελλάδα όμως τα δεδομένα είναι λίγο διαφορετικά. Αρκετά νησιά είναι άνυδρα και μοιραία αντιμετωπίζουν το πρόβλημα των μειωμένων υδάτινων αποθεμάτων εδώ και αρκετά χρόνια. Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται κυρίως οι Κυκλάδες και τα μικρά νησιά των Δωδεκανήσων, αφού η γεωλογική διαμόρφωση τους σε συνδυασμό με τις μειωμένες υδατοπτώσεις, δεν επιτρέπουν τη δημιουργία υπόγειων φυσικών δεξαμενών. Η κατάσταση εξάλλου οξύνεται ακόμα περισσότερο λόγω της γεωγραφικής απομόνωσης (ακριβή μεταφορά του νερού) και των αυξημένων επισκεπτών κατά τη διάρκεια της τουριστικής περιόδου.

Κάποιες εναλλακτικές λύσεις που εφαρμόστηκαν κατά καιρούς όπως η κατασκευή λιμνοδεξαμενών και φραγμάτων, τις περισσότερες φορές θεωρήθηκαν ανίκανες να λύσουν το πρόβλημα αφού προϋποθέτουν την ύπαρξη ποταμών χειμάρρων ή όμβριων υδάτων τα οποία επίσης λιγοστεύουν. Έτσι η λύση στην οποία καταφεύγει η πολιτεία είναι η μεταφορά νερού με δεξαμενόπλοια προκειμένου να αντιμετωπιστεί η έλλειψη νερού. Με δεδομένο όμως ότι το κόστος της ηλεκτρικής κιλοβατώρας είναι αρκετά υψηλό στα νησιά και σε συνδυασμό με τα ελλείμματα ενέργειας που παρουσιάζονται το καλοκαίρι, είναι γεγονός ότι η έλλειψη πόσιμου νερού αλλά και νερού κατάλληλου για άλλες χρήσεις, όπως στη γεωργία και στις βιομηχανίες, είναι ένα θέμα που απασχολεί όχι μόνο την Ελλάδα και τα νησιά της αλλά σχεδόν όλο τον κόσμο. Αυτός όμως ο τρόπος παροχής νερού επιφέρει μεγάλη οικονομική επιβάρυνση στο κράτος, καθώς υπολογίζεται ότι την περίοδο 2014 έως 2016 η μεταφορά νερού σε άγονα νησιά Δωδεκανήσων και Κυκλάδων κόστισε στο κράτος 71 εκατομμύρια ευρώ. Το υψηλό δε 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].

1.5.2 Μεταφορά νερού στα ελληνικά νησιά

Σήμερα μεταφορά νερού γίνεται σε είκοσι δύο νησιά των Κυκλάδων και των Δωδεκανήσων. Στους παρακάτω (Πίνακες 1.1,1.2) παρουσιάζονται τα επίσημα στοιχεία του Υπουργείου Αιγαίου τόσο για τις μεταφερόμενες ποσότητες νερού όσο και για το κόστος αυτών συνοπτικά.

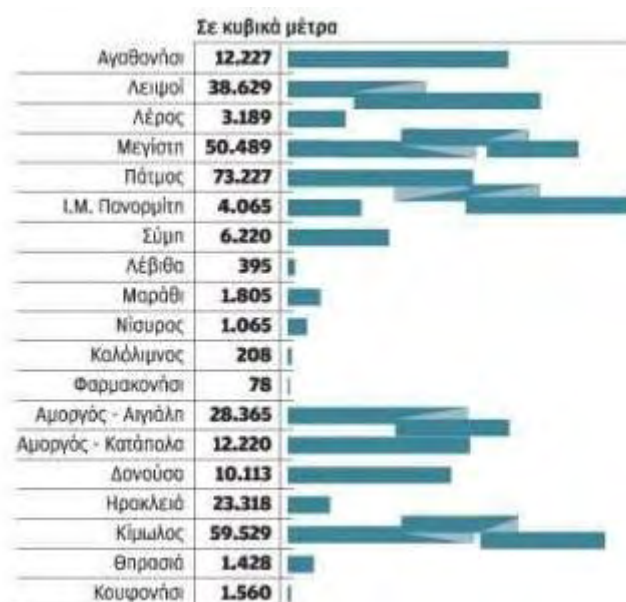
Έτος	ΚΥΚΛΑΔΕΣ		ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ		ΣΥΝΟΛΑ	
	Ποσότητες σε m ³	Κόστος σε ευρώ	Ποσότητες σε m ³	Κόστος σε ευρώ	Ποσότητες σε m ³	Κόστος σε ευρώ
1997	86.525	311.078	402.295	933.802	488.820	1.244.880
1998	91.052	650.755	484.994	1.312.419	576.046	1.963.174
1999	87.760	672.712	461.855	1.407.916	760.472	2.080.628
2000	145.570	1.158.370	555.212	2.004.234	700.782	3.162.604
2001	203.792	1.625.093	621.297	2.722.540	825.089	4.348.633
2002	329.343	2.561.278	617.745	3.109.358	947.088	5.670.637
2003	336.377	2.772.718	605.019	3.214.680	941.796	5.987.398
2004	338.812	2.787.235	759.737	4.034.203	1.098.549	6.821.438
2005	464.562	4.006.916	969.676	5.082.935	1.434.238	9.089.852
2006	567.719	4.677.686	1.005.338	4.905.044	1.573.057	9.582.730
2007	697.117	5.802.509	1.101.628	5.403.900	1.798.745	11.206.409
2008	687.731	5.721.921	1.141.724	5.765.706	1.829.455	11.487.628
2009	429.075	3.569.904	826.910	4.175.895	1.255.985	7.745.799
2010	263.241	2.590.291	340.426	3.349.791	603.667	5.940.083
Σύνολα *	4.728.676	38.908.470	9.893.856	47.472.427	14.230.122	86.331.597

Πίνακας 1.1: Ποσότητες νερού που μεταφέρθηκαν από το 1997 έως το 2010 και κόστη αυτών στις Κυκλάδες και στα Δωδεκάνησα, (περιλαμβάνει περίοδο από 1-1-2010 μέχρι 30-09-2010)*

	ΚΥΚΛΑΔΕΣ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΑ	ΣΥΝΟΛΑ
Έτος	Κόστος σε ευρώ/m ³	Κόστος σε ευρώ/m ³	Κόστος σε ευρώ/m ³
1997	3,60	2,32	2,54
1998	7,15	2,70	3,45
1999	7,67	3,05	2,73
2000	7,96	3,61	4,51
2001	7,97	4,38	5,28
2002	7,78	5,04	5,99
2003	8,23	5,31	6,35
2004	8,23	5,31	6,21
2005	8,63	5,25	6,33
2006	8,24	4,88	6,42
2007	8,32	4,93	6,23
2008	8,32	5,05	6,28
2009	8,32	5,05	6,17
2010	9,83	9,83	9,83

Πίνακας 1.2: Κόστη νερού σε ευρώ/m³ από 1997 έως 2010 για τις Κυκλάδες και τα Δωδεκάνησα

Όπως προκύπτει και από τους παραπάνω πίνακες το κόστος της μεταφοράς του νερού από το 1997 έως το 2010 έχει σχεδόν τετραπλασιαστεί καθώς μάλιστα αυξάνονται οι απαιτήσεις σε ποσότητες νερού χρόνο με το χρόνο. Καθίσταται λοιπόν σαφές πως η μεταφορά νερού αποτελεί μια δαπανηρή λύση στο πρόβλημα έλλειψης νερού. Το πρόβλημα έγκειται στο ότι η κατάσταση αυτή διαιωνίζεται αφού δεν έχει υιοθετηθεί ένα μοντέλο ορθολογισμού, βιωσιμότητας και αειφορίας. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα είναι η περίπτωση του Καστελόριζου όπως φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 1.5). Χρειάζονται μόλις 500.000 ευρώ για την ανακατασκευή της λιμνοδεξαμενής προκειμένου να μην χρειαστεί να ξαναγίνει μεταφορά νερού. Επίσης σε 7 νησιά υπάρχουν μονάδες αφαλάτωσης, οι οποίες έχουν αγοραστεί αλλά δεν έχουν ακόμα εγκατασταθεί: στους Λειψούς, στη Δονούσα, την Κίμωλο, την Αμοργό, την Πάτμο και στη Λέρο. Συνεπώς η λύση της μεταφοράς νερού έχει ουσιαστικά ένα σημαντικό κοινωνικό κόστος και αποτελεί λύση προσωρινού μόνο χαρακτήρα.



Εικόνα 1.4: Ποσότητες νερού σε κυβικά μέτρα που μεταφέρθηκαν με υδροφόρα στα άνυδρα νησιά το 2016



Εικόνα 1.5: Ποσότητες νερού που μεταφέρθηκαν με υδροφόρα στο Καστελόριζο από το 2012 έως το 2016 και κόστος σε ευρώ

1.6 Το πόσιμο νερό

Πόσιμο νερό χαρακτηρίζεται το νερό που είναι καθαρό από φυσική, χημική, βιολογική και μικροβιολογική άποψη και μπορεί να καταναλώνεται χωρίς να κινδυνεύει η υγεία του ανθρώπου. Το πόσιμο νερό πρέπει να είναι άχρωμο, άοσμο, δροσερό και με ευχάριστη γεύση. Δεν πρέπει να έχει μεγάλη σκληρότητα γιατί αυτή προκαλεί δυσκολίες στην καθημερινή αλλά και τη βιομηχανική του χρήση. Επίσης δεν πρέπει να περιέχει μεγάλη ποσότητα οργανικών ουσιών, βαρέων μετάλλων ούτε και παθογόνα παράσιτα ή μικρόβια και η θερμοκρασία του νερού πρέπει να είναι σταθερή στους 10-15 βαθμούς °C (Κελσίου) όπως θα δούμε αναλυτικότερα στην επόμενη υποενότητα.

Το πόσιμο νερό διακρίνεται: Στα επιφανειακά νερά όπου μπορεί να υπάρχουν οργανικές ουσίες που οφείλονται είτε σε γεωργικές δραστηριότητες, είτε σε ρύπανση από βιομηχανικά ή/και αστικά απόβλητα. Στα υπόγεια νερά όπως είναι τα νερά των πηγαδιών, των πηγών και γενικά τα νερά που είναι αποταμιευμένα στο υπέδαφος. Αυτά περιέχουν διάφορα άλατα, το είδος των οποίων εξαρτάται από την ορυκτολογική σύσταση των πετρωμάτων μέσα από τα οποία το ατμοσφαιρικό νερό και το επιφανειακό νερό διηθείται και αποταμιεύεται στους υπόγειους ταμιευτήρες.



Εικόνα 1.6: Το νερό το πολυτιμότερο αγαθό που υπάρχει στη φύση

1.6.1 Κριτήρια πόσιμου νερού

Η ποιότητα του νερού πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις ή τα πρότυπα που έχουν καθοριστεί για συγκεκριμένη χρήση. Υπάρχουν πολλές φυσικές και χημικές παράμετροι, όπως είναι οι παρακάτω:

- ✓ Να είναι διαυγές, άχρωμο, άοσμο, δροσερό (7-11°C), να είναι «καθαρό» από χημική, βιολογική και μικροβιολογική άποψη ώστε να μπορεί να καταναλωθεί από τον άνθρωπο χωρίς κίνδυνο της υγείας του, βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα.
 - ✓ Να εξετάζεται: Φυσικά όσον αφορά (θερμοκρασία, διαύγεια, γεύση, οσμή), χημικά δηλαδή (ποιοτικό και ποσοτικό έλεγχο, σκληρομετρία), μικροσκοπικά (έρευνα για μικροοργανισμούς), βακτηριολογικά (καλλιέργεια των μικροβίων του νερού) και τοπογραφικά (θέση πηγής, διαδρομής του νερού).
- ❖ Να καθορίζεται η ποιότητα του νερού από τις προδιαγραφές που έχουν θεσπιστεί και να εξετάζεται ως προς τα εξής:

1) Οργανοληπτικοί παράμετροι: Αναφέρονται στις φυσιολογικές ιδιότητες του νερού και εκτιμώνται υποκειμενικά όπως είναι η θολρότητα, το χρώμα, η οσμή και η γεύση

2) Φυσικοχημικοί παράμετροι: η θερμοκρασία, το Ph, η αγωγιμότητα στους 20°C, η αλκαλικότητα, τα διαλυμένα στερεά, το διαλυμένο οξυγόνο, το κάλιο, πυρίτιο, ασβέστιο, μαγνήσιο, νάτριο

3) Παράμετροι που αφορούν ανεπιθύμητες ουσίες: όπως είναι οι ενώσεις του αζώτου NH₃, NO₂⁻, NO₃⁻, φωσφόρου, οργανικές ενώσεις, ανόργανες ενώσεις όπως το υδρόθειο, ιχνοστοιχεία (Fe, Mn, Cu, Zn, Ba)

4) Τοξικές παράμετροι: βαρέα μέταλλα (Hg, Cd, Pb, Cr, V, Ni), κυανιούχες ενώσεις και άλλες

5) Σκληρότητα

Σκληρότητα	Μέρη ανά εκατομμύριο (ppm)
Πολύ μαλακό	0 έως 70
μαλακό	70 έως 140
Ημισκληρο	140 έως 210
σκληρό	210 έως 320
Πάρα πολύ σκληρό	320 έως 530

Πίνακας 1.3: Κατηγοριοποίηση του πόσιμου νερού ως προς τη σκληρότητα του

- ❖ Στον παρακάτω (Πίνακα 1.4) παρουσιάζονται οι προδιαγραφές για το πόσιμο νερό του Παγκόσμιου Οργανισμού υγείας (W.H.O)[4]

Συστατικά	Περιεκτικότητα σε mg/l	
	Ανώτατο δεκτό	Ανώτατο επιτρεπτό
Ολικά διαλυμένα άλατα TDS	500	1500
Χλωριούχα Cl	200	600
Θειικά SO ₄ ²⁺	200	400
Ασβέστιο Ca ²⁺	75	100
Μαγνήσιο Mg ²⁺	30	150
Φθοριούχα F ⁻	0.7	1.7
Νιτρικά NO ₃ ⁻	<50	100
Χαλκός Cu ²⁺	0.05	1.5
Σίδηρος Fe ³⁺	0.10	1.0
Χλωριούχο νάτριο NaCl	250	-
pH	7.0 έως 8.5	6.5 έως 9.2

Πίνακας 1.4: Προδιαγραφές πόσιμου νερού με βάση τα πρότυπα του παγκόσμιου οργανισμού υγείας(WHO)[4]

1.7 Μέθοδοι αντιμετώπισης της λειψυδρίας

Τα αποθέματα του νερού δεν είναι πια ανεξάντλητα, όπως όλοι πιστεύαμε μέχρι σήμερα. Αντίθετα μάλιστα, περιορίζονται σημαντικά χρόνο με τον χρόνο επηρεάζοντας έτσι τον τρόπο ζωής μας. Επιτακτική ανάγκη αποτελεί λοιπόν για την διατήρηση των αποθεμάτων νερού σε τοπική και παγκόσμια κλίμακα είναι απαραίτητο να εφαρμοσθούν σύγχρονες στρατηγικές διαχείρισης, που περιλαμβάνουν:

- Καθαρισμό και επαναχρησιμοποίηση αστικών λυμάτων
- Βελτίωση της απόδοσης των τεχνολογιών άρδευσης
- Εξοικονόμηση νερού στις βιομηχανικές εφαρμογές
- Περιορισμό της σπατάλης σε οικιακό επίπεδο
- Μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου

Παράλληλα όμως με τις προσπάθειες στο πλαίσιο της διατήρησης των αποθεμάτων, είναι πολύ σημαντικό να επικεντρωθεί το ενδιαφέρον και σε ένα άλλο επίπεδο, αυτό της ενίσχυσης των αποθεμάτων φρέσκου νερού. Μια τεχνολογικά, αλλά και οικονομικά, εφικτή και βιώσιμη λύση στο πλαίσιο αυτό, αποτελεί η **αφαλάτωση** θαλασσινού αλλά και υφάλμυρου νερού ως αντίδοτο στην εκτεταμένη ανομβρία και στο πρόβλημα της λειψυδρίας σε παγκόσμιο επίπεδο. Αρκετές χώρες ανά τον κόσμο όπως η Ινδία και η Κίνα, λόγω ραγδαίας πληθυσμιακής αύξησης και αναπτυσσόμενης βιομηχανίας, έχουν ξεκινήσει να επενδύουν σε μονάδες αφαλάτωσης για την παραγωγή πόσιμου νερού. Αλλά και χώρες της Μεσογείου (Μάλτα, Ισπανία) καθώς και η Σαουδική Αραβία καλύπτουν πολύ μεγάλο μέρος των αναγκών τους σε νερό από την χρήση των μονάδων αφαλάτωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

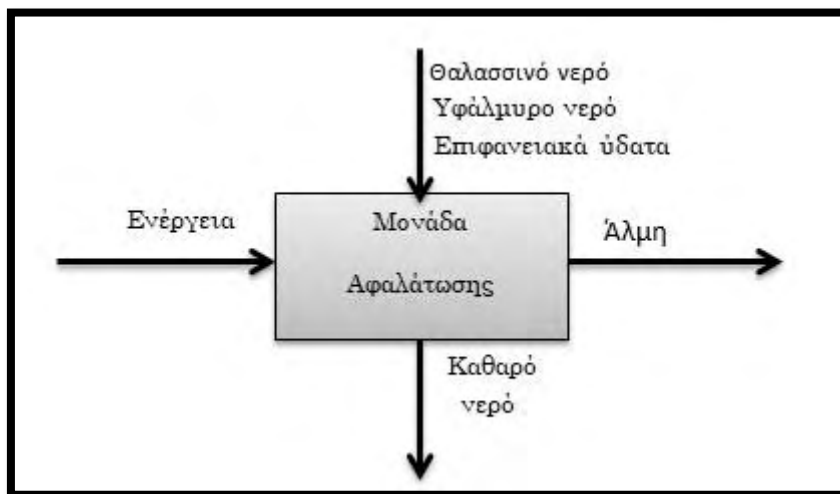
ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΚΑΙ ΚΥΡΙΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

2.1 Τι είναι αφαλάτωση

Αφαλάτωση ονομάζεται η διεργασία αφαίρεσης αλάτων από μια αλατούχα ουσία και κυρίως από υδατικά αλατούχα ύδατα. Στην ουσία η αφαλάτωση είναι μια μέθοδος ανάκτησης πόσιμου νερού από θαλασσινό νερό, υφάλμυρα ποτάμια και λίμνες. Εφαρμόζεται κυρίως σε περιοχές με ξηρό κλίμα, φτωχές σε πόσιμο νερό, με πρόσβαση όμως σε θαλασσινό νερό για κάθε χρήση (οικιακή, βιομηχανική, αγροτική). Ίσως αποτελεί την μελλοντική ελπίδα της ανθρωπότητας όχι μόνο για την παραγωγή γλυκού νερού σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν φυσικές πηγές νερού, αλλά για όλες τις περιοχές της γης και κυρίως για τα μεγάλα αστικά κέντρα όπου το υπάρχον μολυσμένο νερό θα καθαρίζεται πλέον με μια από τις μεθόδους αφαλάτωσης. Η αφαλάτωση ιστορικά άρχισε να αναπτύσσεται κατά τον 20ο αιώνα με την εμφάνιση λειψυδρίας σε πολλές περιοχές της Γης. Όπως είναι γνωστό το 97,3% περίπου των παγκόσμιων αποθεμάτων νερού βρίσκεται στη θάλασσα αναμεμιγμένο σε μεγάλες αναλογίες με διάφορα διαλυμένα άλατα σε τέτοια μορφή που η χρήση του, είτε ως πόσιμο είτε ακόμα και για βιομηχανικές διεργασίες καθίσταται αδύνατη.

Το άλας αποτελείται από άτομα νατρίου και χλωρίου (τα μικρότερα σωματίδια κάθε στοιχείου). Το θαλασσινό νερό περιέχει το ίδιο είδος αλατιού (χλωριούχο νάτριο) που χρησιμοποιείται καθημερινά στη μαγειρική. Επιπλέον, το θαλασσινό νερό περιέχει επίσης πολλά μικρά σωματίδια χημικών ουσιών, όπως το ασβέστιο Ca και το μαγνήσιο Mg, που σχηματίζουν επίσης χημικές ουσίες που ονομάζονται άλατα. Ορισμένα από αυτά τα άλατα προέρχονται από χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται από τη βιομηχανία ενώ άλλες προέρχονται από φυσικές διεργασίες. Μεταξύ τριών και τεσσάρων λιβρών από κάθε 100 λίβρες ατόμων σε αλμυρό νερό (τα άτομα υδρογόνου και οξυγόνου που μαζί σχηματίζουν νερό μαζί με τα άτομα όλων των χημικών που διαλύονται στο νερό) συνδυάζονται σε άλατα.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι απομάκρυνσης του αλατιού από το θαλασσινό νερό και η μέθοδος που χρησιμοποιείται καθορίζεται από την προβλεπόμενη χρήση του νερού (Σχήμα 2.1). Το αλάτι μπορεί επίσης να απομακρυνθεί από τα υπόγεια ύδατα που έχουν μολυνθεί με θαλασσινό νερό. Για παράδειγμα, εάν το νερό πρέπει να είναι πόσιμο τότε χρειάζεται να αφαιρεθεί περισσότερο αλάτι από ότι εάν το νερό πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για καλλιέργειες. Το κόστος είναι επίσης σημαντικό, διότι όσο περισσότερο αλάτι χρειάζεται να αφαιρεθεί τόσο μεγαλύτερο είναι και το κόστος.



Σχήμα 2.1: Τυπική απεικόνιση μονάδας αφαλάτωσης

2.2 Ιστορική αναδρομή της αφαλάτωσης

Η αφαλάτωση είναι μια από τις πρώτες μορφές επεξεργασίας νερού που εφηύρε ο άνθρωπος, και εξακολουθεί να είναι μια δημοφιλής λύση σε όλο τον κόσμο σήμερα, καθώς τα προβλήματα της έλλειψης και καλής ποιότητας νερού είναι έντονα στις μέρες μας. Στην αρχαιότητα, πολλοί πολιτισμοί χρησιμοποιούσαν αυτή τη διαδικασία στα πλοία τους για να μετατρέψουν θαλασσινό νερό σε πόσιμο. Σήμερα, μονάδες αφαλάτωσης χρησιμοποιούνται σε πλοία για τη μετατροπή θαλασσινού νερού σε πόσιμο, σε πολλές άνυδρες περιοχές του κόσμου αλλά και σε περιοχές που έχουν μολυνθεί από φυσικούς και μη ρύπους. Στη φύση, αυτή η βασική διαδικασία είναι υπεύθυνη για τον υδρολογικό κύκλο. Ο ήλιος προκαλεί εξάτμιση του νερού από επιφανειακές πηγές, όπως λίμνες, ωκεανούς, και ρέματα. Οι υδρατμοί έρχονται τελικά σε επαφή με το ψυχρό αέρα, όπου συμπυκνώνονται για να σχηματίσουν δροσιά ή βροχή.

Ιστορικά η ιδέα της αφαλάτωσης ξεκινά από τα αρχαία χρόνια και εξελίχθηκε έως σήμερα ύστερα από την διαρκή αναζήτηση του ανθρώπου να βρίσκει διαρκώς νέα λύσεις.

Συνοπτικά η πορεία της παρουσιάζεται παρακάτω:

- ❖ Τον 4ο π.χ. αιώνα Έλληνες ναυτικοί εξάτμιζαν το θαλασσινό νερό με μια τεχνική που την περιγράφει και ο Αριστοτέλης. Συγκεκριμένα έπαιρναν φρέσκο νερό αφαιρώντας πρώτα το αλάτι από το θαλασσινό νερό εξατμίζοντας το θαλασσινό και στη συνέχεια συμπυκνώνοντας τον αέρα που φέρει το εξατμισμένο νερό.
- ❖ Τον 8ου μ.χ. αιώνα αναφέρεται περιγραφή αφαλάτωσης από μία πραγματεία ενός Άραβα συγγραφέα που βασίζεται στην απόσταξη του νερού.
- ❖ Τον 18ο αιώνα, με την ανάπτυξη της ατμοπλοΐας, η αναγκαιότητα μεγάλης ποσότητας ύδατος στη χρήση των ατμομηχανών κατέστησε επιτακτική ανάγκη αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού, ώστε να μη προκαλείται ταχύτατη διάβρωση των μηχανών.
- ❖ Το 1852 χορηγήθηκε το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μια συσκευή αφαλάτωσης νερού.
- ❖ Το 1890 στην Δυτική Αυστραλία, λόγω του ξηρού κλίματος κατασκευάζονται μονάδες αφαλάτωσης. Η σπουδαιότητα αυτής της ανακάλυψης φάνηκε από το γεγονός ότι τον ίδιο αμέσως χρόνο οι Άγγλοι εγκατέστησαν τη πρώτη μεγάλη μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού ύδατος στο Άντεν για τις ανάγκες του στόλου τους.
- ❖ Το 1928 εγκαταστάθηκε ο πρώτος μεγάλος εργοστασιακός σταθμός αφαλάτωσης θαλασσινού νερού στο νησί Κουρακάο.

- ❖ Το 1928 επίσης στις Ολλανδικές Αντίλλες ακόμα και η τοπική μπίρα γίνεται με αφαλατωμένο νερό.
- ❖ Μια μεγάλη μονάδα αφαλάτωσης κτίστηκε το 1938 στη σημερινή Σουηδική Αραβία.
- ❖ Το 1939-1945 και κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου διεξήχθη έρευνα για αφαλάτωση για να βρεθούν τρόποι να καλυφτούν οι ανάγκες των στρατιωτών για καθαρό νερό σε άνυδρες περιοχές. Αυτό το έργο συνεχίστηκε και μετά τον πόλεμο από τις Η.Π.Α. (Ηνωμένες πολιτείες αμερικής) και άλλες χώρες.
- ❖ Το 1950 ξεκινά μια νέα μέθοδος θερμαντικής αφαλάτωσης και εφαρμόζεται σε χώρες της Μέσης Ανατολής ενώ η Αμερικανική κυβέρνηση ιδρύει το Τμήμα Αλμυρού Νερού με σκοπό να υποστηρίξει την έρευνα για την αφαλάτωση.
- ❖ Το 1960 Ξεκινούν στο πανεπιστήμιο UCLA της Καλιφόρνια τα πρώτα πειράματα πάνω στην αντίστροφη όσμωση με την κατασκευή των πρώτων μεμβρανών από δύο ερευνητές, τους Sydney Loeb και Shrinivasa Sourirajan.
- ❖ Το 1965 δημιουργείται η πρώτη πειραματική μονάδα αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού με την μέθοδο της αντίστροφης όσμωσης.
- ❖ Στο τέλος δεκαετίας του '70 Ο John Cadotte του America's Midwest Research Institute και του Film Tec Corporation εφεύρει μια πολύ βελτιωμένη μεμβράνη που θα χρησιμοποιηθεί καθολικά στα επόμενα χρόνια.
- ❖ Το 1970 ο Υπουργός Εξωτερικών των Η.Π.Α. Thomas Jefferson παρουσίασε την πρώτη τεχνική έκθεση που περιέγραφε τα αποτελέσματα μιας απλής διαδικασίας απόσταξης. Οι πληροφορίες αυτές έπρεπε να είναι τυπωμένες σε όλα τα έγγραφα των πλοίων, έτσι ώστε να υπάρχει μια πηγή γλυκού νερού σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.
- ❖ Το 1980 η πρώτη μονάδα αφαλάτωσης που εξυπηρετεί τον Δήμο, ξεκινά την λειτουργία της στην Jeda της Σαουδικής Αραβίας.
- ❖ 1990-2003 το κόστος της αφαλάτωσης πέφτει στο 1 τρίτο.
- ❖ 2006 Μελέτη που δημοσιεύεται στο επιστημονικό περιοδικό Science αναφέρει ότι η χρήση νανοσωλήνων άνθρακα μπορεί να βελτιώσει πολύ την παραγωγή καθαρού νερού
- ❖ Μια ομάδα ερευνητών του MIT σε συνεργασία με την εταιρεία Jain Irrigation Systems αξιοποίησαν μια εγκατάσταση αφαλάτωσης στο Νέο Μεξικό για να δοκιμάσουν ένα νέο μηχανισμό, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να αφαιρεί το αλάτι από 8 κυβικά μέτρα νερού σε ένα 24ωρο.

Φτάνοντας λοιπόν στο σήμερα σε όλο τον κόσμο λειτουργούν περίπου 20.000 εγκαταστάσεις αφαλάτωσης, μέσης ή μεγάλης παροχής με συνολική παραγωγή περίπου 95.000.000 m³/d(ημέρα), το πυκνότερο δε δίκτυο των εγκαταστάσεων βρίσκεται στις περιοχές του Κόλπου, στις Αραβικές χώρες και τα Εμιράτα. Στον Ελληνικό χώρο μονάδες αφαλάτωσης λειτουργούν σε αρκετά νησιά (Σύρος, Μύκονος, Κέρκυρα, Ιθάκη κλπ.), καθώς και σε ορισμένες βιομηχανικές μονάδες.



Εικόνα 2.1: Μονάδα αφαλάτωσης στον κόλπο του Rupert, στο νησί της αγίας Ελένης στο Καναδά περί το 1901

2.3 Κύριες μέθοδοι αφαλάτωσης και επεξεργασίας νερού.

Ο διαχωρισμός νερού και αλάτων από ένα υδατικό διάλυμα γίνεται με σκοπό την παραγωγή του προς χρήση καθαρού νερού. Οι εμπορικές τεχνολογίες αφαλάτωσης μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κύριες κατηγορίες βάση των διεργασιών που περιλαμβάνουν: σε **θερμικές διεργασίες** και **διεργασίες μεμβρανών**. Αυτές συνιστούν τους δύο βασικούς τύπους των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται σε όλο τον κόσμο για την αφαλάτωση. Και οι δύο τεχνολογίες χρειάζονται ενέργεια για να λειτουργήσουν και να παράγουν πόσιμο νερό.

2.3.1 Διεργασίες αφαλάτωσης

1)Θερμικές διεργασίες: Η βασική αρχή των θερμικών μεθόδων αφαλάτωσης είναι η αλλαγή φάσης του νερού από υγρό σε αέριο κατά την εξάτμιση και στη συνέχεια από την αέρια φάση (ατμοί) στην υγρή φάση κατά την συμπύκνωση, το οποίο είναι απαλλαγμένο από τα άλατα του αρχικού διαλύματος: Απαιτούν θερμική και ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό επιτυγχάνεται κυριότερα με την απόσταξη αλλά και με την λιγότερο διαδεδομένη κρυστάλλωση. Θερμικές διεργασίες αποτελούν :

- Ακαριαία απόσταξη πολλαπλών βαθμίδων ή πολυβάθμια εκτόνωση (multi stage flashing ή MSF)
- Απόσταξη πολλαπλής επίδρασης ή πολυβάθμια εξάτμιση (multi effect distillation ή MED)
- Απόσταξη με συμπίεση ατμών (vapor compression distillation)
- Ηλιακή απόσταξη (solar distillation).

2)Διεργασίες μεμβρανών: Οι μεμβράνες έχουν την ιδιότητα να διαχωρίζουν επιλεκτικά το νερό και τα άλατα. Στις διεργασίες αυτές το νερό παραμένει αποκλειστικά στην υγρή φάση. Απαιτείται μόνο ηλεκτρική ενέργεια (μηχανικές διεργασίες). Τρεις άλλες διαδικασίες μεμβρανών που χρησιμοποιούνται στο στάδιο της προ-επεξεργασίας είναι η μικροδιήθηση (MF), η υπερδιήθηση (UF), και νανοδιήθηση NF .Οι δύο κύριες διαδικασίες μεμβράνης οι οποίες είναι επί του παρόντος περισσότερο εμπορικές είναι:

- Αντίστροφη ώσμωση (reverse osmosis ή RO)
- Ηλεκτροδιάλυση (electrodialysis ή ED)

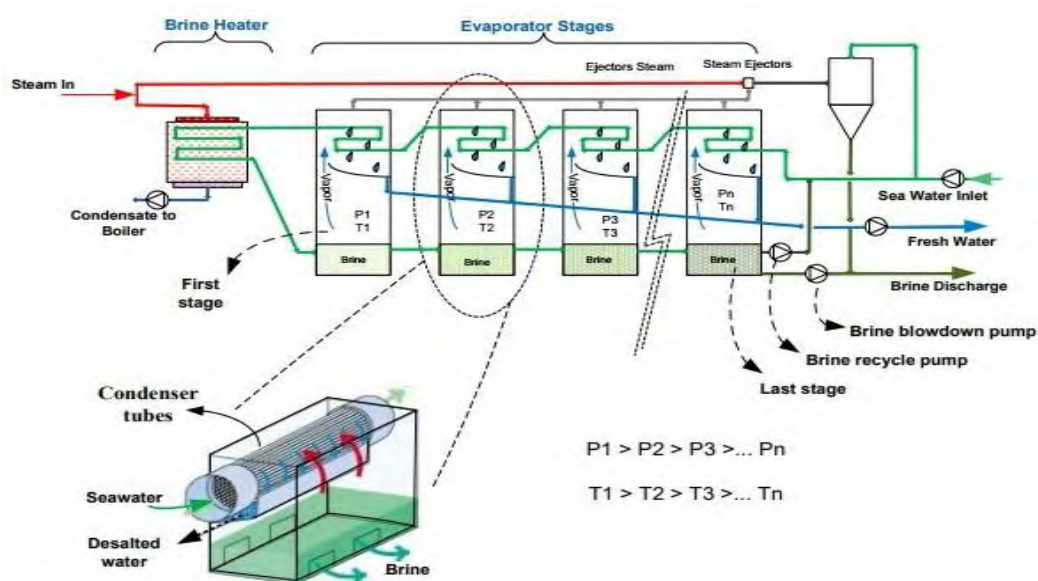
3) Άλλες διεργασίες:

- Μέθοδος διαχωρισμού με ψύξη (freeze separation)
- Μέθοδος ανταλλαγής ιόντων (ion-exchange)
- Απόσταξη Μεμβράνης (membrane distillation ή MD)
- Υβριδικές μέθοδοι

2.3.2 Θερμικές Διεργασίες

2.3.2.1 Ακαριαία απόσταξη πολλαπλών βαθμίδων ή πολυβάθμια εκτόνωση (multi stage flashing, MSF)

Η ακαριαία απόσταξη πολλαπλών βαθμίδων ή πολυβάθμια εκτόνωση είναι μια μέθοδος αφαλάτωσης που εφαρμόζεται σε εγκαταστάσεις μεγάλης παραγωγής αφαλατωμένου νερού και αποτελεί μια καινοτόμο θεώρηση της απόσταξης, αποσπώντας το θαλασσινό νερό και ατμοποιώντας αστραπιαία ένα μέρος του νερού σε πολλές βαθμίδες, οι οποίες θα μπορούσαν να θεωρηθούν αναγεννητικοί εναλλάκτες θερμότητας. Η αρχή λειτουργίας τους όπως φαίνεται και στο παρακάτω είναι η εξής:



Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) σε τέσσερις βαθμίδες

Στη διεργασία της ακαριαίας απόσταξης πολλαπλών βαθμίδων που απεικονίζεται παραπάνω (Σχήμα 2.2) το νερό τροφοδοσίας (αλατούχο νερό) θερμαίνεται αρχικά σε ένα δοχείο που ονομάζεται θερμαντήρας άλμης έως ότου φθάσει σε θερμοκρασία κάτω από την θερμοκρασία βρασμού, κορεσμού αφού έχει γίνει σαν πρώτο στάδιο προ-κατεργασία του διαλύματος τροφοδοσίας έτσι ώστε να μειωθεί στο ελάχιστο η πιθανότητα δημιουργίας επιστρώματος λάσπης καθώς και χημική επεξεργασία. Στη συνέχεια το θερμό νερό μεταφέρεται σε ένα άλλο δοχείο που ονομάζεται βαθμίδα στο οποίο η πίεση που επικρατεί είναι χαμηλότερη από την πίεση κορεσμού. Αυτή η απότομη μετάβαση του θερμού νερού σε χαμηλότερη πίεση προκαλεί τον ταχύτατο βρασμό του και την ταχύτατη μετατροπή του σε ατμό. Κατά κανόνα μόνο ένα μικρό ποσοστό του νερού μετατρέπεται σε ατμό οπότε το υπόλοιπο νερό περνάει από μια σειρά πρόσθετων βαθμίδων, κάθε μια εκ των οποίων έχει χαμηλότερη περιβάλλουσα πίεση από την προηγούμενη.

Ο ατμός που παράγεται συμπυκνώνεται σε κατάλληλους σωλήνες που υπάρχουν σε κάθε βαθμίδα . Επειδή το κρύο θαλασσινό νερό εισερχόμενο στην διαδικασία ρέει κοντά στο αποσταγμένο νερό με αντίθετη φορά, σχετικά μικρό ποσοστό θερμότητας χάνεται στο περιβάλλον. Το μεγαλύτερο μέρος θερμότητας προσλαμβάνεται από το θαλασσινό νερό και με αυτό τον τρόπο η ενέργεια ανακυκλώνεται και αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης της διάταξης. Ο βαθμός απόδοσης ορίζεται ως το πηλίκιο της μάζας παραγόμενου αφαλατωμένου νερού προς τη μάζα του ατμού που χρησιμοποιήθηκε. Μια τυπική τιμή του βαθμού αυτού για τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι περίπου 8. Εμπορεύσιμες εγκαταστάσεις υπάρχουν από το 1950. Κάθε εγκατάσταση μπορεί να παράγει 4000 έως 30000 m³/d και συνήθως λειτουργούν σε ανώτατες θερμοκρασίες 90-120 °C. Τέτοιες εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη Μέση Ανατολή, Σαουδική Αραβία, στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, στο Κουβέιτ καλύπτοντας το 30% της παγκόσμιας χρήσης αφαλάτωσης (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2: Μονάδα αφαλάτωσης με χρήση της τεχνολογίας (MSF) στο Ντουμπάι

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF)

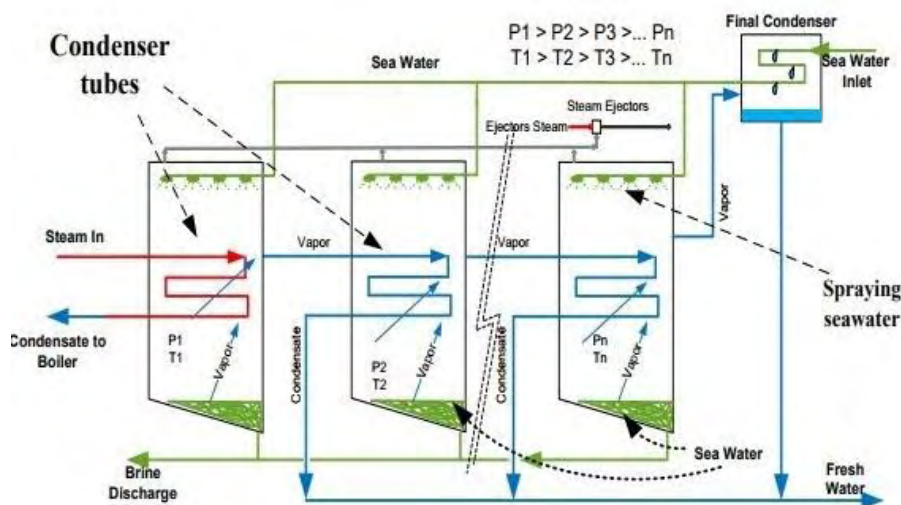
- Οι εγκαταστάσεις της πολυβάθμιας εκτόνωσης είναι σχετικά απλές για να κατασκευαστούν και να λειτουργήσουν
- Δεν έχουν κινούμενα μέρη, εκτός από τις συμβατικές αντλίες, και ενσωματώνουν μόνο μια μικρή ποσότητα σωληνώσεων σύνδεσης
- Η ποιότητα των εκροών ύδατος περιέχει 2-10 ppm διαλυμένα στερεά, παρέχοντας υψηλό επίπεδο καθαρισμού
- Η ποιότητα του νερού τροφοδοσίας δεν είναι τόσο σημαντική όσο είναι στην αντίστροφη ώσμωση
- Μονάδες λειτουργίας σε υψηλότερες θερμοκρασίες (πάνω από 115 °C) βελτιώνουν την αποδοτικότητα τους αλλά προκαλούν προβλήματα καθώς άλατα όπως το θειικό ασβέστιο καθιζάνουν στις επιφάνειες των σωλήνων και δημιουργούν θερμικά και μηχανικά προβλήματα, όπως το φράξιμο των σωλήνων
- Η προσθήκη περισσότερων σταδίων βελτιώνει την αποδοτικότητα και αυξάνει την παραγωγή νερού αλλά αυξάνει το κόστος κεφαλαίου και τη λειτουργική πολυπλοκότητα της εγκατάστασης.

2.3.2.2 Η Απόσταξη πολλαπλής επίδρασης ή πολυβάθμια εξάτμιση (multiple effect distillation, MED)

Η απόσταξη πολλαπλής επίδρασης ή πολυβάθμια εξάτμιση είναι μια θερμική μέθοδος η οποία έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για περισσότερα από 100 χρόνια και είναι ουσιαστικά προγενέστερη της πολυβάθμιας εκτόνωσης. Αντικαταστάθηκε σταδιακά τα τελευταία χρόνια από την πολυβάθμια εκτόνωση. Ωστόσο λόγω του ότι παρουσιάζει υψηλό συντελεστή θερμικής απόδοσης, και υψηλή ποιότητα αποσταγμένου νερού αρχίζει να ξανακερδίζει έδαφος. Επιπλέον, η διεργασία της MED χρησιμοποιείται παραδοσιακά στον κλάδο της βιομηχανικής απόσταξης για την εξάτμιση του χυμού από ζαχαροκάλαμο στην παραγωγή ζάχαρης και στην παραγωγή του αλατιού χρησιμοποιώντας τη διαδικασία εξάτμισης. Η διαδικασία MED, όπως και οι MSF χρησιμοποιεί την αρχή της εξάτμισης και της συμπύκνωσης μειώνοντας την πίεση περιβάλλοντος στις διάφορες επιδράσεις. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας για να υποβληθεί σε πολλαπλή βρασμό χωρίς την παροχή πρόσθετης θερμότητας.

Στην πολυβάθμια εξάτμιση ο ατμός περνάει μέσα από σωλήνες, ενώ το κρύο θαλασσινό νερό ψεκάζεται πάνω τους δημιουργώντας ένα πολύ λεπτό στρώμα νερού, το οποίο εξατμίζεται άμεσα. Η πίεση σε όλους τους αποστακτήρες είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής και συνεπώς απαιτούνται αντλίες κενού που υποβοηθούν την εξάτμιση, με βαθμιαία μειούμενη πίεση σε κάθε βαθμίδα, που ισούται με την πίεση κορεσμού στην αντίστοιχη θερμοκρασία του κάθε θαλάμου. Ακόμη θα πρέπει να χρησιμοποιούνται αντλίες που θα μεταφέρουν το παραγόμενο νερό στην κατανάλωση αλλά και όλα τα υπόλοιπα διακινούμενα ρευστά όπως η άλμη. Επίσης θα πρέπει το διάλυμα τροφοδοσίας να είναι ελεύθερο από μη υγροποιούμενα αέρια. Σε διαφορετική περίπτωση, τα αέρια θα συσσωρευτούν στους αποστακτήρες αυξάνοντας την πίεση και τελικά σταματώντας το βρασμό. Έτσι ο κάθε αποστακτήρας θα έχει τη δική του αντλία κενού, ή θα συνδέεται με τον επόμενο, που έτσι και αλλιώς έχει χαμηλότερη πίεση και ο τελευταίος θα συνδέεται με αντλία κενού. Επίσης σε κάθε βαθμίδα περιέχονται:

- Ο εναλλάκτης θερμότητας
- Ο διαχωριστής των ατμών
- Τα ακροφύσια ψεκασμού της άλμης



Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση της διεργασίας πολυβάθμιας εξάτμισης(MED) σε τρεις βαθμίδες

Έτσι, μέρος του ατμού συμπυκνώνεται και συλλέγεται σαν καθαρό νερό, ύστερα συνεχίζουν στην επόμενη βαθμίδα ο υπόλοιπος ατμός μαζί με το υπόλοιπο θαλασσινό νερό που απέμεινε από την ατμοποίηση. Αυτό έχει σαν όφελος να επιτρέπει την λειτουργία τόσο σε υψηλή όσο και σε χαμηλή θερμοκρασία, συχνά δε, η μέγιστη θερμοκρασία βρασμού μπορεί να είναι μέχρι και 55 °C, έτσι ώστε να αποφεύγεται η διάβρωση και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί χαμηλού επιπέδου απορριπτόμενη θερμότητα από άλλες θερμικές διεργασίες. Παρόλο που θεωρητικά τέτοιες διατάξεις μπορούν να έχουν αυθαίρετα μεγάλο αριθμό βαθμίδων στην πράξη η τοποθέτηση πολλών βαθμίδων δεν προσφέρει ουσιαστικά κάτι καλύτερο.



Εικόνα 2.3: Μονάδα αφαλάτωσης με χρήση της τεχνολογίας (MED)

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα πολυβάθμιας εξάτμισης (MED)

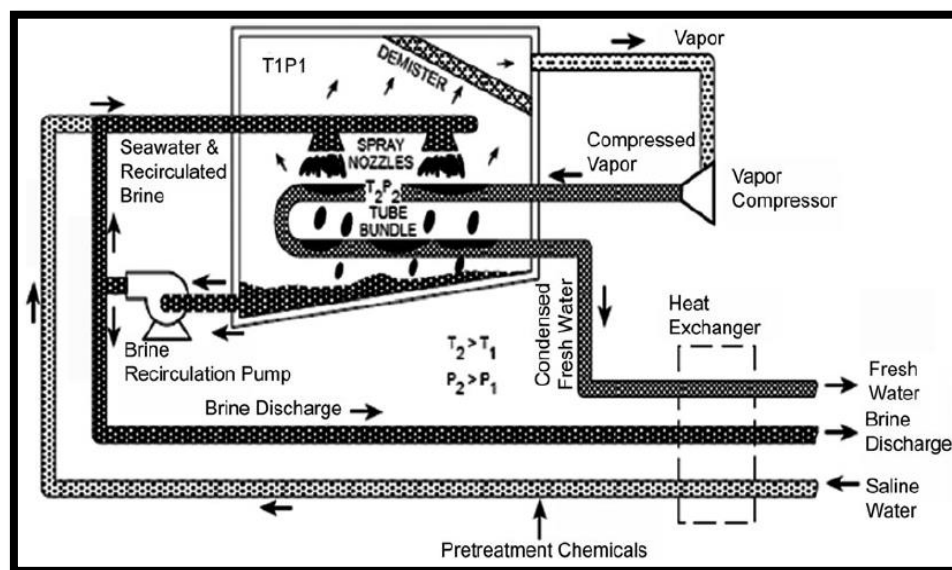
- Η διαδικασία MED είναι σχεδιασμένη να λειτουργεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες περίπου 60 °C. Αυτό ελαχιστοποιεί τη διάβρωση του σωλήνα και τυχόν αστοχίες του.
- Η ποιότητα του νερού τροφοδοσίας δεν είναι τόσο σημαντική όσο στα συστήματα αντίστροφης ώσμωσης ως εκ τούτου το κόστος προεπεξεργασίας και λειτουργίας είναι χαμηλό.
- Η κατανάλωση ενέργειας της MED είναι χαμηλότερη από αυτή του της πολυβάθμιας εκτόνωσης MSF
- Η αποτελεσματικότητα των εγκαταστάσεων MED είναι υψηλότερη από ότι στις εγκαταστάσεις MSF. Επομένως η διαδικασία MED είναι πιο αποτελεσματική από τη διαδικασία των MSF όσον αφορά τη μεταφορά θερμότητας και το κόστος παραγωγής γλυκού νερού.

2.3.2.3 Απόσταξη με συμπίεση ατμών (vapor compression distillation, VC)

Η μέθοδος της συμπίεσης ατμού αναφέρεται στη διαδικασία απόσταξης κατά την οποία ο ατμός που εξατμίζεται από το θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό λαμβάνεται από μια διάταξη θερμότητας που το συμπιέζει. Οι δύο κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την συμπίεση του ατμού ώστε να παραχθεί αρκετή θερμότητα για την εξάτμιση του είναι η μηχανική συμπίεση ατμού MVC με ένα μηχανικό συμπιεστή που συνήθως λειτουργεί με ηλεκτρισμό και θερμική συμπίεση ατμού TVC με εκτοξευτήρα ατμού.

Στη μηχανική συμπίεση ατμού (MVC) χρησιμοποιείται είτε ηλεκτροκινητήρας είτε κινητήρας diesel. Η δυναμικότητα αυτών των συστημάτων είναι από λίγα λίτρα έως 3000 m³/ημέρα με ενεργειακή κατανάλωση από 7 έως 12 kWh/m³.

Το διάλυμα άλατος οδηγείται στον αποστακτήρα όπου θερμαίνεται από τον ψεκασμό του σε μια σειρά σωλήνων από τους οποίους περνά ατμός, και στη συνέχεια εξατμίζεται με τη βοήθεια αεροσυμπιεστή που δημιουργεί υποπίεση (Σχήμα 2.4). Ο συμπιεστής αυτός συλλέγει τους υδρατμούς του καθαρού νερού και τους εκτοξεύει με πίεση μέσα στους σωλήνες όπου έρχονται σε επαφή με το ψυχρό θαλασσινό νερό όπου συμπυκνώνονται και λαμβάνεται έτσι το αφαλατωμένο νερό. Η μέθοδος αυτή λειτουργεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, οπότε δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη πηγής θερμότητας και αυτή είναι η βασική διαφορά της από τις προηγούμενες δύο μεθόδους. Η εξάτμιση δηλαδή προκαλείται αποκλειστικά και μόνο από την χαμηλή πίεση.



Σχήμα 2.4: Απεικόνιση της διαδικασίας της απόσταξης με συμπίεση ατμών (VC)

Γενικά, τα συστήματα μηχανικής απόσταξης (MVC) διαθέτουν μόνο μια βαθμίδα, ενώ τα συστήματα θερμικής απόσταξης (TVC) διαθέτουν περισσότερες από μια βαθμίδες. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι τα συστήματα MVC διατηρούν την ίδια κατανάλωση ενέργειας (ενέργεια ανά μονάδα παραγόμενου νερού), ανεξαρτήτως του αριθμού των διεργασιών αφαλάτωσης, ενώ τα συστήματα TVC, αυξάνουν τη θερμική τους απόδοση με την προσθήκη σταδίων.



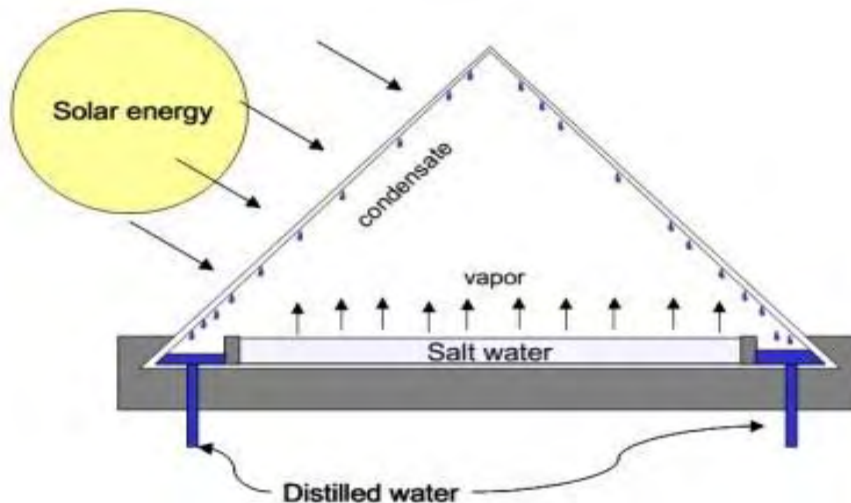
Εικόνα 2.4: Εγκατάσταση αφαλάτωσης με την μέθοδο της απόσταξης με συμπίεση ατμών με δυνατότητα παραγωγής πόσιμου νερού 6000 gallons / ώρα

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της απόσταξης με συμπίεση ατμών(VC)

- Η απλότητα και η αξιοπιστία της λειτουργίας των εγκαταστάσεων την καθιστούν μια ελκυστική διεργασία για μικρές μονάδες αφαλάτωσης. Συνήθως κατασκευάζονται με δυναμικότητα παραγωγής νερού 3000 m³/ημέρα και χρησιμοποιούνται συχνά για θέρετρα, βιομηχανίες και γεωτρήσεις όπου υπάρχει γλυκό νερό δεν είναι άμεσα διαθέσιμα.
- Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας της απόσταξης με συμπίεση ατμών (VC) την καθιστά απλή και αποτελεσματική διαδικασία από πλευράς ισχύος.
- Οι χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (κάτω από τους 70°C) μειώνουν της αλλοιώσεις και την διάβρωση των σωλήνων.

2.3.2.4 Ηλιακή απόσταξη (solar distillation)

Η μέθοδος της ηλιακής απόσταξης είναι μια τεχνική που βασίζεται στην αρχή του θερμοκηπίου, όπως θα περιγράψουμε στη συνέχεια, με μηδαμινό ενεργειακό κόστος αφού βασίζεται στην ηλιακή ακτινοβολία. Όπως φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 2.5) που ακολουθεί, οι ακτίνες του ήλιου διέρχονται μέσα από μια διαφανή οροφή επιστρωμένη με ειδικό γυαλί. Καθώς εισέρχονται θερμαίνουν το θαλασσινό νερό που βρίσκεται σε μια λεκάνη στον πάτο. Το νερό αυτό εξατμίζεται και ανεβαίνει στην κεκλιμένη γυάλινη συνήθως οροφή, συμπυκνώνεται πάλι σχηματίζοντας ένα λεπτό στρώμα, το οποίο ρέει προς τη βάση και συλλέγεται. Η μέγιστη θερμοκρασία ενός τέτοιου θερμοκηπίου φτάνει περίπου τους 50°C το καλοκαίρι. Το μοναδικό κόστος είναι αυτό των υλικών κατασκευής και ως εκ τούτου θα πρέπει να αναζητηθούν σχετικώς φτηνά υλικά κατασκευής. Βέβαια, η απόδοση τέτοιων εγκαταστάσεων είναι χαμηλή, περίπου 3,5 λίτρα καθαρό νερό ανά m² εδάφους, και μάλιστα νερό όχι απαλλαγμένο από μικροοργανισμούς, πράγμα που σημαίνει ότι χρειάζεται και περαιτέρω επεξεργασία. Ωστόσο, μπορούν να είναι οικονομικά βιώσιμες για μικρής κλίμακας παραγωγή τα νοικοκυριά και τις μικρές κοινότητες, ειδικά όπου η ηλιακή ενέργεια και η χαμηλού κόστους εργασία είναι άφθονο.



Σχήμα 2.5: Απεικόνιση της διεργασίας με ηλιακή απόσταξη

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλιακής απόσταξης (solar distillation)

- Η διεργασία της ηλιακής απόσταξης απαιτεί μεγάλη έκταση για ηλιακή συλλογή, έτσι ώστε να μην είναι βιώσιμη μεγάλης κλίμακας παραγωγή, ειδικά κοντά σε μια πόλη όπου η γη είναι οπάνια και δαπανηρή[8].
- Το συγκριτικό κόστος εγκατάστασης τείνει να είναι σημαντικά υψηλότερο από εκείνο για τα άλλα συστήματα. Είναι επίσης ευάλωτη σε ζημιές από καιρικές συνθήκες[8].
- το κόστος εργασίας είναι πιθανό να είναι υψηλό για την συνήθη συντήρηση και για την επιδιόρθωση διαρροών και βλάβης στο γυαλί[8].

2.3.3 Διεργασίες μεμβρανών

Λίγα λόγια για τις μεμβράνες

Μεμβράνη είναι ένα διαχωριστικό μέσο, το οποίο δύναται να διαχωρίσει ένα μείγμα ουσιών σε δύο επιμέρους κλάσματα, εκατέρωθεν αυτού. Η μεμβράνη αποτελείται από πορώδες υλικό που επιτρέπει μόρια νερού να περάσουν μέσα από αυτό, αλλά ταυτόχρονα εμποδίζει τη διέλευση μεγαλύτερων και ανεπιθύμητων μορίων όπως ιοί, βακτηρίδια, μέταλλα και άλατα. Οι μεμβράνες κατασκευάζονται από ένα μεγάλο εύρος ποικιλίας υλικών όπως πολυμερικά υλικά που περιλαμβάνουν κυτταρίνη, οξικό και νάιλον και μη πολυμερή υλικά όπως κεραμικά, μέταλλα και σύνθετα υλικά.

Οι συνθετικές μεμβράνες εισήχθησαν για πρώτη φορά στις διαδικασίες διαχωρισμού στη δεκαετία του 1960, αλλά άρχισαν να διαδραματίζουν όλο και πιο σημαντικό ρόλο στην αφαλάτωση του νερού στη δεκαετία του 1980. Αρχικά, οι εφαρμογές της μεμβράνης περιορίζονταν στην επεξεργασία των αστικών λυμάτων όπως η μικροδιήθηση, αλλά με την ανάπτυξη νέων τύπων μεμβράνης, οι χρήσεις επεκτάθηκαν για να καλύψουν όχι μόνο τη βιομηχανία ύδατος αλλά και διαδικασίες υψηλής απόδοσης όπως χημικοί διαχωρισμοί, συγκέντρωση ενζύμων και καθαρισμός ποτών. Η αντίστροφη ώσμωση RO και η ηλεκτροδιάλυση (ED) αντικαθιστούν τις τεχνολογίες αφαλάτωσης με αλλαγή φάσης για την παροχή νερού στις παράκτιες και νησιωτικές κοινότητες σε όλο τον κόσμο. Η τεχνολογία των μεμβρανών περιλαμβάνει διάφορες διεργασίες, αλλά η κύρια διαφορά μεταξύ τους έγκειται στο μέγεθος των ιόντων, των μορίων και των αιωρούμενων σωματιδίων που συγκρατούνται ή αφήνονται να περάσουν μέσω των μεμβρανών.

Τυπικές διεργασίες μεμβρανών διαχωρισμού που χρησιμοποιούνται στα στάδια προ-επεξεργασίας της αφαλάτωσης για την απομάκρυνση μεγάλων σωματιδίων, βακτηρίων, ιόντων και λοιπών σωματιδίων είναι:

- η Νανοδιήθηση (Nanofiltration NF)
- η Υπερδιήθηση (Ultrafiltration UF)
- η Μικροδιήθηση (Microfiltration MF) και
- η Διήθηση (filtration)

2.3.3.1 Αντίστροφη ώσμωση (reverse osmosis, RO)

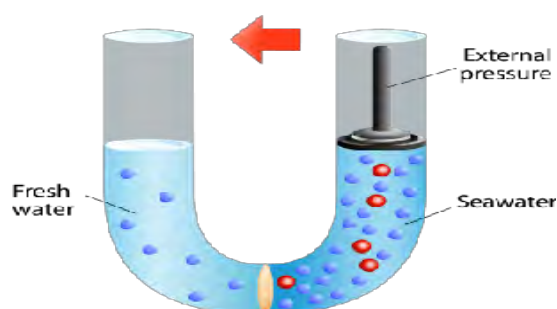
Η διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης είναι από τις πιο σημαντικές και πιο ελπιδοφόρες. Η αντίστροφη ώσμωση είναι μια διαδικασία διαχωρισμού η οποία χρησιμοποιεί πίεση για να ωθήσει ένα διάλυμα μέσω μιας μεμβράνης η οποία κρατάει τη διαλυμένη ουσία στην μια της πλευρά και επιτρέπει στον καθαρό, πλέον, διαλύτη να περάσει από την άλλη πλευρά (Σχήμα 2.6). Με άλλα λόγια, είναι μια διαδικασία που εξαναγκάζει το διαλύτη που βρίσκεται σε μια περιοχή υψηλής συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας να περάσει, μέσα από μια μεμβράνη, σε μια περιοχή όπου η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας είναι πολύ πιο χαμηλή, ασκώντας μια πίεση η οποία είναι πιο μεγάλη από την ωσμωτική πίεση. Αυτή είναι η αντίστροφη διαδικασία από την ορθή ώσμωση, η οποία είναι η φυσική κίνηση του διαλύτη, μέσω μιας μεμβράνης, από μια περιοχή με χαμηλή συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας σε μια περιοχή με υψηλή συγκέντρωση αυτής, όταν δεν ασκείται καμία εξωτερική πίεση.

Η μεμβράνη είναι ημιδιαπερατή και είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε να επιτρέπει τη διέλευση του διαλύτη αλλά όχι της διαλυμένης ουσίας και των όποιων προσμίξεων. Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται για την αντίστροφη ώσμωση έχουν πυκνό πλέγμα στο πολυμερές περίβλημα, τους όπου και γίνεται κυρίως ο διαχωρισμός. Για να γίνει ο διαχωρισμός πρέπει να ασκηθεί υψηλή πίεση στη μεριά της υψηλής συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας, η οποία είναι της τάξης των 15-25bar για υφάλμυρο νερό και 54-80bar για θαλασσινό νερό, το οποίο έχει οσμωτική πίεση 24bar, η οποία και πρέπει να υπερκεραστεί.

Στη διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης, οι δυνάμεις που επηρεάζουν την κίνηση του νερού είναι δύο. Η πρώτη είναι η δύναμη λόγω της ωσμωτικής πίεσης που αναγκάζει το διαλύτη να κινηθεί από την περιοχή με χαμηλή συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στην περιοχή με την υψηλή συγκέντρωση αυτής. Η δεύτερη είναι αντίθετη στην πρώτη, προκαλεί αντίθετη κίνηση του νερού και οφείλεται στην πίεση που επιβάλλεται εξωτερικά. Ο σκοπός είναι να υπερσχύσει η δεύτερη δύναμη, ώστε να προκύψει διαλύτης, δηλαδή νερό, απαλλαγμένος από τη διαλυμένη ουσία, δηλαδή άλατα και προσμίξεις, και να επιτευχθεί η διαδικασία της

αφαλάτωσης. Αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος για τον οποίο η πίεση που επιβάλλεται εξωτερικά πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ώσμωτική πίεση του διαλύματος.

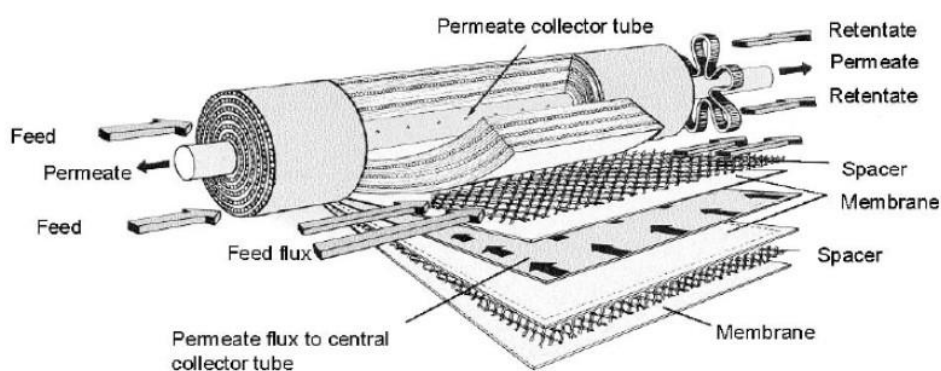
Ένα από τα πλεονεκτήματα της αντίστροφης ώσμωσης, το οποίο είναι πολύ σημαντικό για την επιλογή της για την αφαλάτωση, είναι ότι είναι από τις λιγότερο ενεργοβόρες μεθόδους όπως θα δούμε και στη συνέχεια, γεγονός το οποίο κάνει το κόστος παραγωγής του νερού ακόμα πιο χαμηλό. Οι Ηνωμένες Πολιτείες κατέχουν την δεύτερη θέση σε παγκόσμιο επίπεδο όσον αφορά την ικανότητα αφαλάτωσης, κυρίως βασιζόμενοι στη RO για την επεξεργασία των υφάλμυρων και επιφανειακών υδάτων.



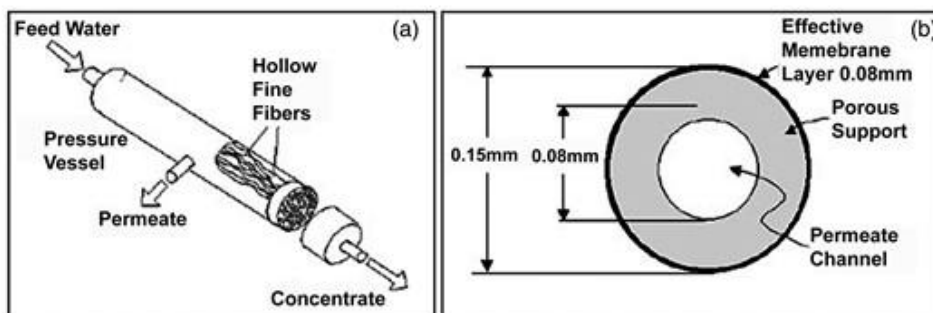
Σχήμα 2.6: Περιγραφή της αντίστροφης ώσμωσης με εφαρμογή πίεσης μεγαλύτερης της ώσμωτικής ώστε να κινηθεί το διάλυμα διαμέσου της μεμβράνης

Οι σημαντικότεροι τύποι στοιχείων μεμβράνης τους οποίους θα αναλύσουμε διεξοδικά στο 4ο κεφάλαιο είναι οι παρακάτω:

- Τα στοιχεία επίπεδης διαμόρφωσης (Plate and frame)
- Τα σωληνοειδή στοιχεία (Tubular)
- Τα στοιχεία σπειροειδούς διαμόρφωσης (Spiral wound)
- Τα στοιχεία κοίλων λεπτών ινών (Hollow fine fiber)



Σχήμα 2.7: Αναλυτική περιγραφή των μερών της μεμβράνη αντίστροφης ώσμωσης τύπου σπειροειδής μεμβράνης(spiral wound)



Σχήμα 2.8: Αναλυτική περιγραφή των μερών της μεμβράνη αντίστροφης ώσμωσης τύπου κοίλων ινών (*hollow fine fibre*)

✚ Ανάκτηση ενέργειας μέσω απόρριψης της άλμης

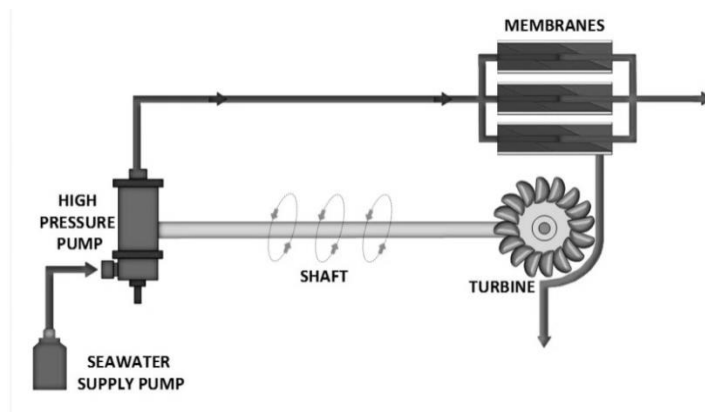
Τα συστήματα ανάκτησης ενέργειας (*energy recovery systems-ERS*) χρησιμοποιούνται συχνά με την αντίστροφη ώσμωση και με σκοπό την αξιοποίηση της διαθέσιμης ενέργειας του ρεύματος της απορριπτόμενης άλμης, ώστε να καλύπτεται ένα μέρος της απαιτούμενης ενέργειας της αντλίας. Με τον τρόπο αυτό μειώνονται οι ενεργειακές απαιτήσεις της αντλίας, για την αύξηση της πίεσης του τροφοδοτούμενου νερού, ελαττώνοντας τις συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις της μονάδας αφαλάτωσης. Τα συστήματα αυτά χωρίζονται στις εξής παρακάτω βασικές κατηγορίες (Πίνακας 2.1).

Συστήματα ανάκτησης ενέργειας	Αποδοτικότητα %
Francis turbine	76
Pelton turbine	87
Turbo changer	85
Pressure exchanger	96

Πίνακας 2.1: Τυπική απόδοση συστημάτων ανάκτησης ενέργειας

Στρόβιλοι (turbine systems)

1.Υδροστρόβιλοι Pelton(Pelton Wheels turbines): Η λειτουργία του βασίζεται στο τροχό Pelton (Pelton Wheel) ,όπου οδηγείται το ρεύμα της άλμης και κινεί τον άξονα που είναι προσαρμοσμένος στη διάταξη (Σχήμα 2.9). Ο άξονας είναι άμεσα συνδεδεμένος με τον κινητήρα της αντλίας υψηλής πίεσης, έτσι ώστε να μειώνει το φορτίο της αντλίας και να εξοικονομεί ενέργεια. Η άλμη απορρίπτεται σε πίεση ίση με την ατμοσφαιρική. Το βασικό μειονέκτημα της διάταξης αυτής είναι οι διπλές απώλειες που υπάρχουν κατά τη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική (περιστροφική) και εκ νέου σε υδραυλική. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η απόδοση της διάταξης να κυμαίνεται γύρω στο 85 τοις εκατό.



Σχήμα 2.9: Απεικόνιση λειτουργίας συστήματος αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης με στρόβιλο τύπου Pelton

2.Συστήματα αντλίας στροβίλου (turbo changers): Αποτελούνται από μια αντλία και ένα στρόβιλο συνδεδεμένα σε ένα περίβλημα (κιβώτιο). Τόσο η αντλία όσο και ο στρόβιλος περιέχουν μια απλή βαθμίδα ρότορα. Ο ρότορας του στροβίλου μετατρέπει την υδραυλική ενέργεια του ρεύματος της άλμης σε μηχανική και στη συνέχεια μετατρέπεται η ενέργεια αυτή μέσω της αντλίας σε πίεση. Γενικά τα συστήματα αντλίας-στροβίλου (turbochangers) αποτελούν την επικρατούσα τεχνολογία στο χώρο των συστημάτων ανάκτησης ενέργειας.

Εναλλάκτες πίεσης (pressure exchangers)

Η διάταξη αποτελείται από ένα πλαστικό δοχείο πίεσης, στο οποίο βρίσκεται ένα κεραμικός σωλήνας και μέσα του, ένας κεραμικός ρότορας, ο οποίος περιστρέφεται πάνω σε ένα λεπτό υμένιο νερού. Με την είσοδο στη διάταξη της άλμης υψηλής πίεσης, ο ρότορας περιστρέφεται και εκτοπίζει το θαλασσινό νερό υπό υψηλή πίεση και απορρίπτει την άλμη σε χαμηλότερη πίεση. Το θαλασσινό νερό υψηλής πίεσης διοχετεύεται σε μια βοηθητική αντλία, η οποία το μεταφέρει στην εγκατάσταση[10].

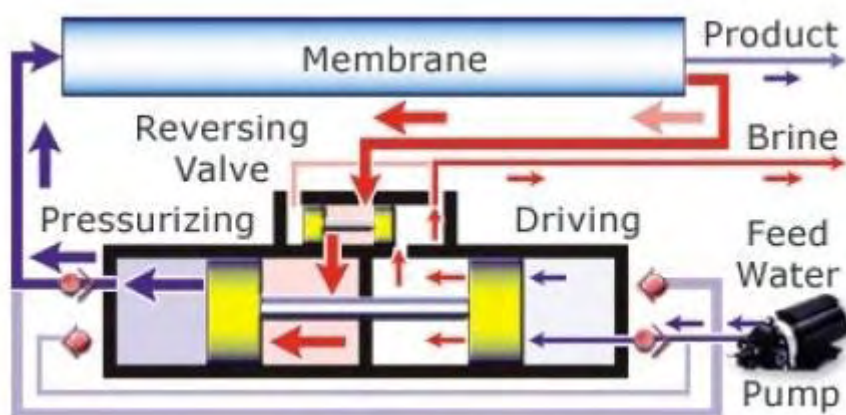


Σχήμα 2.10: Περιγραφή της εσωτερικής δομής του εναλλάκτη πίεσης (PX)[10]

Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ανάκτηση ενέργειας, και επίσης μειώνεται η απαιτούμενη δυναμικότητα της αντλίας υψηλής πίεσης. Οι εναλλάκτες πίεσης διατηρούν το βαθμό απόδοσης τους ανεξάρτητα από αλλαγές που μπορούν να συμβούν λόγω των χρόνων λειτουργίας ή της συντήρησης της μονάδας, σε αντίθεση με τους στροβίλους, όπου σε αντίστοιχη περίπτωση λειτουργούν με μειωμένη απόδοση. Τέλος οι εναλλάκτες πίεσης λειτουργούν μεταφέροντας την πίεση της άλμης στο νερό τροφοδοσίας με βαθμό απόδοσης από 96% ως 98%.

Αντλία Clark (Clark pump)

Ο ευρύτερα χρησιμοποιούμενος εναλλάκτης πίεσης είναι ο Clark Pump της εταιρείας Spectra Watermakers. Τα τελευταία χρόνια, ο συγκεκριμένος εναλλάκτης βρίσκεται σε εφαρμογή σε ένα μεγάλο μέρος των συστημάτων ασφατάωσης με αντίστροφη ώσμωση, συμβάλλοντας σε μεγάλο βαθμό στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Κατά τη λειτουργία του, χρησιμοποιεί δύο αντίθετα τοποθετημένους κυλίνδρους και έμβολα που ενώνονται με μία ράβδο. Η πίεση του νερού τροφοδοσίας ασκείται στον ένα κύλινδρο εξαναγκάζοντας τον άλλον να κινηθεί το νερό προς τη μεμβράνη. Όταν το έμβολο ενός κυλίνδρου ακουμπά στη βάση, η διαδικασία αντιστρέφεται. Ουσιαστικά γίνεται μεταφορά της ενέργειας που περιέχει η απορριπτόμενη άλμη λόγω της υψηλής πίεσης, στο θαλασσινό νερό που έχει χαμηλή πίεση.



Σχήμα 2.11: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας της αντλίας Clark

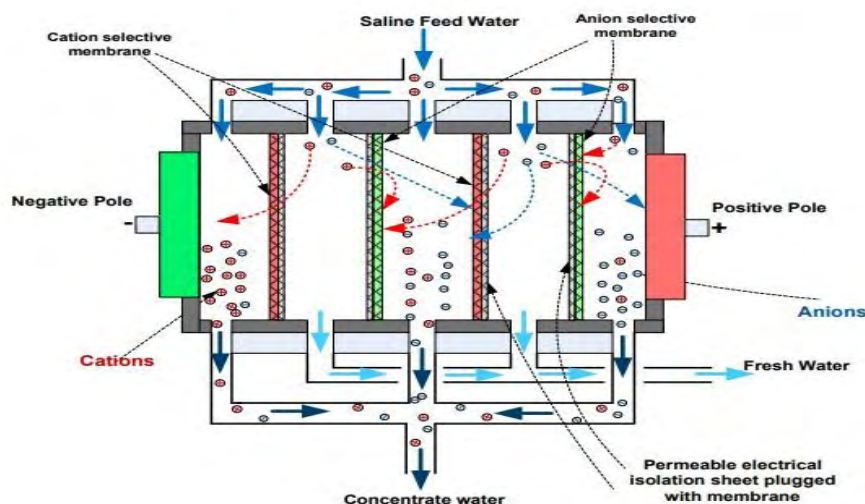
Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αντίστροφης ώσμωσης(RO)

- Τα προβλήματα διάβρωσης υλικών είναι σημαντικά λιγότερα σε σύγκριση με τις διεργασίες MSF και MED
- Τα πολυμερή υλικά χρησιμοποιούνται όσο το δυνατόν περισσότερο αντί για χρήση μεταλλικών στοιχείων[8].
- Δύο εξελίξεις συνέβαλαν επίσης στη μείωση του λειτουργικού κόστους των εγκαταστάσεων RO κατά την τελευταία δεκαετία:
 - 1) Η ανάπτυξη λειτουργικών μεμβρανών με υψηλή αντοχή και χαμηλότερο κόστος
 - 2) Χρήση συσκευών ανάκτησης ενέργειας που αποτελούνται από στροβίλους ή των αντλίες και μπορούν να μετατρέψουν μια διαφορά πίεσης σε ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση του ενεργειακού κόστους
- Οι μονάδες αντίστροφης ώσμωσης που πωλούνται για οικιακή διήθηση νερού απαιτούν πολύ μεγάλες ποσότητες νερού, δεδομένου ότι ανακτούν μόνο το 5-15% του νερού τροφοδοσίας που εισέρχεται στο σύστημα ,φίλτρο. Στα συστήματα θαλασσινού νερού, για κάθε 5 γαλόνια χρησιμοποιήσιμου νερού, 40-90 γαλόνια νερό αποστέλλεται στο σύστημα αποχέτευσης[8].
- Η φθορά των μεμβρανών προκαλείται από την καθίζηση των αλάτων είναι ένα κοινό πρόβλημα για όλες τις μεμβράνες
- Οι μεμβράνες είναι πιθανόν να ρυπαίνονται από μεγάλα σωματίδια, αλλά αυτό μπορεί να είναι αποφεύγεται με προ-φιλτράρισμα του ύδατος τροφοδοσίας μέσω ενός μικρού φίλτρου 5-10 μm. Η βιολογική ρύπανση μπορεί να προκληθεί από το σχηματισμό αποικιών μικροοργανισμών και παγιδεύοντας νεκρούς και ζωντανούς οργανισμούς. Η κολλοειδής ρύπανση προκαλείται από το επί των επιφανειών μεμβράνης των κολλοειδών από τη συσσώρευση αλουμινίου πυριτικό άλας και αργίλους και από απορρυπαντικά σαπουνιών και οργανικά υλικά[8].

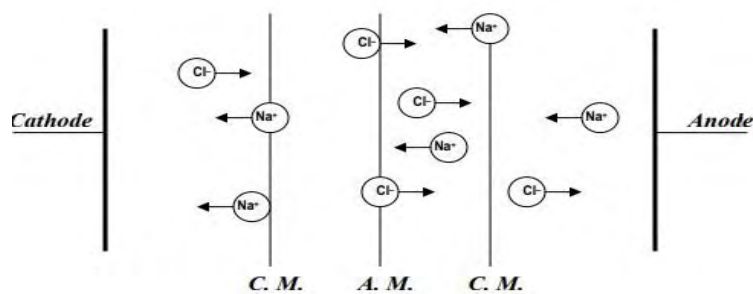
2.3.3.2 Ηλεκτροδιάλυση (electrodialysis –ED)

Είναι μία μέθοδος η οποία εισήλθε στο εμπόριο στις αρχές της δεκαετίας του 1960, περίπου δέκα χρόνια πριν την αντίστροφη ώσμωση. Η ηλεκτροδιάλυση είναι μια διεργασία αφαλάτωσης στην οποία τα άλατα υπό μορφή ιόντων απομακρύνονται από την κύρια μάζα του διαλύματος μέσω φορτισμένων μεμβρανών και έτσι το παραμένον διάλυμα περιέχει άλατα μικρότερης συγκέντρωσης.

Συγκεκριμένα για την ηλεκτροδιάλυση χρησιμοποιούνται μεμβράνες διαπερατές μόνο από ανιόντα ή κατιόντα οι οποίες τοποθετούνται εναλλάξ και παράλληλα σχηματίζοντας διαμερίσματα εύρους 1mm. . Το νερό με το οποίο τροφοδοτείται η διαδικασία, διαπερνάται από ηλεκτρικό ρεύμα μέσω ηλεκτροδίων συνδεδεμένων σε μια πηγή συνεχούς ρεύματος. Έτσι τα μεν τα ανιόντα οδεύουν προς την άνοδο δια μέσου της πλησιέστερης μεμβράνης ανιόντων, ενώ τα κατιόντα οδεύουν προς την κάθοδο δια μέσου της πλησιέστερης μεμβράνης κατιόντων. Ανάμεσα στο ζεύγος των ηλεκτροδίων τοποθετούνται εναλλάξ δύο μεμβράνες, εκ των οποίων η μία επιτρέπει τη διέοδο των κατιόντων κι η άλλη των ανιόντων. Με τον τρόπο αυτό, τα ανιόντα περνούν μέσα από τη μεμβράνη ανιόντων, όμως εμποδίζεται η διέλευση τους από τη μεμβράνη κατιόντων. Ανάλογο είναι κι αυτό που συμβαίνει στα κατιόντα. Έξω από τις μεμβράνες δημιουργείται πυκνό αλατούχο διάλυμα (αλμόλοιπο) και μεταξύ αυτών δημιουργείται αραιό διάλυμα, το οποίο αποτελεί το ζητούμενο αφαλατωμένο νερό.



Σχήμα 2.12: Σχηματική περιγραφή της διεργασίας της ηλεκτροδιάλυσης)



Σχήμα 2.13: Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτροδιάλυσης β)

Στα παραπάνω (Σχήματα 2.12,2.13) δίνεται αναλυτικά η διάταξη των μεμβρανών καθώς και η λειτουργία αυτής της μεθόδου. Ένα σύστημα ηλεκτροδιάλυσης περιέχει 100-400 μεμβράνες, επιφάνειας 0,5-2 m². Η απαιτούμενη ένταση ρεύματος είναι 100A. Η μέθοδος της ηλεκτροδιάλυσης χρησιμοποιείται κυρίως για την αφαλάτωση υφάλμυρου νερού και όχι θαλασσινού. Χρησιμοποιεί ειδικές μεμβράνες και για αυτόν το λόγο κατατάσσεται στις μεθόδους μεμβρανών. Η εφαρμογή της σε μεγάλη κλίμακα αναπτύχθηκε τα τελευταία είκοσι πέντε χρόνια ειδικότερα με την εφαρμογή της αντίστροφης ηλεκτροδιάλυσης (Electrodialysis reversal, EDR), όπου έχουμε συνεχή εναλλαγή της πολικότητας του ηλεκτρικού πεδίου. Η Αντιστρέψιμη ηλεκτροδιάλυση λειτουργεί ακριβώς με τον ίδιο τρόπο, με τη μόνη διαφορά ότι μπορεί να αντιστρέφεται η πολικότητα των ηλεκτροδίων και άρα το κανάλι (ή το κελί) που πριν διατρεχόταν από νερό τροφοδοσίας, τώρα θα διατρέχεται από το προϊόν της αφαλάτωσης. Έτσι επιτυγχάνεται εύκολα καθαρισμός της διάταξης από τα αλμόλοιπα και τις επικαθίσεις.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλεκτροδιάλυσης (ED)

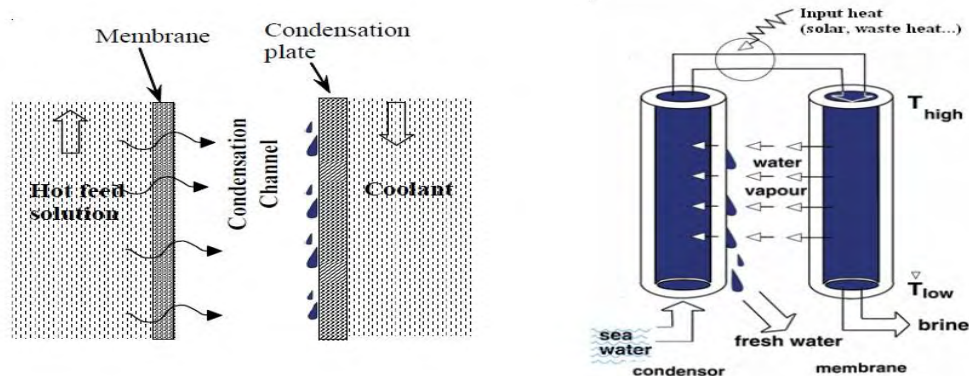
- Η Ηλεκτροδιάλυση είναι εφικτή για υφάλμυρο νερό με αλατότητα μικρότερη από 6 g / L διαλυμένου στερεά, αλλά δεν είναι κατάλληλα για νερό με διαλυμένα στερεά μικρότερα από 0,4 g / L.
- Η αφαλάτωση του νερού με συγκεντρώσεις διαλυμένων στερεών υψηλότερες από 30g / L, όπως το θαλασσινό νερό, είναι δυνατή αλλά δεν είναι οικονομικά βιώσιμη[8].
- Η κύρια απαίτηση ενέργειας είναι το συνεχές ρεύμα για να διαχωριστούν οι ιονικές ουσίες στη μεμβράνη[8]
- Η κατανάλωση ενέργειας είναι ανάλογη των αλάτων που έχουν αφαιρεθεί[8].
- Μπορεί να επεξεργάζεται νερό τροφοδοσίας με υψηλότερο επίπεδο αιωρούμενων στερεών από την αντίστροφη ώσμωση RO
- Η χημική χρήση για προ-επεξεργασία είναι χαμηλή.

2.3.4 Άλλες διεργασίες

2.3.4.1 Απόσταξη μεμβράνης (membrane distillation, MD)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, υπάρχουν και κάποιες μεμονωμένες διεργασίες αφαλάτωσης, οι οποίες μπορεί να προέρχονται από το συνδυασμό των θερμικών διεργασιών με αυτές των μεμβρανών. Μια τέτοια διεργασία είναι κι η Απόσταξη Μεμβράνης. Η μέθοδος αφαλάτωσης με τη διεργασία της απόσταξης μεμβράνης, συνδυάζει τόσο την απόσταξη (θερμική διεργασία), όσο και τις ιδιότητες των μεμβρανών. Μία διάταξη αφαλάτωσης, βάσει της απόσταξης μεμβράνης περιλαμβάνει τη θέρμανση του προς αφαλάτωση ύδατος και την παραγωγή ατμού, ο οποίος αναδύομενος διέρχεται ελεύθερα από μία ημιπερατή μεμβράνη, που δεν επιτρέπει τη διέλευση νερού. Στη συνέχεια ο ατμός αυτός ψύχεται και υγροποιείται σε κατάλληλη επιφάνεια, παράγοντας έτσι πόσιμο νερό. Το νερό δεν μπορεί να διαπεράσει τη μεμβράνη και με τον τρόπο αυτό παγιδεύεται και συλλέγεται. Η αρχή λειτουργίας απόσταξης της μεμβράνης παρουσιάζεται στο (Σχήμα 2.14) παρακάτω.

Η απόσταξη μεμβράνης χρησιμοποιήθηκε, σε μικρή κλίμακα, στη δεκαετία του 1980. Πρόκειται για μία μέθοδο που δε βρήκε ποτέ εφαρμογή ευρείας κλίμακας, αν και τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια αναγέννηση του ενδιαφέροντος για αυτή, λόγω των πολλών δυνατοτήτων που παρέχει ως προς την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Κάποια άλλα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου αποτελούν η απλότητα της λειτουργίας της, η ανάγκη για μικρότερες θερμοκρασιακές διαφορές, το χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης, η μικρή καταπόνηση που δέχονται οι μεμβράνες και το γεγονός ότι λειτουργεί με ατμοσφαιρική πίεση. Παρόλα τα παραπάνω, στην απόσταξη με μεμβράνες συναντάμε και σημαντικά μειονεκτήματα, όπως ο χαμηλός ρυθμός παραγωγής αποσταγμένου νερού, η απαίτηση για μεγάλους χώρους, ο υψηλός λόγος ενέργειας/άντλησης ανά μονάδα παραγωγής και η αβεβαιότητα του κόστους του παραγόμενου νερού.



Σχήμα 2.14: Βασική Αρχή της MD διεργασίας και απεικόνιση τυπικού συστήματος απόσταξης μεμβράνης MD[7]

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα απόσταξης μεμβράνης(MD)

- Τα βασικά πλεονεκτήματα είναι η απλότητα και η χαμηλή αύξηση της θερμοκρασίας που απαιτεί ώστε να λειτουργεί. Αυτά διευκολύνουν τη χρήση της απόσταξης μεμβράνης σε ηλιακές μονάδες αφαλάτωσης[8]
- Η απόσταξη μεμβράνης απαιτεί περισσότερο χώρο από άλλες διεργασίες μεμβράνης[8]

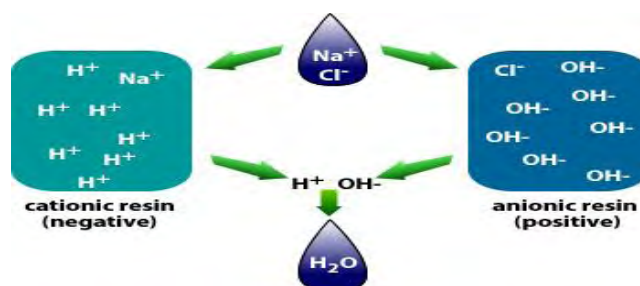
2.3.4.2 Μέθοδος ανταλλαγής ιόντων(ion-exchange)

Η μέθοδος ανταλλαγής ιόντων είναι μια διαδικασία επεξεργασίας νερού που χρησιμοποιείται συνήθως για την αποσκλήρυνση (νερό υψηλό με ασβέστιο ή με μαγνήσιο) ή την αφαλάτωση του νερού, αλλά χρησιμοποιείται επίσης για την απομάκρυνση άλλων ουσιών από το νερό σε διεργασίες όπως η απολκάλωση, η απιοντοποίηση και η απολύμανση.

Η ανταλλαγή ιόντων περιγράφει μια συγκεκριμένη χημική διαδικασία στην οποία τα ανεπιθύμητα διαλυμένα ιόντα ανταλλάσσονται με άλλα ιόντα με παρόμοιο φορτίο (Σχήμα 2.15). Τα ιόντα είναι άτομα ή μόρια που περιέχουν έναν συνολικό αριθμό ηλεκτρονίων που δεν είναι ίσο με τον συνολικό αριθμό πρωτονίων. Υπάρχουν δύο διαφορετικές ομάδες ιόντων, τα κατιόντα, που είναι θετικά φορτισμένα, και ανιόντα τα οποία είναι αρνητικά φορτισμένα.

Η διαδικασία ανταλλαγής λαμβάνει χώρα μεταξύ ενός στερεού (ρητίνης ή ζεόλιθου) και ενός υγρού (νερού). Στη διαδικασία, οι λιγότερο επιθυμητές ενώσεις αντικαθίστανται με εκείνες που θεωρούνται πιο επιθυμητές. Αυτά τα επιθυμητά ιόντα φορτώνονται στο υλικό ρητίνης. Στην ανταλλαγή κατιόντων κατά την επεξεργασία νερού, τα θετικά φορτισμένα ιόντα που έρχονται σε επαφή με την ρητίνη ανταλλάσσονται με θετικά φορτισμένα ιόντα που είναι διαθέσιμα στην επιφάνεια της ρητίνης, συνήθως νατρίου.

Στη διαδικασία ανταλλαγής ανιόντων, τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα ανταλλάσσονται με αρνητικά φορτισμένα ιόντα στην επιφάνεια της ρητίνης, συνήθως χλωριούχο. Διάφορες μολυσματικές ουσίες συμπεριλαμβανομένων των νιτρικών, φθοριούχων, θεικών και αρσενικού μπορούν να απομακρυνθούν με ανταλλαγή ανιόντων.



Σχήμα 2.15: Απεικόνιση ανταλλαγής ιόντων κατά την διεργασία ion-exchange

Πρόσφατα χρησιμοποιούνται ιονανταλλακτικές ρητίνες για τη δημιουργία πόσιμου νερού. Ειδικές ρητίνες έχουν σχεδιαστεί για να αντιμετωπίζουν διάφορες μολυσματικές ουσίες, όπως το υπερχλωρικό και το ουράνιο. Υπάρχουν πολλές ρητίνες που έχουν σχεδιαστεί για αυτούς τους σκοπούς, όπως η ισχυρή ρητίνη βάσης / ισχυρής ανιόντος, η οποία χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση νιτρικών. Υπάρχουν επίσης σφαιρίδια ρητίνης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μαλάκωμα νερού. Το μέσο ανταλλαγής αποτελείται από μια στερεή φάση (ζεόλιθοι) ή μια συνθετική ρητίνη που έχει ένα κινητό ιόν συνδεδεμένο με ένα ακίνητο λειτουργικό οξύ ή ομάδα βάσης. Και οι δύο ρητίνες ανιόντων και κατιόντων παράγονται από τα ίδια βασικά οργανικά πολυμερή αλλά διαφέρουν στη λειτουργική ομάδα που είναι προσκολλημένη στη ρητίνη. Τα κινητά ιόντα ανταλλάσσονται με ιόντα διαλυμένης ουσίας που έχουν ισχυρότερη συγγένεια με τη λειτουργική ομάδα (π.χ. το ιόν ασβεστίου αντικαθιστά το ιόν νατρίου ή το θεικό ιόν αντικαθιστά το ιόν χλωριδίου). Όταν εξαντληθεί η χωρητικότητα της ρητίνης, είναι απαραίτητο να αναγεννηθεί η ρητίνη χρησιμοποιώντας κορεσμένο διάλυμα για να αποκατασταθεί η χωρητικότητα της ρητίνης και να επιστραφεί η ρητίνη στην αρχική της κατάσταση. Το αλατούχο διάλυμα ή το διάλυμα χλωριούχου νατρίου είναι το πιο κοινά χρησιμοποιούμενο αναγεννητικό, αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα, όπως ισχυρά οξέα (υδροχλωρικό οξύ, θεικό οξύ) ή ισχυρές βάσεις (υδροξείδιο του νατρίου). Στην πράξη, η ανταλλαγή ιόντων είναι μια χρήσιμη διαδικασία για την πλήρη απομετάλλωση νερού σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή καθαρότητα, όπως στους λέβητες υψηλής πίεσης. Δυστυχώς, δεν είναι κατάλληλη για την αφαλάτωση του υφάλμυρου ή θαλάσσιου νερού, απλά επειδή το κόστος είναι απαγορευτικό.

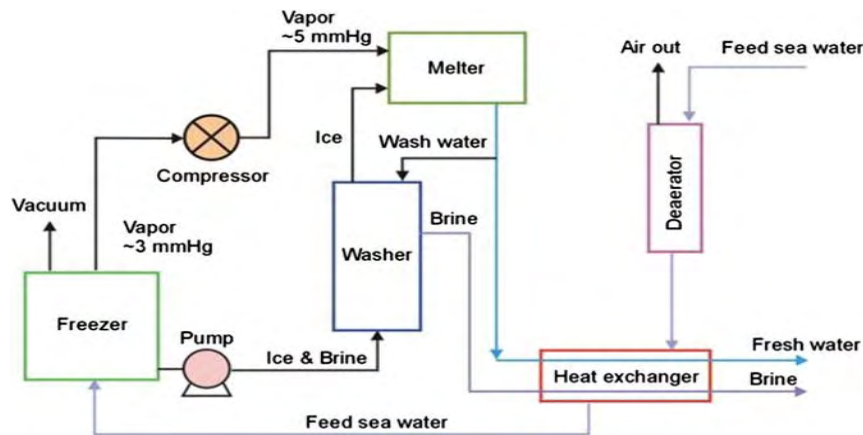
2.3.4.3 Μέθοδος διαχωρισμού με ψύξη (freeze separation)

Εκτεταμένη εμπορική έρευνα διεξήχθη κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1950 και της δεκαετίας του 1960 όσον αφορά την βελτίωση της απόδοσης της διαδικασίας διαχωρισμού με ψύξη (freeze separation). Οι βασικές αρχές της μεθόδου είναι απλές. Κατά τη διάρκεια της μεθόδου διαχωρισμού με ψύξη, απομακρύνονται τα διαλυμένα άλατα στη φάση του σχηματισμού κρυστάλλων πάγου. Πριν προλάβει ολοκληρωθεί η μάζα του νερού να παγώσει ξεπλένεται το μείγμα νερού πάγου ώστε να απομακρυνθούν τα άλατα ή να κολλήσουν στους κρυστάλλους πάγου. Στη συνέχεια ο πάγος τήκεται για να παράγει γλυκό νερό. Οι κύριες διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας είναι το πάγωμα και η τήξη οι οποίες είναι αρκετά αναγεννητικές με αποτέλεσμα την πολύ υψηλή ενεργειακή απόδοση.

Ένας μικρός αριθμός εγκαταστάσεων με χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου έχει κατασκευαστεί τα τελευταία 40 χρόνια, ωστόσο δεν στάθηκε ικανή να εδραιωθεί εμπορικά όπως άλλες μέθοδοι. Το πιο πρόσφατο σημαντικό παράδειγμα αφαλάτωσης με ψύξη ήταν μια πειραματική ηλιακή μονάδα που κατασκευάστηκε στη Σαουδική Αραβία στα τέλη της δεκαετίας του 1980. Προς το παρόν η τεχνολογία αυτή έχει καλύτερες εφαρμογές στην επεξεργασία των βιομηχανικών αποβλήτων παρά στην παραγωγή πόσιμου νερού.

Το παρακάτω σχηματικό διάγραμμα (Σχήμα 2.16) μας δείχνει την διαδικασία έμμεσης ψύξης αναλυτικά.

Το θαλασσινό νερό αρχικά περνά μέσω ενός αποαερωτήρα (Deaerator) (συσκευή που χρησιμοποιείται ευρέως για την απομάκρυνση οξυγόνου και άλλων διαλυμένων αερίων από το νερό τροφοδοσίας) στη συνέχεια αντλείται μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας (Heat exchanger) για να μειώσει τη θερμοκρασία του και εισέρχεται στον θάλαμο ψύξης (Freezer), όπου ψύχεται περαιτέρω στη θερμοκρασία στην οποία σχηματίζονται κρύσταλλοι πάγου. Ο πολτός πάγου και άλμης αντλείται σε μια στήλη πλύσης (Washer) όπου ο πάγος και η άλμη διαχωρίζονται. Ο πάγος μεταφέρεται στην συσκευή τήξης (Melter), όπου τήκεται λόγω της θερμότητας που απελευθερώνεται από τη συμπύκνωση του συμπιεσμένου ψυκτικού μέσου. Ένα μικρό κομμάτι του γλυκού νερού του προϊόντος παρακάμπτεται στη στήλη πλύσης (Melter) και χρησιμοποιείται για την πλύση των κρυστάλλων πάγου ενώ το μεγαλύτερο μέρος περνά μέσα από τον εναλλάκτη θερμότητας (Heat exchanger) για να ψύξει το θαλασσινό νερό και κατόπιν εκφορτώνεται για αποθήκευση. Η άλμη από τη στήλη πλύσης επιστρέφεται στον εναλλάκτη θερμότητας για να ψύξει το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας και απορρίπτεται.



Σχήμα 2.16: Αναλυτική απεικόνιση της μεθόδου διαχωρισμού με ψύξη (freeze separation)

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεθόδου διαχωρισμού με ψύξη

- Τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν χαμηλότερη θεωρητική απαίτηση ενέργειας, ελάχιστο δυναμικό για τη διάβρωση, και λίγη καθίζηση άλατος[8].
- Μπορεί να παράγει πολύ καθαρό πόσιμο νερό και έχει ειδικά πλεονεκτήματα για να παράγει νερό για άρδευση[8]

2.3.5 Υβριδικές μέθοδοι

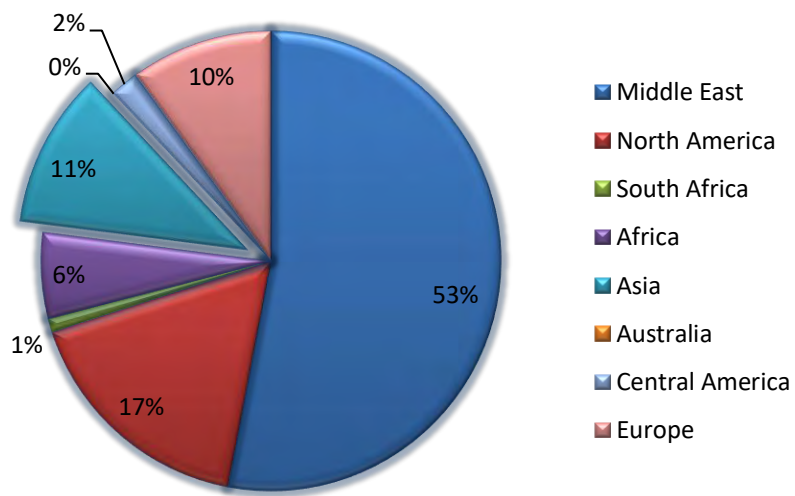
Οι υβριδικές μέθοδοι αφαλάτωσης, αποτελούν συνδυασμό διαφόρων μεθόδων θερμικών διεργασιών και μεμβράνης, οι οποίες λειτουργούν παράλληλα, με σκοπό καλύτερες αποδόσεις στην αφαλάτωση και μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται. Ο συνδυασμός τέτοιου υβριδικού συστήματος χαρακτηρίζεται από ευελιξία κατά τη λειτουργία, λιγότερη ειδική κατανάλωση ενέργειας, χαμηλό κόστος κατασκευής, υψηλή διαθεσιμότητα εγκαταστάσεων[55].

Σύμφωνα με τους Almulla, Hamad και Gadalla[56] δυο τεχνολογίες μπορούν να ενωθούν και να μειωθεί το συνολικό κόστος παραγωγής του νερού και του ηλεκτρισμού όπως και έγινε σε ένα εργοστάσιο που κτίστηκε πρόσφατα στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα. Το συγκεκριμένο εργοστάσιο συνδυάζει δυο από τις θερμικές μεθόδους (Πολυβάθμια εξάτμιση και Πολυβάθμια εκτόνωση) με την αντίστροφη ώσμωση και έχει δυνατότητα παραγωγής 100εκατ. γαλόνια ανά ημέρα, δηλαδή περίπου 400.000 m³ /d. Το συγκεκριμένο αυτό υβριδικό σύστημα χρησιμοποιεί την αντίστροφη ώσμωση κατά 40% στην παραγωγή φρέσκου νερού. Με το σύστημα αυτό η κατανάλωση καυσίμου μειώθηκε σε 115 τόνους/ώρα από 119 τόνους/ώρα, που αυτό αυτόματα αντιστοιχεί σε ετήσια εξοικονόμηση 50-70 εκατ. \$ στο λειτουργικό κόστος. Ακόμα μειώθηκαν οι απαιτήσεις σε νερό τροφοδοσίας από 188.000 m³ /ώρα σε 140.000 m³/ώρα, για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας φρέσκου νερού.

2.4 Συμπεράσματα

Οι τεχνικές αφαλάτωσης έχουν αυξήσει το πεδίο των υδατικών πόρων που είναι διαθέσιμο για μια κοινωνία. Παλαιότερα, για την τροφοδοσία του συστήματος παροχής νερού μιας κοινωνίας είχε ενδιαφέρον μόνο το νερό με περιεχόμενο σε άλατα μικρότερο των 1000 mg/L. Ο περιορισμός αυτός αποτελούσε σοβαρό εμπόδιο, τόσο στην εύρεση θέσης όσο και στο μέγεθος της ανάπτυξης μιας κοινότητας σε όλο τον κόσμο. Αυτό έχει αλλάξει τα τελευταία χρόνια σε πολλά μέρη του κόσμου. Χωριά, πόλεις και βιομηχανίες έχουν τώρα αναπτυχθεί και αυξηθεί σε πολλές από τις ξηρές ή άνυδρες περιοχές του κόσμου εκεί όπου θαλάσσιο ή υφάλμυρο νερό είναι διαθέσιμο. Αυτό σε συνδυασμό με το ότι η αφαλάτωση του θαλασσινού νερού αναπτύσσεται γρήγορα προβλέπεται ότι στο μέλλον θα διαδραματίσει ακόμα πιο σημαντικό ρόλο στην παροχή πόσιμου νερού.

Η αφαλάτωση αυξάνεται ιδιαίτερα στις περιοχές του κόσμου υπό χαμηλή διαθεσιμότητα νερού. Η ετήσια ικανότητα αφαλάτωσης φαίνεται να αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς, που αφορούσαν τις υπάρχουσες μονάδες αφαλάτωσης καθώς και τις υπό ανέγερση εγκαταστάσεις. Για παράδειγμα, η ετήσια αύξηση του αφαλατωμένου νερού ήταν έξι φορές υψηλότερη το 2007, σε σύγκριση με το 1997. Το 2000, η παγκόσμια παραγωγική ικανότητα μονάδων αφαλάτωσης εκτιμήθηκε σε 22.000.000 m³/d. Το 2008, η συνολική ημερήσια δυναμικότητα ήταν 52.333.950 m³/ d, ενώ αν λάβουμε υπόψη τα εργοστάσια αφαλάτωσης, η χωρητικότητα ανήλθε σε 62.750.220 m³/d. Την ίδια χρονιά, περίπου 14.000 εγκαταστάσεις αφαλάτωσης λειτουργούσαν σε παγκόσμιο επίπεδο. Το 2011 η συνολική δυναμικότητα ήταν περίπου 67.000.000 m³/d, ενώ στο 2012 εκτιμήθηκε σε περίπου 79.000.000m³/d. Το 2012, υπήρχαν περίπου 16.000 μονάδες αφαλάτωσης παγκοσμίως. Η περιοχή του Κόλπου (Μέση Ανατολή) φιλοξενεί την κύρια ποσότητα εγκαταστάσεων αφαλάτωσης στον κόσμο, ακολουθούμενη από τη Μεσόγειο, τη Νότια, τη Βόρεια και Κεντρική Αμερική και την Ασία (Σχήμα 2.17).



Σχήμα 2.17: Παγκόσμια κατανομή μονάδων αφαλάτωσης ανά ηπείρους [9]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

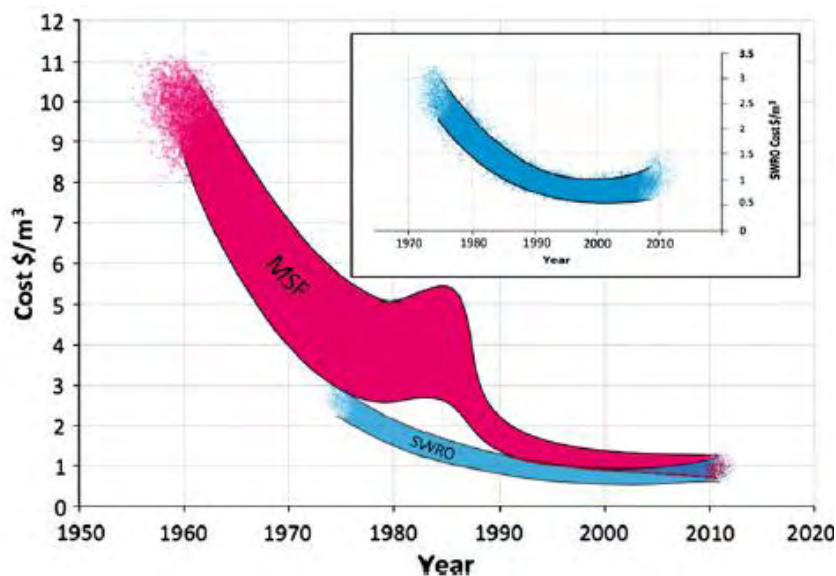
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

3.1 Ιστορική περιγραφή της εξέλιξης του κόστους στις μονάδες αφαλάτωσης

Η ιστορία των εκτιμήσεων κόστους της αφαλάτωσης είναι περίπου τεσσαράρων δεκαετιών. Όταν η αφαλάτωση ξεκίνησε στα τέλη του 1850, το κόστος δεν ήταν το ίδιο δεδομένου ότι η κύρια πρόκληση ήταν η παραγωγή γλυκού νερού από το θαλασσινό νερό για λέβητες και πόσιμο νερό σε πλοία. Μέχρι τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, χρησιμοποιήθηκαν εκατοντάδες κινητές μονάδες αφαλάτωσης MED και της μεθόδου απόσταξης με συμπίεση ατμών VC αλλά το κόστος του αφαλατωμένου νερού ήταν αρκετά υψηλό για εκείνη την εποχή. Αργότερα στα μέσα της δεκαετίας του 1960 και της δεκαετίας του 1970 κατασκευάστηκαν αρκετές μονάδες αφαλάτωσης χρησιμοποιώντας της μεθόδους MSF, MED, VC, ED και της αντίστροφης ώσμωσης RO καθώς λόγω των τεχνολογιών τους βελτιώσεων, είχαν γίνει πλέον εμπορικά διαθέσιμες, ωστόσο το κόστος παρά τις προσπάθειες που έγιναν ήταν ακόμα υψηλό. Μετά τα μέσα της δεκαετίας του '70 το κόστος του πετρελαίου αυξήθηκε πολύ έντονα, επηρεάζοντας ισχυρά το κόστος αφαλάτωσης ειδικά σε διεργασίες με υψηλή ειδική κατανάλωση ενέργειας. Έτσι έγιναν έντονες προσπάθειες σε πολλά μέρη του κόσμου για να στραφούν από την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού με απόσταξη στην αφαλάτωση υφάλμυρου νερού χρησιμοποιώντας της μεθόδους ED και της αντίστροφης ώσμωσης δυναμικότερα. Οι διεργασίες μεμβρανών άρχισαν να ανταγωνίζονται την αγορά αρχές της δεκαετίας του 1970 όπου και ξεκίνησε η τάση για μείωση του κόστους τους. Ως το 1975 το κόστος αφαλάτωσης έφτασε περίπου τα 2.10\$/m³. Στη δεκαετία του '90 μετά από πολύ σημαντικές βελτιώσεις στην τεχνολογία SWRO (αντίστροφης ώσμωσης θαλασσινού νερού), η SWRO έγινε, στις περισσότερες των περιπτώσεων η προτιμώμενη διαδικασία αφαλάτωσης θαλασσινού νερού, με συνεχή μείωση του κόστους, από περίπου 1,25-1,50 \$/m³, σε ένα ποσό περίπου 0,5 \$/m³ για μονάδες μεγάλης δυναμικότητας[11].

Ένα μέρος της μείωσης του κόστους οφείλεται στη μεταβολή των μακροοικονομικών παραμέτρων, όπως π.χ. οι χαμηλότερες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και σε αλλαγές στην προσέγγιση του έργου με τη δημοσίευση διεθνών προσφορών και την παραχώρηση και την κατασκευή του έργου με χρήση διαφόρων μορφών συμβάσεων παραχώρησης όπως Β.Ο.Τ

ή άλλες παρόμοιες διαδικασίες. Τέλος ο ανταγωνισμός μεταξύ των εταιρειών αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τη μείωση του κόστους. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η απότομη μείωση του κόστους για τις διεργασίες της MSF και SWRO που αναφέρθηκαν πιο πάνω (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Τάσεις του κόστους για τις διεργασίες MSF και SWRO[53]

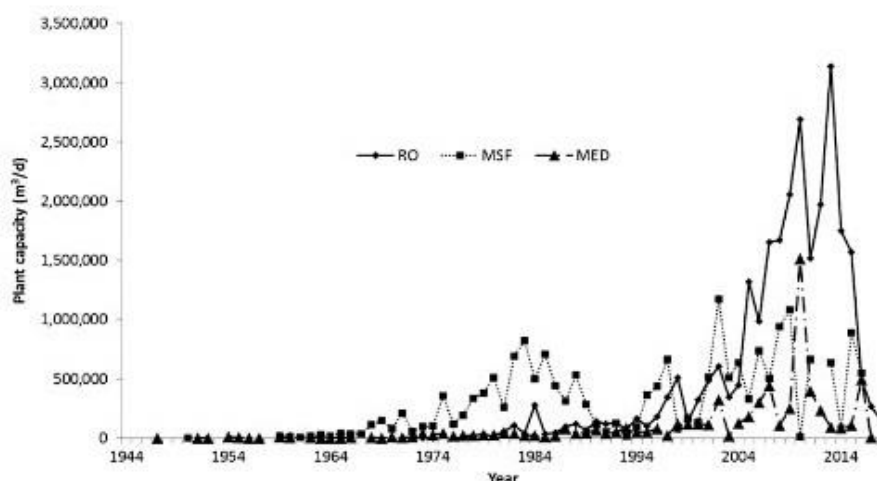
Αυτό που μπορεί όμως να ειπωθεί με βεβαιότητα είναι ότι, εξαιτίας των τεχνολογικών βελτιώσεων τόσο το ύψος των απαιτούμενων κεφαλαίων όσο και το λειτουργικό κόστος της αφαλάτωσης τείνει να μειωθεί με το χρόνο, παρά το γεγονός ότι οι κατά καιρούς αυξήσεις των τιμών της ενέργειας αυξάνουν το κόστος παραγωγής. Κατά το ίδιο διάστημα το κόστος της επεξεργασίας νερού από συμβατικές πηγές τείνει να αυξηθεί λόγω των αυξημένου επιπέδου επεξεργασιών που απαιτούνται προκειμένου να πληρούνται τα πρότυπα ποιότητας του νερού σε υψηλότερο βαθμό. Οι τρόποι με τους οποίους οι τεχνολογικές εξελίξεις συμβάλλουν στη μείωση του κόστους κεφαλαίου της ενέργειας και του λειτουργικού κόστους και τους οποίους θα εξετάσουμε αναλυτικότερα στη συνέχεια του κεφαλαίου περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω[11]:

- για το κόστος κεφαλαίου: βελτιωμένες μεμβράνες με χαμηλότερο κόστος και κόστος εξοπλισμού.
- για το Κόστος ενέργειας: βελτιωμένη απόδοση σε αντλίες υψηλής πίεσης μεγάλου μεγέθους και συστημάτων ανάκτησης ενέργειας, μαζί με υψηλότερη διαπερατότητα μεμβράνης RO που εκφράζεται σε μειωμένη ειδική ενεργειακή απαίτηση.
- για το Κόστος λειτουργίας και συντήρησης O&M: μειωμένο κόστος αντικατάστασης μεμβράνης, χαμηλότερο κόστος προ-επεξεργασίας, χαμηλότερο κόστος των χημικών προ-επεξεργασίας, και του κόστους εργασίας και συντήρησης.

3.2 Παγκόσμια «ικανότητα» αφαλάτωσης και τάσεις

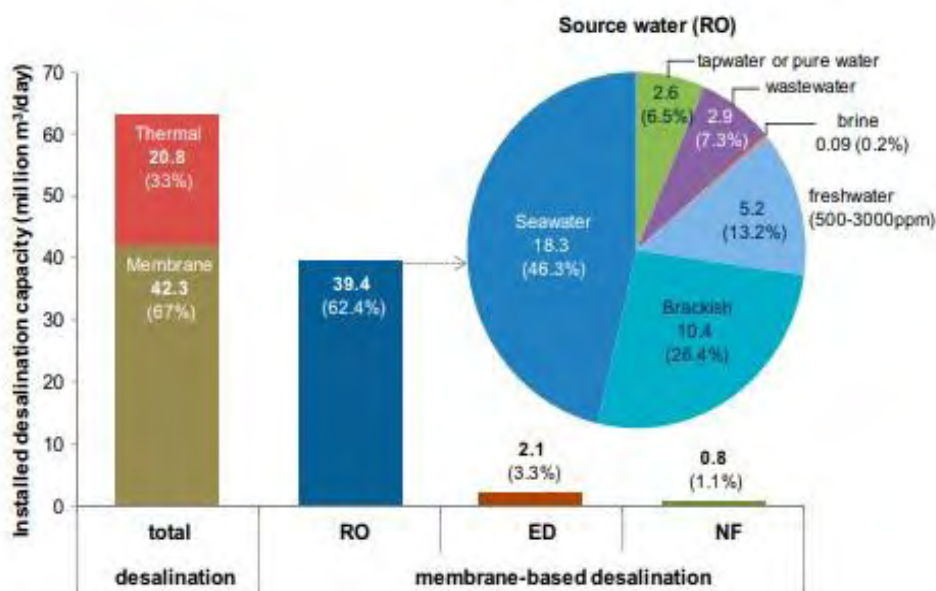
Σε παγκόσμιο επίπεδο σε πολλές άνυδρες περιοχές του πλανήτη πολλές χώρες για να ανταποκριθούν στην αυξημένη ζήτηση νερού λόγω αύξησης του πληθυσμού, για βιομηχανική εξέλιξη για τον τουρισμό και την ανάπτυξη της γεωργίας έχουν οδηγηθεί στην ανάπτυξη, μελέτη και εγκατάσταση εργοστασίων αφαλάτωσης για να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα. Σε χώρες της Μέσης Ανατολής που το πρόβλημα της έλλειψης νερού είναι πολύ πιο έντονο, όπως το Κατάρ και το Κουβέιτ, βασίζονται 100% στην αφαλάτωση του νερού τόσο σε οικιακό όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο, αλλά και σε χώρες όπου η αφαλάτωση ήταν αδιανόητη στο παρελθόν όπως στην Ισπανία και την Αυστραλία έχει αναπτύξει πρόσφορο έδαφος.

Οι θερμικές διεργασίες αφαλάτωσης χρησιμοποιήθηκαν ευρέως πριν από τη δεκαετία του 1990 προτού οι τεχνολογίες μεμβρανών αρχίζουν να κερδίζουν σε δημοτικότητα. Συγκεκριμένα οι θερμικές διεργασίες αφαλάτωσης (δηλαδή MED, MSF, VC) εφαρμόζονται κυρίως σε χώρες πλούσιες σε ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο και λοιπά), ενώ η διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά στον υπόλοιπο κόσμο. Η αντίστροφη ώσμωση RO είναι κυρίαρχη τεχνολογία αφαλάτωσης θαλασσινού νερού (Σχήμα 3.2) σήμερα και εφαρμόζεται ευρέως τόσο για την παραγωγή πόσιμου νερού όσο και για την παραγωγή νερού για βιομηχανική χρήση. Η ταχεία ανάπτυξη της μεθόδου της RO τελευταία χρόνια οφείλεται όχι μόνο στην αύξηση της ζήτησης νερού, αλλά επίσης και στο μειούμενο κόστος παραγωγής του νερού.



Σχήμα 3.2: Απεικόνιση συνολικής «ικανότητας» παραγωγής των μονάδων αφαλάτωσης ανά τεχνολογία (MSF, MED, RO) ανά έτος

Συγκεκριμένα η συνολική εγκατεστημένη χωρητικότητα των μονάδων αφαλάτωσης έφτασε περίπου τα 60 εκατ. m³ ημερησίως το 2013 όπου το 67% που παράχθηκε προερχόταν από τις μεθόδους μεμβρανών και το 33% από θερμικές διεργασίες. Το υπό επεξεργασία νερό με χρήση της μεθόδου με αντίστροφη ώσμωση είναι περίπου 46% θαλασσινό νερό και 26,5% προέρχεται από υφάλμυρες πηγές υπογείων υδάτων και το υπόλοιπο ποσοστό από τα επιφανειακά ύδατα και υγρά απόβλητα (Σχήμα 3.3),[12]. Το 2017 συνολική εγκατεστημένη χωρητικότητα ανήλθε περίπου στα 92,5 εκατ. m³/d (ημερησίως) με συνολικό αριθμό εγκατεστημένων μονάδων αφαλάτωσης παγκοσμίως να ανέρχεται σε 19,370 μονάδες αφαλάτωσης έναντι 18,983 το 2016[37] .

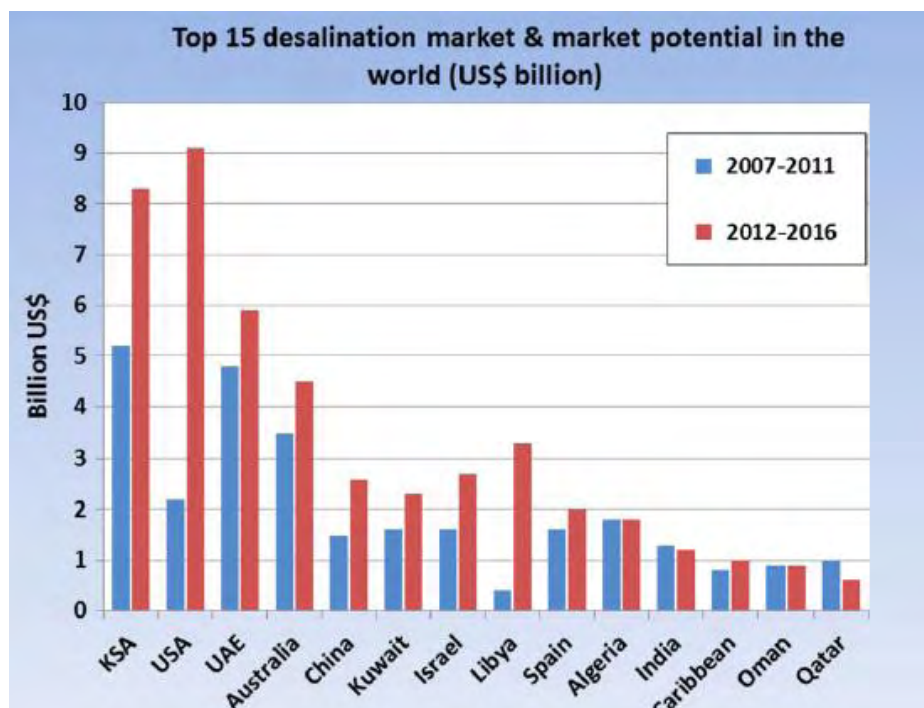


Σχήμα 3.3: Παγκόσμια δυναμικότητα αφαλάτωσης ανά διεργασία και είδος νερού επεξεργασίας για την RO[12]

Η αύξηση της δυναμικότητας των μονάδων αφαλάτωσης προκαλείται κυρίως όχι μόνο από την αύξηση της ζήτησης νερού, αλλά και από τη σημαντική μείωση στο κόστος αφαλάτωσης ως αποτέλεσμα σημαντικών τεχνολογικών εξελίξεων που έχουν ως αποτέλεσμα να καταστήσουν το αφαλατωμένο νερό ακόμα πιο ανταγωνιστικό . Εγκαταστάσεις αφαλάτωσης υπάρχουν σε πάνω από 150 χώρες σε όλο τον κόσμο. Ιστορικά, η αφαλάτωση για μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεων ξεκίνησε στις χώρες του περσικού κόλπου (Gulf countries) όπου δεν υπάρχει εναλλακτική λύση για δημόσια παροχή νερού λόγω έντονης λειψυδρίας. Ο συνδυασμός αφαλάτωσης με μεμβράνες χαμηλότερου κόστους και λόγω των έντονης λειψυδρίας σε παγκόσμιο επίπεδο οδήγησε στο να χτίζονται πλέον μεγάλα εργοστάσια

αφαλάτωσης και εκτός του Κόλπου. Το μεγαλύτερο εργοστάσιο αφαλάτωσης μεμβρανών στον κόσμο τέθηκε σε λειτουργία στην Victoria Melbourne Australia (Αυστραλία) με παραγωγή 444.000m³/d (ημέρα) .Το μεγαλύτερο εργοστάσιο θερμικής αφαλάτωσης στον κόσμο είναι το εργοστάσιο αφαλάτωσης στο Αλ Σουάιμπα της Σαουδικής Αραβίας με παραγωγή 880.000m³/d, αν και αυτό εκτοπίστηκε το 2014 ως το μεγαλύτερο εργοστάσιο αφαλάτωσης στον κόσμο από το έργο Ras Al Khair στην Σαουδική Αραβία ύψους 1.025.000m³/d , η οποία χρησιμοποιεί τόσο μεμβράνη όσο και θερμική τεχνολογία.

Στο παρακάτω (Σχήμα 3.4) παρουσιάζονται οι κορυφαίες 15 αγορές αφαλάτωσης για εννέα χρόνια από το 2007 έως το 2016. Οι Ηνωμένες Πολιτείες έχουν δείξει τη μεγαλύτερη αύξηση της εγκατεστημένης δυναμικότητας από το 2012.



Σχήμα 3.4: Μερίδιο αγοράς αφαλάτωσης 2007 – 2016[13]

3.3 Κριτήρια επιλογής μεθόδων

Η επιλογή της μεθόδου αφαλάτωσης εξαρτάται από πολλούς διαφορετικούς παράγοντες[16],[23]. Οι σημαντικότεροι από αυτούς σχετίζονται με:

1.Χαρακτηριστικά του νερού τροφοδοσίας:

Ο τύπος και συγκέντρωση σε άλας των υδάτων τροφοδοσίας, του θαλασσινού νερού (seawater), του υφάλμυρου (brackish water) και των απόβλητων. Χαρακτηριστικά του νερού τροφοδοσίας που επηρεάζουν την καταλληλότητα ενός συστήματος αφαλάτωσης είναι η συγκέντρωση των διαλυμένων αλάτων, η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας, το Ph. Για θαλασσινό νερό συμφέρει να επιλέξουμε κάποια θερμική διεργασία ή την αντιστροφή ώσμωση, ενώ για υφάλμυρο νερό είναι πιο κατάλληλες οι διεργασίες των μεμβρανών γενικότερα. Όσον αφορά τις διεργασίες μεμβράνης, η ηλεκτροδιάλυση συνιστάται για νερό με χαμηλή συγκέντρωση άλατος, ενώ πρέπει να αναφερθεί πως για τις διεργασίες αυτές απαιτείται προετοιμασία του νερού για την αποφυγή της καταστροφής των μεμβρανών. Η προεργασία αυτή έχει ως επακόλουθο την αύξηση του κόστους των διεργασιών μεμβράνης.

2.Ποιότητα του παραγόμενου νερού:

Το παραγόμενο νερό είναι ένας σημαντικός παράγοντας συγκρίνοντας τις διάφορες τεχνολογίες αφαλάτωσης. Κατά τις θερμικές λοιπόν διεργασίες, παράγεται νερό με ιδιαίτερα χαμηλή περιεκτικότητα σε άλατα, σχεδόν αποσταγμένο και κυμαίνεται μεταξύ 5 και 50 ppm συνολικών διαλυμένων στερεών (TDS). Στις μεθόδους μεμβρανών, το νερό καταλήγει να έχει μεγαλύτερη συγκέντρωση σε άλατα, ωστόσο παραμένει στα επιθυμητά όρια που χαρακτηρίζουν το νερό πόσιμο μεταξύ 100 έως 1000 ppm.

3.Η πηγή ενέργειας και η περιοχή εγκατάστασης (διαθέσιμος

χώρος):

Η τοποθεσία της εγκατάστασης μια μονάδας αφαλάτωσης σε συνδυασμό με την διαθεσιμότητα και τη μορφή της ενέργειας που διατίθεται διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην επιλογή της διαδικασίας αφαλάτωσης. Εάν υπάρχει πλεονάζουσα θερμική ενέργεια από υπάρχον ή νέο σταθμό, τότε προτιμάται η θερμική διαδικασία. Άλλες μορφές ενέργειας που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι ηλεκτρική, ηλιακή ενέργεια, αιολική και τέλος η πυρηνική.

4. Ικανότητα παραγωγής νερού (δυναμικότητα της μονάδας):

Η ποσότητα του ύδατος που απαιτείται να παράγεται ανά ημέρα σε μία εγκατάσταση αφαλάτωσης, αποτελεί κομβικό παράγοντα κατά την επιλογή της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί, ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες της περιοχής όπου θα γίνεται η χρήση του. Οι θερμικές διεργασίες και συγκεκριμένα η απόσταξη έχουν την δυνατότητα παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων νερού ανά ημέρα σε μονάδες αφαλάτωσης ενώ οι διεργασίες μεμβρανών προτιμούνται γενικά για πιο μικρή παραγωγή. Ωστόσο οι μέθοδοι που κάνουν χρήση μεμβρανών μπορούν να προσαρμοστούν σε οποιαδήποτε μέγεθος παραγωγής ζητείται. Άρα η μέθοδος της αντιστροφής όσμωσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μικρή και σε μεγάλη κλίμακα. Στον πίνακα στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι τυπικές μέγιστες ικανότητες παραγωγής νερού από τις προαναφερόμενες μεθόδους.

Μέθοδος	Τυπικές μέγιστες ικανότητες παραγωγής νερού (m ³ /d)
MSF	5000-60000
MED	5000-20000
VC	2400
RO	128000

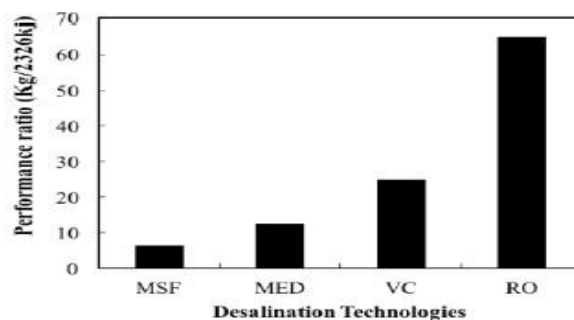
Πίνακας 3.1: Τυπικές μέγιστες τιμές εύρους παραγωγής νερού ανά διεργασία

5. Το συνολικό κόστος:

Το κόστος διαδραματίζει βασικό παράγοντα στην διαδικασία επιλογής μιας συγκεκριμένης μεθόδου αφαλάτωσης. Τα στοιχεία κόστους περιλαμβάνουν το κεφάλαιο, που σχετίζεται με την ενέργεια τον εξοπλισμό, τα αναλώσιμα, την εργασία και τη συντήρηση και αντικατάσταση και την λειτουργία.

6. Λόγος απόδοσης:

Αποτελεί ένα αρκετά σημαντικό παράγοντα για την επιλογή της κατάλληλης διεργασίας. Όπως φαίνεται (Εικόνα 3.5) η διεργασία μεμβράνης RO παρουσιάζει το υψηλότερο βαθμό απόδοσης συγκριτικά με τις θερμικές διεργασίες με (από 30-100Kg/2326kj) και 6.4Kg/2326kj αντίστοιχα.



Σχήμα 3.5: Λόγος απόδοσης για διεργασίες αφαλάτωσης MSF, MED, VC, RO

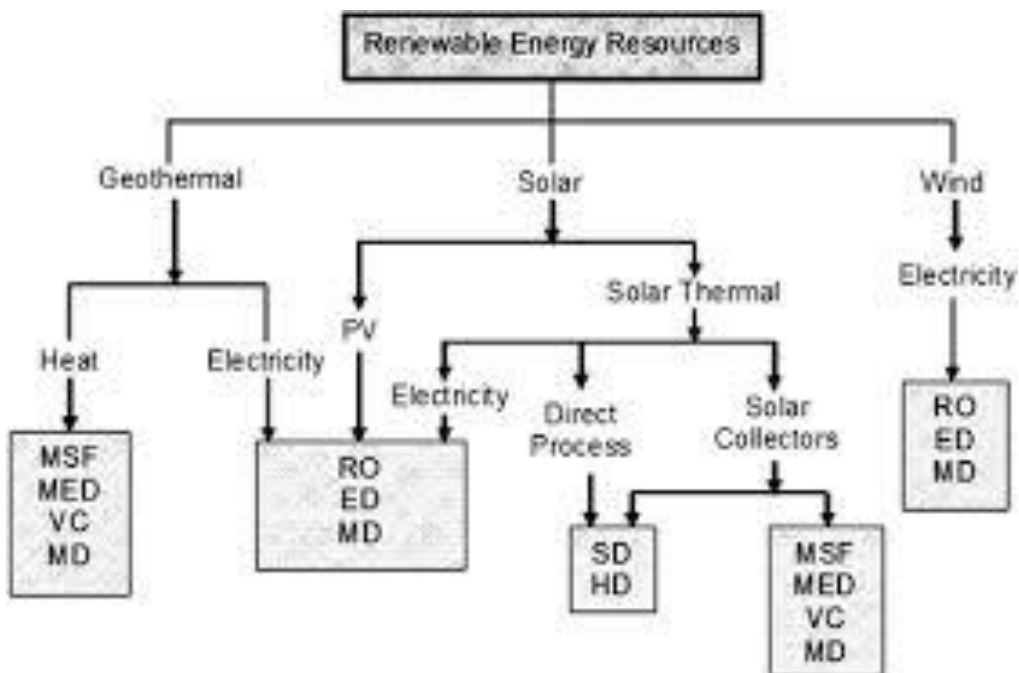
7.Περιβαλλοντικές απαιτήσεις:

Κατά τη διάρκεια των προκαταρκτικών μελετών για την επιλογή της διαδικασίας, οι υπεύθυνοι σχεδιασμού πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις απαιτήσεις που επιβάλλονται από το περιβάλλον ή τις τοπικές αρχές. Τέτοιες απαιτήσεις περιλαμβάνουν, την απόρριψη άλμης η οποία θα πρέπει να υποστεί σωστή επεξεργασία για να μειωθούν οι βλαβερές συνέπειες της στο περιβάλλον καθώς το απόβλητο άλμη που παράγεται από τα εργοστάσια αφαλάτωσης περιέχει υψηλές ποσότητες αλατιού. Επίσης θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη τα υψηλά επίπεδα θορύβου, οι χημικοί κίνδυνοι κατά την διεργασία, και οι εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα καθώς όλα αυτά έχουν σοβαρό αντίκτυπο τόσο στο φυσικό όσο και στο βιοτικό περιβάλλον.

3.4 Ενεργειακές πηγές αφαλάτωσης και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

«Οι εγκαταστάσεις αφαλάτωσης, αναλόγως με τη διεργασία που διατίθεται, χρησιμοποιούν είτε θερμική ενέργεια (θερμικές διεργασίες), είτε ηλεκτρική (ηλεκτροδιάλυση), είτε μηχανική ενέργεια (αντίστροφη ώσμωση). Πιο συνηθισμένα γίνεται χρήση ατμού χαμηλής πίεσης ή ηλεκτρικού ρεύματος χαμηλής τάσης, ενώ πολλές περιπτώσεις γίνεται εκμετάλλευση του απορριπτόμενου ατμού κυρίως από τα θερμοηλεκτρικά εργοστάσια. Έτσι έχουμε ένα είδος συμπαραγωγής από το οποίο μπορεί να εξοικονομηθεί ενέργεια. Η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται σε πολλές περιπτώσεις από συμβατικά δίκτυα, όπως με καύση λιγνίτη ή ντιζελογεννήτριες. Τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα αναπτυσσόμενα θεωρούνται τα συστήματα εκμετάλλευσης των *Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας* σε πολλές εγκαταστάσεις αφαλάτωσης. Τέτοια συστήματα εκμεταλλεύονται κυρίως την ηλιακή ενέργεια (ηλιακά θερμικά συστήματα ή φωτοβολταϊκά για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού) και την αιολική ενέργεια (ανεμογεννήτριες κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας). Επίσης, δεν αποκλείεται και η χρήση άλλων μορφών, όπως η γεωθερμική ενέργεια, με γεωθερμικά συστήματα για την παραγωγή ηλεκτρισμού ρεύματος ή θερμότητας. Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν επιβαρύνει το περιβάλλον κι επιπλέον η ενεργειακή πηγή δεν εξαντλείται, όπως συμβαίνει με τα συμβατικά καύσιμα. Τα συστήματα αυτά αν και στις περισσότερες περιπτώσεις διακρίνονται από μεγάλο κόστος εγκατάστασης, αποσβένουν τις δαπάνες σε σύντομο χρονικό διάστημα ,απαλλάσσοντας τις μονάδες αφαλάτωσης από το κόστος της ενέργειας, που συνήθως αποτελεί και το υψηλότερο λειτουργικό κόστος. Η επιλογή του κατάλληλου κάθε φορά συνδυασμού τεχνολογίας αφαλάτωσης κι ενεργειακής πηγής, εξαρτάται από πλήθος διαφορετικών παραγόντων, με πιο σημαντικούς τη

δυναμικότητα της μονάδας, την αλατότητα του προς αφαλάτωση ύδατος, την προσβασιμότητα της περιοχής της εγκατάστασης, την ύπαρξη ή όχι σύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο παροχής ενέργειας αλλά και τις διαθέσιμες μορφές ΑΠΕ στην περιοχή της εγκατάστασης. Επομένως, παρόλο που οι συνδυασμοί των τεχνολογιών αφαλάτωσης με τις αντίστοιχες ΑΠΕ είναι θεωρητικά πολλοί και κάθε φορά για την κατάλληλη επιλογή τους θα πρέπει να εξετάζεται μια πληθώρα παραμέτρων, καθώς υπάρχουν κάποιοι συνδυασμοί αφαλάτωσης-ΑΠΕ ιδιαίτερα αποδοτικοί. Αυτοί συνίστανται κυρίως για αυτόνομες εγκαταστάσεις σε απομονωμένες περιοχές, ώστε να παρέχονται επαρκείς ποσότητες ενέργειας και νερού σε πιο ικανοποιητικές τιμές κόστους. Παρατηρείται λοιπόν ότι η ηλιακή ενέργεια συνδυάζεται κατάλληλα με την Ακαριαία απόσταξη πολλαπλών βαθμίδων (MSF), την Απόσταξη πολλαπλής επίδρασης (MED), την Αντίστροφη ώσμωση αλλά και την Ηλεκτροδιάλυση (ED). Επίσης, η ενέργεια που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες μπορεί να συνδυαστεί με τις τεχνολογίες της Απόσταξης με συμπίεση ατμών, της Αντίστροφης ώσμωσης και της Ηλεκτροδιάλυσης. Τέλος, οι γεωθερμικές πηγές χαμηλής θερμοκρασίας μπορούν να τροφοδοτήσουν με ενέργεια τις τεχνολογίες των MSF και MED, ενώ οι πηγές υψηλής ενθαλπίας και πίεσης χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μηχανικής ή ηλεκτρικής ενέργειας για την τροφοδότηση των τεχνολογιών VC,RO και ED (Σχήμα 2.6)».



Σχήμα 3.6: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τεχνολογίες αφαλάτωσης[40]

3.5 Κατανάλωση ενέργειας των κυριότερων διεργασιών αφαλάτωσης

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των διεργασιών αφαλάτωσης είναι οι μεγάλες απαιτήσεις ενέργειας, οι οποίες κατά ένα μεγάλο αριθμό μονάδων καλύπτονται από συμβατικές πηγές ενέργειας (ορυκτά καύσιμα). Οι μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούνται στην αφαλάτωση είναι η θερμική, η ηλεκτρική και η μηχανική. Δύο τύποι ενέργειας απαιτούνται για τις περισσότερες θερμικές διεργασίες (MSF, MED, και TVC) η ηλεκτρική ενέργεια και η θερμική ενέργεια η οποία αντιπροσωπεύει το κυριότερο μέρος της ενέργειας που χρειάζεται η διεργασία για να λειτουργήσει επαρκώς εκτός από την διεργασία με μηχανική συμπίεση ατμού (MVC) που απαιτείται μόνο ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης για τις διεργασίες μεμβρανών η ηλεκτρική ενέργεια είναι η μόνη μορφή ενέργειας που καταναλώνεται. Συγκεκριμένα για την πιο απλή διεργασία απόσταξης με εξάτμιση ενός σταδίου απαιτούνται τεράστια ποσά ενέργειας. Μόνο και μόνο για τον βρασμό του νερού απαιτούνται 650 kWh/m³ νερού. Ωστόσο για τις κύριες θερμικές διεργασίες MSF και MED τα πράγματα είναι πιο απλά καθώς με την χρήση πολλαπλών σταδίων καταφέρνουν και μειώνουν τις απαιτήσεις σε ενέργεια. Υπάρχουν πολλοί και διαφορετικοί παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας στις διάφορες διεργασίες αφαλάτωσης όπως είναι η δυνατότητα παραγωγής αφαλατωμένου νερού της εκάστοτε μονάδας τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό της καθώς και η ποιότητα του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας. Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 3.2) αποτυπώνονται οι απαιτήσεις σε ενέργεια των κύριων μεθόδων αφαλάτωσης σε συνδυασμό με την δυναμικότητα της παραγωγής, καθώς και την ποιότητα αφαλατωμένου νερού που παράγεται. [15]

Διεργασία αφαλάτωσης	Νερό τροφοδοσίας	Ηλεκτρική κατανάλωση ενέργειας σε kWh/m ³	Θερμική κατανάλωση ενέργειας σε KJ/m ³	Ηλεκτρική ισодυναμία για θερμική ενέργεια σε kWh/m ³	Συνολική κατανάλωση Ηλεκτρικής ενέργειας σε kWh/m ³	Παραγωγή προϊόντος σε m ³ /ημέρα	Ποιότητα παραγόμενου νερού σε (ppm)
MSF	θαλασσινό	25-50	190-282	15.83-23.5	19.58-27.25	5,000-60,000	≈10
MED	θαλασσινό	2-25	145-230	12.2-19.1	14.45-21.35	5,000-20,000	≈10
MVC	θαλασσινό	7-12	NONE	NONE	7-12	100-3,000	≈10
TVC	θαλασσινό	1.6-1.8	227	14.5	16.26	10,000-30,000	≈10
SWRO	θαλασσινό	4-6 with energy recovery	NONE	NONE	4-6	Up to 128,000	400-500
BWRO	υφάλμυρο	12-25	NONE	NONE	1.5-2.5	Up to 98,000	200-500
ED	υφάλμυρο	2.64-5.5	NONE	NONE	2.64-5.5, 0.7-2.5 low TDS	2,000-145,000	150-500

Πίνακας 3.2: Απεικόνιση των απαιτήσεων σε ενέργεια των κύριων μεθόδων αφαλάτωσης[15]

Όπως γίνεται αντιληπτό συγκρίνοντας την ενεργειακή κατανάλωση των βασικότερων διεργασιών αφαλάτωσης της MSF, MED και RO (reverse osmosis) παρατηρούμε ότι οι θερμικές διεργασίες απαιτούν περισσότερη ενέργεια συγκριτικά με την διεργασία της αντιστροφής ώσμωσης (RO). Συγκεκριμένα από 19.5 έως 27.25 kWh/m³ νερού για την Πολυβάθμια Εκτόνωση MSF και 14.45 έως 21.35 kWh/m³ νερού για την Πολυβάθμια Εξάτμιση MED σε αντίθεση με την SWRO (sea water reverse osmosis) με σύστημα ανάκτησης ενέργειας που απαιτούνται μόλις 4 έως 6 kWh/m³ νερού. Για την αφαλάτωση υφάλμυρου νερού οι δύο πιο συνηθισμένες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι αυτής της αντιστροφής ώσμωσης BWRO(brackish water RO) η οποία θεωρείται περισσότερο κοστοβόρα μέθοδος για TDS (total dissolved solids) περισσότερα από 5000ppm σε αντίθεση με τη μέθοδο της ηλεκτροδιάλυσης ED η οποία για TDS πάνω από 5000ppm του νερού τροφοδοσίας χρζζει οικονομικά πιο συμφέρουσα. Η κατανάλωση σε ενέργεια που απαιτείται όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα είναι γύρω στο 1.5 έως 2.5 kWh/m³ για BWRO και 0.7 έως 2.5kWh/m³ για TDS του νερού τροφοδοσίας λιγότερο από 2500ppm και 2.64 έως 5.5 kWh/m³ για περισσότερα αντίστοιχα.[15]

3.6 Οικονομική ανάλυση διεργασιών αφαλάτωσης

Το κόστος είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην εφαρμογή των τεχνολογιών αφαλάτωσης. Αυτή η ενότητα παρέχει μια επισκόπηση των παραγόντων που καθορίζουν το κόστος αφαλάτωσης, διάφορα κόστη παραγόντων και το κατά προσέγγιση κόστος των κυριότερων διεργασιών αφαλάτωσης που βασίζεται σε ανασκόπηση των μελετών περιπτώσεων και της διαθέσιμης βιβλιογραφίας.

3.6.1 Παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος αφαλάτωσης

Αρκετοί παράγοντες επηρεάζουν το κόστος αφαλάτωσης. Το κόστος του προϊόντος της μονάδας εξαρτάται από αρκετούς σχεδιασμούς και λειτουργικές μεταβλητές εκ των οποίων οι σημαντικότεροι παρουσιάζονται παρακάτω [17],[53]:

- **Η ποιότητα του νερού τροφοδοσίας:** Χαμηλή συγκέντρωση TDS (total dissolved solids) στο νερό τροφοδοσίας (π.χ. υφάλμιμο νερό) απαιτεί λιγότερη ενέργεια για «θεραπεία» σε σύγκριση με το υψηλό TDS νερό τροφοδοσίας (θαλασσινό νερό). Το χαμηλό TDS έχει ως αποτέλεσμα το εκάστοτε εργοστάσιο να μπορεί να λειτουργήσει με χαμηλότερη ειδική ισχύ κατανάλωσης και δοσολογία των χημικών ουσιών για την αφαίρεση των αλάτων.
- **Χωρητικότητα της Εγκατάστασης:** Είναι πολύ σημαντική όσον αφορά τον παράγοντα σχεδιασμού της εγκατάστασης. Επηρεάζει το μέγεθος των μονάδων επεξεργασίας, αντλίες, δεξαμενή διανομής νερού και το σύστημα διανομής νερού. Τα εργοστάσια μεγάλης χωρητικότητας απαιτούν υψηλή αρχική τιμή κεφαλαίου επένδυσης σε σύγκριση με εργοστάσια χαμηλής παραγωγικής ικανότητας.
- **Χαρακτηριστικά τοποθεσίας:** Τα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας μπορούν να επηρεάζουν το κόστος παραγωγής νερού. Για παράδειγμα, η διαθεσιμότητα της γης και της κατάστασης της γης μπορεί καθορίσει το κόστος. Το κόστος άντλησης θα μειωθεί σημαντικά εάν η εγκατάσταση βρίσκεται κοντά στην πηγή νερού. Επίσης η εγκατάσταση νέων μονάδων σε ήδη υφιστάμενες εγκαταστάσεις, θα εξαιλεί το κόστος που σχετίζεται με εξοπλισμούς για μεταφορά τροφοδοτικού νερού, απόρριψη της άλμης και προ-επεξεργασίας του νερού τροφοδοσίας
- **Ειδικευμένο προσωπικό:** η ύπαρξη ειδικευμένων χειριστών, μηχανικών και η διοίκηση θα είχε ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη διαθεσιμότητα της μονάδας, υψηλότερη δυνατότητα παραγωγής και λιγότερο χρόνο διακοπής που οφείλεται στις μεταφορές

- **Κόστος ενέργειας:** η διαθεσιμότητα φθηνών πηγών για χαμηλό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και ατμού θέρμανσης έχουν ισχυρό αντίκτυπο στο κόστος της μονάδας.

3.6.2 Κόστος αφαλάτωσης

Η αφαλάτωση είναι μια ενεργοβόρος μέθοδος παραγωγής πόσιμου νερού. Το τελικό κόστος, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος της ενέργειας που χρησιμοποιείται. Είναι σαφές πως σε περιπτώσεις όπου οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν τη κύρια πηγή παροχής ενέργειας το κόστος είναι πολλαπλάσιο. Το κόστος της αφαλάτωσης περιλαμβάνει το κόστος παραγόμενου νερού, κόστος διανομής και το κόστος αποθήκευσης. Η μέθοδος της αφαλάτωσης που χρησιμοποιείται δεν επηρεάζει ούτε το κόστος διανομής ούτε το κόστος αποθήκευσης αλλά μόνο το κόστος παραγωγής.

Το κόστος παραγωγής γενικά περιλαμβάνει το κόστος ενέργειας, το κόστος εργασίας, το πάγιο κεφάλαιο και τα αναλώσιμα. Κυρίως βέβαια καθορίζεται από το κόστος ενέργειας και το απαιτούμενο πάγιο κεφάλαιο. Ειδικά το κόστος ενέργειας μπορεί να ανέλθει μέχρι και στο 60% του συνολικού κόστους του αφαλατωμένου νερού.

Για τον υπολογισμό του κόστους μια νέας μονάδας αφαλάτωσης διακρίνουμε τις εξής βασικές κατηγορίες. Στο κόστος αρχικής επένδυσης, στο κόστος λειτουργίας και σε αυτό της συντήρησης. **Το αρχικό κόστος επένδυσης** περιλαμβάνει το κόστος εγκατάστασης, το κόστος εξοπλισμού και το κόστος των συμπληρωματικών εργασιών. Οι μέθοδοι με απόσταξη έχουν υψηλότερο κόστος επένδυσης αλλά χαμηλότερα λειτουργικά έξοδα από τις μεθόδους μεμβρανών. Ακόμα είναι αναγκαία μεγαλύτερη έκταση για την εγκατάσταση του εξοπλισμού σε σχέση με της μεθόδους μεμβρανών. Το κόστος της αρχικής επένδυσης διακρίνεται σε άμεσο και έμμεσο κόστος και περιλαμβάνει όλες τις δαπάνες που σχετίζονται με την υλοποίηση ενός συγκεκριμένου έργου αφαλάτωσης από τον σχεδιασμό του μέχρι και την λειτουργία του[24].

Στο λειτουργικό κόστος και στο κόστος συντήρησης περιλαμβάνονται οι ενεργειακές ανάγκες, το κόστος προσωπικού και τα αναλώσιμα υλικά. Η συντήρηση περιλαμβάνει τον καθαρισμό των συστημάτων και την αντικατάσταση του εγκατεστημένου εξοπλισμού, όταν υπάρχει πρόβλημα. Στις μονάδες που χρησιμοποιούν μεμβράνες, η αντικατάσταση των μεμβρανών αποτελεί μεγάλο μέρος των λειτουργικών δαπανών[24].

Κόστος απαιτούμενου αρχικού κεφαλαίου, το κόστος επένδυσης (Capital Cost) ή Capex

Άμεσο Κόστος Κεφαλαίου[17] :

- Κόστος γης: Το κόστος της γης μπορεί να διαφέρει σημαντικά, από μηδενικά έξοδα μέχρι ένα συνολικό ποσό που εξαρτάται από τις ιδιότητες της τοποθεσίας. Μονάδες που ανήκουν στο κράτος έχουν συνήθως μηδενικά έξοδα.
- Κατασκευή φρεατίων: Το κόστος για την κατασκευή φρεατίων εξαρτάται τόσο από το μέγεθος της μονάδας όσο και από το βάθος του.
- Εξοπλισμός διεργασιών: Αυτό είναι ένα από τα πιο ακριβά στοιχεία και εξαρτάται από τον τύπο της διαδικασίας και τη χωρητικότητα. Στοιχεία που περιλαμβάνονται σε αυτή την κατηγορία είναι: όργανα και συστήματα ελέγχου, αγωγοί και βαλβίδες, ηλεκτρική καλωδίωση, αντλίες Συστήματα καθαρισμού, Εξοπλισμός προ-επεξεργασίας και μετά-επεξεργασίας, γραμμή πρόσληψης θαλασσινού νερού και αποβολής της άλμης, μονάδα χλωρίωσης.
- Βοηθητικός εξοπλισμός: Συστήματα πρόσληψης νερού , σωληνώσεις μεταφοράς, δεξαμενές αποθήκευσης, γεννήτριες και μετασχηματιστές αντλίες, αγωγοί και βαλβίδες
- Κτήρια: Το κόστος κατασκευής περιλαμβάνει την κατασκευή δομών όπως αίθουσες γραφεία και εργαστήρια και εξαρτάται από τον τύπο του κτηρίου.

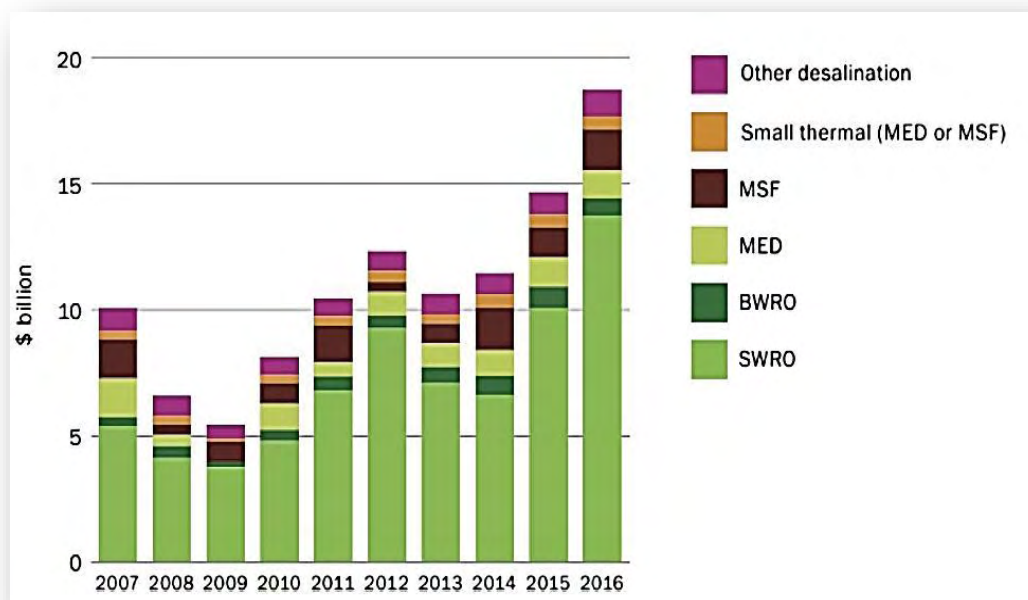
Έμμεσο Κόστος Κεφαλαίου:

Όλα τα στοιχεία κόστους που περιλαμβάνονται στην κατηγορία αυτή εκφράζονται ως ποσοστό του συνολικού άμεσου κόστους κεφαλαίου. Το έμμεσο κόστος κεφαλαίου περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- Μεταφορά και ασφάλιση: Το κόστος αυτό είναι ίσο με το 5% του συνολικού άμεσου κόστους.
- Λειτουργικό κόστος κατασκευής: Το κόστος αυτό είναι ίσο με το 15% του άμεσου κόστους υλικών και εργασίας και στη συνέχεια προσαρμόζεται στο μέγεθος (συνολικό κόστος κεφαλαίου) της μονάδας. Γενικά έξοδα κατασκευής περιλαμβάνουν τα εξής: πρόσθετες παροχές, επιβαρύνσεις εργασίας, επίβλεψη της εργασίας, προσωρινές εγκαταστάσεις, εξοπλισμός κατασκευαστικών έργων, κέρδος του εργολάβου
- Έξοδα ιδιοκτήτη: Δαπάνες του ιδιοκτήτη είναι τα μηχανολογικά και τα νομικά έξοδα. Οι δαπάνες αυτές είναι ίσο με το 10% άμεσου κόστους υλικών και εργασίας και στη συνέχεια προσαρμόζεται στο μέγεθος της μονάδας

→ Έκτακτη ανάγκη: Το σχέδιο έκτακτης ανάγκης λαμβάνεται στο 10% των συνολικών άμεσων δαπανών.

Σύμφωνα με την GWI(global water intelligence)[21] το συνολικό κεφαλαιουχικό κόστος κατασκευής μονάδων αφαλάτωσης διακυμαινόταν κατά τη διάρκεια των ετών, και ανήλθε σε 10,5 δισεκατομμύρια δολάρια το 2013 ενώ το 2016 ανήλθε σε 18.5 δισεκατομμύρια δολάρια λόγω της συνεχόμενης αύξησης των επενδύσεων στην αγορά της αφαλάτωσης (Σχήμα 3.7). Καθώς η SWRO είναι η κυρίαρχη τεχνολογία απαιτεί επομένως υψηλές δαπάνες για μεμβράνες καλύτερης ποιότητας, το συνολικό κόστος κεφαλαίου για την εγκατάσταση τους κατέχει το υψηλότερο ποσοστό στις ετήσιες κεφαλαιουχικές δαπάνες. Αναμένεται δε να είναι η κορυφαία τεχνολογία τα επόμενα.



Σχήμα 3.7: Ετήσιες κεφαλαιουχικές δαπάνες ανά διεργασία αφαλάτωσης στον κόσμο (2007-2016)[21]

Κόστος λειτουργίας και συντήρησης ή Opex

Οι ενεργειακές δαπάνες που απαιτεί η εγκατάσταση αφαλάτωσης διαμορφώνουν και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, καθώς και αυτό που αφορά το εργατοτεχνικό προσωπικό, των αναλώσιμων και των ανταλλακτικών. Οι θερμικές διεργασίες αφαλάτωσης συνήθως έχουν χαμηλότερα λειτουργικά έξοδα από αυτές των μεμβρανών, αφού στη δεύτερη περίπτωση, απαιτούνται μεγάλες δαπάνες για την αντικατάσταση και συντήρηση των μεμβρανών. Αναλυτικότερα, το κόστος λειτουργίας καλύπτει όλες τις δαπάνες που πραγματοποιούνται μετά την εξουσιοδότηση της μονάδας και κατά τη διάρκεια της πραγματικής λειτουργίας και διακρίνεται σε πάγιο και μεταβλητό κόστος[17].

Πάγια έξοδα αποτελούν:

- *Την ασφάλιση*: η οποία υπολογίζεται στο 0,5% του συνολικού κόστους κεφαλαίου
- *τα πάγια τέλη*: τα οποία καθορίζουν τις ετήσιες πληρωμές που καλύπτουν το σύνολο του άμεσου και έμμεσου κόστους. Το κόστος αυτό προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του συνολικού άμεσου και έμμεσου κόστους με το συντελεστή απόσβεσης, ο οποίος ορίζεται από την ακόλουθη σχέση.

$$a = \frac{i * (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

Όπου i είναι το ετήσιο επιτόκιο και n είναι η ζωή της μονάδας. Η συσσωρευμένη εμπειρία στον κλάδο αφαλάτωσης δείχνει ότι η απόσβεση των 30 χρόνων είναι επαρκής. Όσον αφορά το επιτόκιο, η μέση αξία του είναι ίση με 5%, ωστόσο, ένα εύρος 3-8% θα πρέπει να εξετάζεται κατά την οικονομική ανάλυση

Μεταβλητό κόστος

Κύριες μεταβλητές δαπάνες περιλαμβάνουν:

- το κόστος της εργασίας: εξαρτάται από την τοποθεσία και από την ιδιοκτησία της εγκατάστασης αν είναι δημόσια ή ιδιωτική. Επίσης, οι πρόσφατες τάσεις στη λειτουργία της εγκατάστασης σκοπεύουν σε λειτουργία που περιλαμβάνει εξωτερικούς συνεργάτες αλλά και καθήκοντα συντήρησης
- Το κόστος ενέργειας: εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα σε φθινό ηλεκτρικό ρεύμα (ή άλλη πηγή ενέργειας). Για παράδειγμα, το ενεργειακό κόστος μπορεί να μειωθεί εάν η μονάδα αφαλάτωσης συναποτελείται με ισχύ παραγωγής
- Η χημική χρήση: εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα τροφοδοσίας και τον βαθμό προ-/μετά-επεξεργασίας και τη διαδικασία καθαρισμού. Οι χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία και τον καθαρισμό της τροφοδοσίας περιλαμβάνουν θειικό οξύ, καυστική σόδα, αφαιρετικά χλωρίου, και χλώριο. Το κόστος αυτών των στοιχείων μπορεί να επηρεαστεί από τη διαθεσιμότητα των γύρω εργοστασίων παραγωγής και τις τιμές στην παγκόσμια αγορά. Επίσης, η χημική επεξεργασία διαφέρει ανάμεσα στις θερμικές και τις διαδικασίες μεμβράνης, όπου υψηλότερο ειδικό κόστος υπολογίζεται για τις διαδικασίες μεμβράνης. Επίσης, η επεξεργασία εξαρτάται από τη μέγιστη θερμοκρασία άλμης και την περιεκτικότητα της τροφοδοσίας σε αλάτι. Ο (Πίνακας 3.3) δίνει εκτιμήσεις για το κόστος ανά μονάδα των χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται στη θερμική αφαλάτωση και αφαλάτωση μεμβράνης, τα ποσοστά χορήγησης, καθώς και συγκεκριμένα ποσοστά ανά μονάδα όγκου του παραγόμενου νερού.

Χημικές Ουσίες	Μοναδιαίο κόστος(\$/kg χημικής ουσίας)	Ποσοστό δοσολογίας (kg χημικής ουσίας/kg νερού)	Ειδικό κόστος (\$/m ³ νερού)
Θειικό Οξύ	0.504	2.42*10 ⁻⁵	0.0122
Καυστική σόδα	0.701	1.4*10 ⁻⁵	0.0098
Αφαιρετικό αλάτων	1.9	4.99*10 ⁻⁶	0.0095
χλώριο	0.482	4*10 ⁻⁶	0.00193

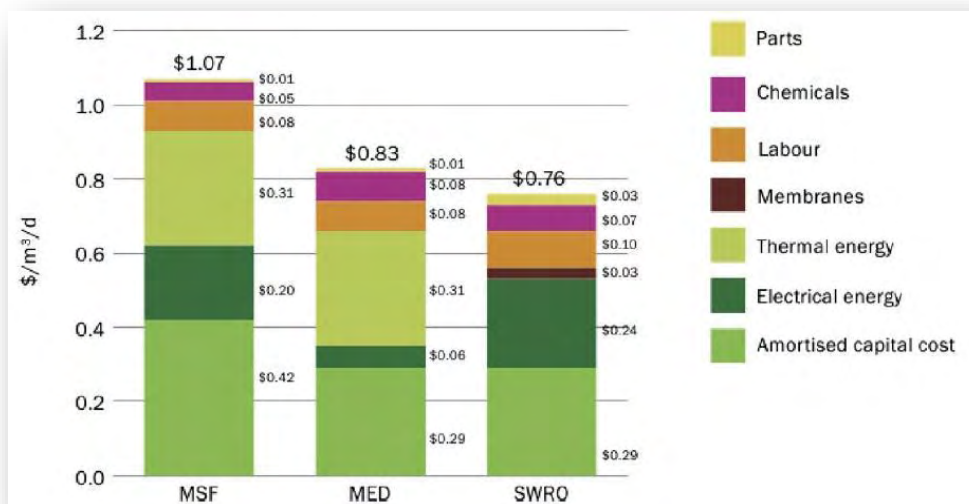
Πίνακας 3.3: Απεικόνιση εκτίμησης κόστους των χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται στη θερμική αφαλάτωση και στην αφαλάτωση μεμβράνης

- Αντικατάσταση μεμβράνης: η συχνότητα αντικατάστασης μεμβράνης, επηρεάζεται από την ποιότητα των τροφοδοτούμενων υδάτων. Για

χαμηλό TDS υφάλμυρο νερό, το ποσοστό αντικατάστασης είναι περίπου 5% ανά έτος. Για το υψηλό TDS θαλασσινό νερό, την αντικατάσταση θα μπορούσε να είναι τόσο υψηλό όσο το 20%

→ Συντήρηση και Ανταλλακτικά: Το κόστος συντήρησης και τα ανταλλακτικά υπολογίζεται πως είναι συνήθως λιγότερο από το 2% του συνολικού κεφαλαίου σε ετήσια βάση.

Σύμφωνα με τη μελέτη του Bennett 2011, 2012,[19,20] το λειτουργικό κόστος των μονάδων αφαλάτωσης μειώθηκε τα τελευταία 20 χρόνια από ένα μέσο όρο των 4,74-5,68 \$ / kgal (1,25-1,50 \$ / m³) στα πρώτα έτη της δεκαετίας του 1990 σε λιγότερο από \$ 2.84 / kgal (\$ 0.75 / m³) στις μέρες μας. Σε ένα τυπικό εργοστάσιο SWRO, το υψηλότερο το ποσοστό των λειτουργικών δαπανών αποτελεί το κόστος ενέργειας (0,24 \$ / m³ = 0,90 \$ / kgal) και το εργατικό κόστος (0,10 \$ / m³ = 0,38 \$ / κιλό) (GWI 2013). Σύμφωνα με το GWI [21] και Ghaffour et al. [22], τα λειτουργικά έξοδα ενός εργοστασίου RO είναι χαμηλότερα από αυτά των μονάδων απόσταξης δηλαδή της MSF-Πολυβάθμιας Εκτόνωσης και της MED-Πολυβάθμιας εξάτμισης. Για τις μονάδες αφαλάτωσης θερμικών διεργασιών το μεγαλύτερο μερίδιο του συνολικού λειτουργίας OPEX ανήκει στο κόστος θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Καθώς οι τιμές της ενέργειας μπορούν να αλλάξουν λόγω μεταβολών στις τιμή του πετρελαίου γίνεται σαφές πως οι τελικές δαπάνες αφαλάτωσης είναι πολύ ασταθείς. Ωστόσο το κόστος εργασίας, χημικών ουσιών και εξαρτημάτων παραμένει παρόμοιο ανεξαρτητα από την εφαρμοζόμενη τεχνολογία αφαλάτωσης (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8: Σχηματική απεικόνιση του λειτουργικού κόστους των κυριότερων διεργασιών αφαλάτωσης[18]

Μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει το κόστος παραγωγής του αφαλατωμένου νερού είναι το μέγεθος της μονάδας αφαλάτωσης. Συγκριτικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι π.χ. μια μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης με δυναμικότητα 5.000 m³/ημέρα έχει κόστος παραγόμενου νερού κατά μέσο όρο 1,5€/m³ ενώ όταν η δυναμικότητα αυξηθεί σε 20.000 m³/ημέρα το κόστος μειώνεται σε 0,75€/m³ κατά μέσο όρο. Γενικά η εξίσωση για τον υπολογισμό του κόστους παραγωγής αφαλατωμένου νερού είναι η παρακάτω[38]:

$$K_{ΠΝ} = \frac{(K_{ΕΠ} + K_{Λ&Σ} + K_{ΑΝΤ} + K_{ΕΓΚ}) * R}{ΠΝ}$$

- $K_{ΠΝ}$: κόστος παραγόμενου νερού
- $K_{ΕΠ}$: αρχικό κόστος επένδυσης
- $K_{ΕΓΚ}$: κόστος εγκατάστασης είναι το γινόμενο των συνολικών ημερών εργασίας του προσωπικού για την εγκατάσταση του συστήματος επί το ημερομίσθιο.
- $K_{Λ&Σ}$: το κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, $K_{Λ&Σ}$, εκτιμάται ως το γινόμενο ενός ποσοστού (3%) του αρχικού κόστους εγκατάστασης για το πρώτο έτος, $K_{Λ&Σ} 1$, επί έναν συντελεστή P_a .

$$K_{Λ&Σ} = K_{Λ&Σ1} * P_a$$

$$K_{Λ&Σ1} = K_{ΕΠ} * 3\%$$

$$P_a = \frac{1+i}{1+d} * \left[\left(\frac{1+i}{1+d} \right)^N - 1 \right] / \left(\frac{1+i}{1+d} - 1 \right)$$

όπου i : ο επιπλέον πληθωρισμός (excess inflation), δηλαδή ο ρυθμός μεταβολής της τιμής ενός προϊόντος πάνω ή κάτω από το γενικό πληθωρισμό. Συνήθως χρησιμοποιείται για το πετρέλαιο. Εδώ θεωρείται μηδέν και $N = 20$ έτη λειτουργίας συστήματος.

$K_{ΑΝΤ}$: για να υπολογίσουμε το κόστος αντικατάστασης πολλαπλασιάζουμε την παρούσα αξία της κάθε συσκευής που αντικαθιστούμε μετά από χρόνια n με ένα παράγοντα $Pr(n)$ για τον οποίο ισχύει.

$$\text{Pr}(n) = \left(\frac{1+i}{1+d} \right)^n$$

και έπειτα προσθέτουμε τα γινόμενα μεταξύ τους

ΠΝ: η δυναμικότητα της μονάδας αφαλάτωσης ως ποσότητα παραγόμενου νερού της μονάδας αφαλάτωσης το έτος .

R (recovery factor): Ο παράγοντας ανάκτησης, εκφράζει την αναγωγή στο έτος ή τις ετήσιες σταθερές δόσεις αποπληρωμής του δανείου με σταθερό επιτόκιο και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο.

$$R = \frac{d * (1 + d)^N}{(1 + d)^N - 1}$$

Όπου d =επιτόκιο προεξόφλησης, N =20έτη λειτουργίας συστήματος

- ❖ Στο πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται συγκεντρωτικά σύμφωνα με βιβλιογραφικά δεδομένα, η οικονομική αποτίμηση του κόστους παραγωγή νερού των κυριότερων τεχνολογιών αφαλάτωσης (Πίνακας 3.5) καθώς και τα επιμέρους κόστη αυτών (Πίνακας 3.4).

Διεργασία	Επένδυση €/m ³	Ενέργεια €/m ³	Αναλώσιμα €/m ³	Εργατικά €/m ³	Συντήρηση €/m ³	Σύνολο €/m ³
MSF	1000-2000	0.6-1.8	0.03-0.09	0.03-0.2	0.02-0.06	0.68-2.15
MED	900-1800	0.38-1.12	0.02-0.15	0.03-0.2	0.02-0.06	0.45-1.53
VC	900-2500	0.56-2.4	0.02-0.015	0.03-0.2	0.02-0.08	0.63-2.83
SWRO	800-1600	0.32-1.28	0.09-0.25	0.03-0.2	0.02-0.05	0.46-1.78
BWRO	200-500	0.04-0.4	0.05-0.13	0.03-0.2	0.004-0.02	0.12-0.75
ED	266-328	0.06-0.4	0.05-0.13	0.03-0.2	0.006-0.009	0.15-0.74

Πίνακας 3.4: Τα επιμέρους κόστη των κυριότερων διεργασιών αφαλάτωσης

Type of process	Type of water	Cost of water (US\$/m ³)
MSF 23,000–528,000 m ³ /day	Seawater	0.56 to 1.75
MED 91,000–320,000 m ³ /day	Seawater	0.52–1.01 0.95–1.5
12,000–55,000 m ³ /day Less than 100 m ³ /day		2.0–8.0
VC 30,000 m ³ /day 1,000 m ³ /day	Seawater	0.87–0.95 2.0–2.6
RO 100,000–320,000 m ³ /day 15,000–60,000 m ³ /day 1,000–4,800 m ³ /day	Seawater	0.45–0.66 0.48–1.62 0.7–1.72
RO Large capacity: 40,000 m ³ /day Medium: 20–1,200 m ³ /day Very small: few m ³ /day	Brackish water	0.26–0.54 0.78–1.33 0.56–12.99
ED Large capacity Small capacity	Brackish water	0.6 1.05

Πίνακας 3.5: Κόστος παραγωγής νερού αφαλάτωσης για κάθε τεχνολογία[15]

Το 2010, η Global Water Intelligence(GWI) ανέφερε ότι 6,6 δισεκατομμύρια δολάρια θα δαπανηθούν για το λειτουργικό κόστος όλων των εγκαταστάσεων μονάδων αφαλάτωσης παγκοσμίως. Την ίδια χρονιά, θα δαπανηθούν επιπλέον 6 δισεκατομμύρια δολάρια με τη μορφή κεφαλαίου για την κατασκευή νέων μονάδων. Όπως φαίνεται στο (Σχήμα 3.9), το κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας θα συνεχίσει να αυξάνεται καθώς αυξάνεται η χωρητικότητα των μονάδων αφαλάτωσης. Το 2016 το παγκόσμιο κόστος λειτουργίας των εγκαταστάσεων ξεπέρασε τα 11,8 δισεκατομμύρια δολάρια και το κόστος κεφαλαίου θα υπερβεί τα 18 δισεκατομμύρια δολάρια. Η αφαλάτωση είναι μια αναπτυσσόμενη βιομηχανία που απαιτεί σημαντικό κεφάλαιο, ενέργεια, εξοπλισμό και κόστος εργασίας.[14]



Σχήμα 3.9: Απεικόνιση παγκόσμιας παραγωγικής ικανότητας από το 2007 έως το 2016 σε σύγκριση με το συνολικό λειτουργικό κόστος και το κόστος κεφαλαίου των νεοσύστατων εγκαταστάσεων[14]

3.6.3 Γενικά στοιχεία κόστους αντίστροφης ώσμωσης

Το 2008, οι Karagiannis & Soldatos [25] δημοσίευσαν την εργασία τους που σχετίζεται με την ανάλυση κόστους της αφαλάτωσης νερού, όπως αυτή προκύπτει μέσα από την βιβλιογραφία. Σύμφωνα με την προαναφερθείσα εργασία, το τροφοδοτούμενο νερό, θαλασσίο (seawater) ή υφάλμυρο (brackish water), καθώς και το μέγεθος του εργοστασίου, αλλά και η πηγή ενέργειας της μονάδας παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στο συνολικό κόστος της αφαλάτωσης του νερού (σε \$/μέρα). Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα χωρητικότητας παραγωγής (production capacity) στις μονάδες που χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο στις μονάδες που χρησιμοποιούν υφάλμυρο νερό. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την εργασία, τα εργοστάσια που λειτουργούν με θαλασσινό νερό τείνουν να εμφανίζουν κόστος 600-800 \$/μέρα. Από την άλλη πλευρά, τα εργοστάσια που λειτουργούν με υφάλμυρο νερό τείνουν να εμφανίζουν κόστος 240-400 \$/μέρα, όπως αναφέρεται στις εργασίες[27],[28]. Επιπροσθέτως, και για τις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις τα μικρά εργοστάσια (< 5000 m³/μέρα) τείνουν να εμφανίζουν μεγαλύτερο κόστος ανά κυβικό μέτρο νερού (\$/m³) σε σχέση με τα μετρίου μεγέθους (5000 – 60.000 m³/μέρα) και τα μεγάλα εργοστάσια (> 60.000 m³/μέρα)[25].

Μια σύγκριση του κόστους που αφορά την λειτουργία και συντήρηση για μια μεγάλη μονάδα που χρησιμοποιεί υφάλμυρο νερό σε σχέση με αυτή που χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό φαίνεται στον (Πίνακα 3.6), ο οποίος λήφθηκε από την εργασία[26] των Karagiannis & Soldatos που λαμβάνει υπόψη αποτελέσματα των. Έτσι, όσον αφορά την περίπτωση με υφάλμυρο νερό, το μοντέλο εκτίμησης του κόστους αναπτύχθηκε για ένα θεωρητικό εργοστάσιο που θα μπορούσε να βρίσκεται στην νότια Καλιφόρνια, στις Η.Π.Α., και να χρησιμοποιεί ως τροφοδοσία το νερό του ποταμού Colorado. Τα υπάρχοντα εργοστάσια που χρησιμοποιούν ως τροφοδοσία το νερό του ποταμού Colorado παράγουν 1,97 εκατομμύρια m³/μέρα.

Από την άλλη πλευρά, όσον αφορά το εργοστάσιο που χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό, λήφθηκαν στοιχεία από το Ashkelon που βρίσκεται στο νότιο Ισραήλ. Το εργοστάσιο αυτό χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό που προέρχεται από την Μεσόγειο θάλασσα και παράγει 330.000 m³/μέρα[28].

Plant costs	Metropolitan plant (\$/m ³)	Ashkelon plant (\$/m ³)
Water type	Brackish water	Seawater
Fixed costs (capital costs)	0.057	0.311
Energy	0.029	0.134
Labor	0.007	Included in Miscellaneous
Chemicals	0.016	0.021
Membrane replacement	0.010	0.028
Miscellaneous	0.077	0.031
Total	0.134	0.525

Πίνακας 3.6: Σύγκριση κόστους μεταξύ ενός εργοστασίου που χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό και ενός που χρησιμοποιεί υφάλμυρο νερό[29]

Η σύγκριση αναφορικά με το κόστος μπορεί να γίνει από τη στιγμή που και οι δύο αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στην ίδια χρονική περίοδο. Αξίζει να σημειωθεί ότι σήμερα το κόστος πιθανόν να έχει αυξηθεί σε σχέση με αυτά που παρουσιάζονται. Εν συντομία, η σύγκριση έδειξε ότι το κόστος που σχετίζεται με τη μονάδα που χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό είναι περίπου 5 φορές πιο μεγάλο σε σχέση με το αντίστοιχο που χρησιμοποιεί υφάλμυρο νερό. Αυτή η μεγάλη διαφορά σχετίζεται με την χρήση ενός πιο μεγάλου και ακριβού συστήματος που χειρίζεται το θαλασσινό νερό και την μεγαλύτερη ενέργεια που απαιτείται για την άντλησή του. Επίσης, η έρευνα αυτή έδειξε ότι το χημικό κόστος είναι παρόμοιο και για τις δύο περιπτώσεις. Επιπλέον, το κόστος για αντικατάσταση των μεμβρανών είναι μεγαλύτερο για τη μονάδα που χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό σε σχέση με το αντίστοιχο που χρησιμοποιεί υφάλμυρο νερό. Τέλος, σύμφωνα με τους Lauren et. Al[29] οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται στα εργοστάσια με θαλασσινό νερό έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής και πρέπει να αντικαθίστονται πιο συχνά εξαιτίας του φαινομένου fouling (επικαθίσεων).

3.6.3.1 Εργοστάσια που χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό

Σύμφωνα με τους Lauren et al.[29] το κόστος αναφορικά με τα εργοστάσια που χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό έχει μειωθεί από τα \$4 /m³ που ήταν στα τέλη του 1970 στο \$1 /m³ το 2004. Τα εργοστάσια που έγιναν την δεκαετία του 1990 παρήγαγαν νερό με κόστος \$1-\$2 /m³,[30] ενώ τα πιο πρόσφατα εργοστάσια που έγιναν στο Ισραήλ (όπως το Ashkelon, 2005) και στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα (Fujairah, 2005) είχαν κόστος περίπου \$0,53 /m³ και \$0,87 /m³, αντίστοιχα. Στον παρακάτω (Πίνακα 3.7) γίνεται αναφορά σε μερικά εργοστάσια που χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό.

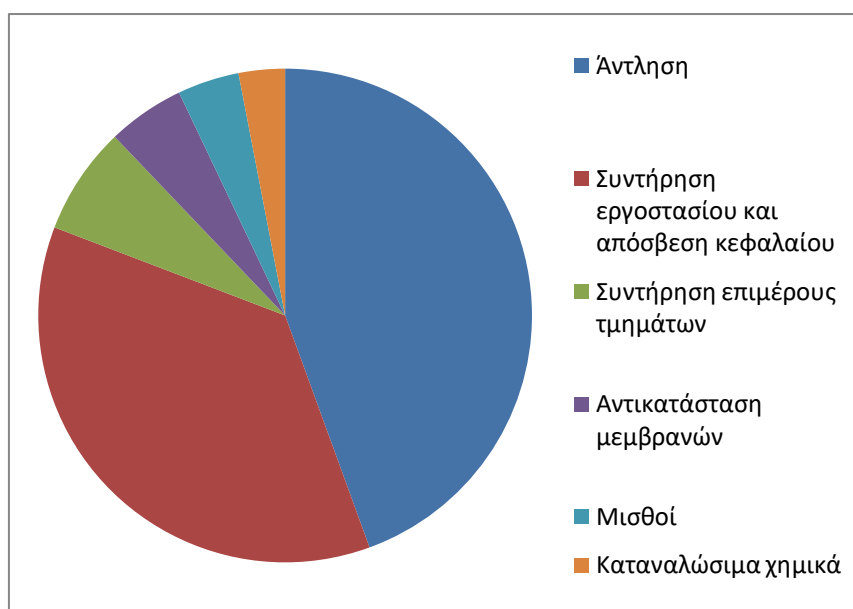
Plant location	1st year of production	RO production capacity (m ³ /day)	Water price (\$/m ³)
Galder-Agaete, Spain	1989	3500	1.94
Jeddah, Saudi Arabia	1989	23,000	1.31
Ad Dur, Bahrain	1990	45,000	1.30
Lanzarote III and Agrabua, Spain	1991	10,000 × 2	1.62/1.34
Santa Barbara, California, USA	1992	25,000	1.51
Dhkelia, Cyprus	1997	40,000	1.46
Mallorca and Marbella, Spain	1998	42,000/56,400	1.03/1.00
Eilat, Israel	1998	10,000	0.72
Larnarca, Cyprus	2001	56,000	0.83
Eilat, Israel	2003	10,000	0.81
Tampa Bay, Florida, USA	2003	94,600	0.55
Fujairah, United Arab Emirates	2005	170,500	0.87
Ashkelon, Israel	2005	320,000	0.53

Πίνακας 3.7: Σύγκριση κόστους μεταξύ εργοστάσιων που χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό[29]

Αρκετοί παράγοντες έχουν βοηθήσει στη μείωση του κόστους και της κατανάλωσης ενέργειας στις μονάδες αφαλάτωσης με την μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης. Αυτοί οι παράγοντες είναι η συνεχής βελτίωση στα υλικά των μεμβρανών και την τεχνολογία τους. Επίσης, η αντίστροφη ώσμωση έχει γίνει πολύ πιο οικονομική από ότι οι θερμικές διεργασίες που απαιτούν 10 φορές παραπάνω ηλεκτρισμό, όπως αναφέρεται από τον Service[31], μιας και οι τιμές που αφορούν το αργό πετρέλαιο έχουν αυξηθεί από 20\$/βαρέλλι που ήταν το 1997 στα 70\$/βαρέλλι το 2007[32]. Ενώ τα περισσότερα από τα εργοστάσια που λειτουργούν με αντίστροφη ώσμωση

χρησιμοποιούν ακόμα ορυκτούς πόρους ως πηγή ενέργειας, τα μελλοντικά εργοστάσια προβλέπεται να κάνουν χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ή πυρηνικής ενέργειας, ώστε να μειωθεί ακόμα περισσότερο το κόστος αλλά και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις[33].

Το σχετικό κόστος για το κεφάλαιο και την ενέργεια, ανά μονάδα χωρητικότητας παραγωγής (production capacity), ενός εργοστασίου με αντίστροφη ώσμωση μειώνεται, όσο μικραίνει το μέγεθός του. Η ενέργεια που απαιτείται χρησιμοποιείται κυρίως για τις αντλίες (44%). Το δεύτερο μεγαλύτερο κόστος (36%) καλύπτει τις ανάγκες συντήρησης του εργοστασίου συμπεριλαμβανομένης της απόσβεσης του κεφαλαίου που επενδύθηκε και της ασφάλειας[34]. Επίσης, το κόστος περιλαμβάνει συντήρηση των επιμέρους τμημάτων (7%), αντικατάσταση μεμβρανών (5%), μισθούς (4%) και καταναλώσιμα χημικά (3%)[34].

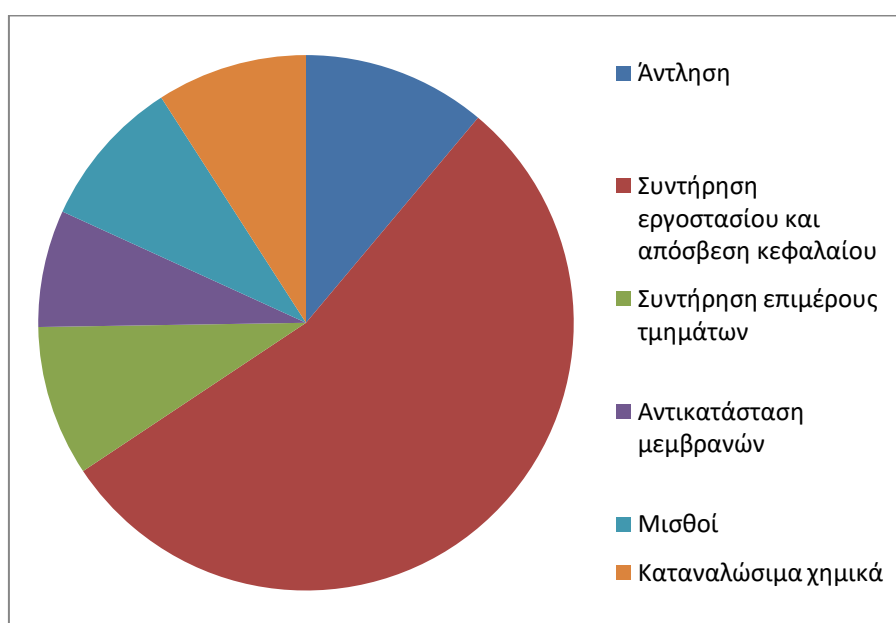


Σχήμα 3.10: Αφαλάτωση θαλασσινού νερού: Καταμερισμός κόστους χρησιμοποιώντας στοιχεία από[29],[34]

3.6.3.2 Εργοστάσια που χρησιμοποιούν υφάλμυρο νερό

Η ουσιαστική διαφορά στον καταμερισμό του κόστους μεταξύ ενός εργοστασίου αντίστροφης ώσμωσης με θαλασσινό και ενός με υφάλμυρο νερό είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας που χρειάζονται. Έτσι, τα εργοστάσια αντίστροφης ώσμωσης με υφάλμυρο νερό χρειάζονται πολύ λιγότερη υδροστατική πίεση για να παράγουν το διήθημα εξαιτίας της πού μικρότερης περιεκτικότητας σε άλατα σε σχέση με το θαλασσινό νερό.

Επιπροσθέτως, στα εργοστάσια που χρησιμοποιούν υφάλμυρο νερό οι μεμβράνες έχουν μικρότερη απόρριψη άλατος και είναι περισσότερο διαπερατές σε σχέση με αυτές σε μονάδες που χρησιμοποιείται θαλασσινό νερό. Το κόστος λειτουργίας μίας τυπικής μονάδας είναι μόνο 11% του συνολικού κόστους (44% ήταν το αντίστοιχο με θαλασσινό νερό), ενώ το μεγαλύτερο κόστος, 54%, οφείλεται σε πάγιες δαπάνες, όπως η απόσβεση του κεφαλαίου που επενδύθηκε και η ασφάλεια. Εξαιτίας της μειωμένης συνεισφοράς του κόστους λειτουργίας στις συνολικές δαπάνες, η συνεισφορά άλλων παραγόντων όπως συντήρηση (9%), αντικατάσταση μεμβρανών (7%), μισθοί (9%) και καταναλώσιμα χημικά (9%) αυξάνεται[34].



Σχήμα 3.11: Αφαλάτωση υφάλμυρου νερού: Καταμερισμός κόστους χρησιμοποιώντας στοιχεία από[34]

Η τιμή ανά μονάδα νερού για το υφάλμυρο νερό κυμαίνεται από \$0.10/m³ έως \$1.00/m³ [34]. Το προαναφερθέν εύρος τιμών είναι χαμηλότερο σε σχέση με αυτό του θαλασσινού νερού (\$0.53/m³ έως \$1.50/m³). Το κόστος μπορεί να αυξηθεί εξαιτίας των αναγκών για άντληση. Τέλος, η πιο σημαντική δαπάνη στην αφαλάτωση υφάλμυρου νερού φαίνεται να είναι τα συμπυκνωμένα υπολείμματα[29].

3.7 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις αφαλάτωσης

Η κατασκευή μια μονάδας αφαλάτωσης καθώς και η λειτουργία, όπως είναι φυσικό προκαλούν επιπτώσεις στο περιβάλλον. Αυτές διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Επιπτώσεις από τη χρήση της ενέργειας
- Επιπτώσεις από την απόρριψη της άλμης
- Επιπτώσεις κατά το στάδιο κατασκευής (ηχορύπανση, αισθητική ρύπανση, δημιουργία σκόνης)
- Επιπτώσεις κατά το στάδιο λειτουργίας

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η αφαλάτωση απαιτεί μεγάλες ποσότητες ενέργειας, η οποία εξαρτάται φυσικά από την ύπαρξη ή όχι συστήματος ανάκτησης της υδραυλικής ενέργειας της άλμης. Επίσης, η χρήση συμβατικών καυσίμων (ορυκτά καύσιμα) παράγει μεγάλες ποσότητες αερίων θερμοκηπίου και τοξικές εκπομπές προς το περιβάλλον όπως CO, CO₂, SO₂ και NO_x, καθώς και στερεά σωματίδια. Εκτιμάται ότι η παραγωγή νερού των 10 εκατομμυρίων m³ /ημέρα από αφαλάτωση θαλασσινού νερού με χρήση ορυκτών καυσίμων θα απελευθερώσει 200 εκατομμύρια τόνους CO₂ ετησίως, 200.000 t / έτος SO₂, 60.000 t / έτος NO_x και 16.000 t / έτος πτητικές οργανικές ενώσεις[35]. Σύμφωνα λοιπόν με την Συνθήκη του Κιότο υπάρχει δέσμευση μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 5% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990 έως το 2008-2012. Στο πλαίσιο λοιπόν της προστασίας του περιβάλλοντος, εντάσσεται ο συνδυασμός των ενεργειακών καταναλώσεων των μονάδων αφαλάτωσης με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

Η παραγόμενη άλμη από τις μονάδες αφαλάτωσης θεωρείται ρυπαντική προς το περιβάλλον διότι έχει υψηλές συγκεντρώσεις άλατος, χημικές ουσίες από την επεξεργασία του νερού, διότι το αντλούμενο νερό προχλωριώνεται για την προστασία των μεμβρανών στη περίπτωση της αντίστροφης όσμωσης, τοξικά μέταλλα και μεγαλύτερη θερμοκρασία. Επομένως η απόρριψη της άλμης στη θάλασσα, συνήθως χωρίς περιοριστικά μέτρα, επηρεάζει την ισορροπία των οικοσυστημάτων και των θαλάσσιων ειδών και καταστρέφουν την θαλάσσια χλωρίδα και πανίδα[36].

Κατά την άντληση θαλασσινού νερού, στην είσοδο του αγωγού τροφοδοσίας δεν πρέπει να διαταράσσεται η θαλάσσια ισορροπία, πρέπει να γίνεται μελέτη της θαλάσσιας περιοχής καθώς και λήψη νερού από ανοιχτή θάλασσα ή από πηγάδια θαλάσσης. Έχει παρατηρηθεί θνησιμότητα μικρών οργανισμών, όπως μικρά ψάρια, πλαγκτόν, αυγά ψαριών, αλλά και μεγαλύτερων θαλάσσιων ειδών, λόγω αναρρόφησης ή πρόσκρουσής τους στον αγωγό εισροής. Στο στάδιο της απόρριψης της άλμης είναι σημαντική η σωστή σχεδίαση του συστήματος απόρριψης με χρήση διανομέων άλμης

(brine distributors), ώστε να επιτυγχάνεται ανάμιξη, διάχυση και αραίωση, να κατασκευάζονται αγωγοί νερού απόρριψης μεγάλου μήκους και σε απόσταση από την ακτή, κλπ.. Αυτά τα μέτρα απαιτούν ένα επιπλέον κόστος επένδυσης, είναι όμως απαραίτητα για την πρόληψη δυσμενών επιπτώσεων. Η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης είναι η λιγότερο ενεργοβόρος και ρυπαίνουσα από τις λοιπές καθιερωμένες μεθόδους, όπως φαίνεται στο (Πίνακα 3.8), όπου δίνονται οι κυριότεροι εκπεμπόμενοι ρύποι ανά μέθοδο αφαλάτωσης.

Διεργασίες αφαλάτωσης	CO ₂ /m ³ νερού (kg/m ³)	NO _x / m ³ νερού (g/m ³)	SO _x / m ³ νερού (g/m ³)	Σκόνη / m ³ νερού (g/m ³)
Αντίστροφη ώσμωση (RO)	1.78	3.87	10.68	2.07
Πολυβάθμια εξάτμιση (MED)	18.05	21.41	26.48	1.02
Πολυβάθμια εκτόνωση (MSF)	23.41	28.3	27.91	2.04

Πίνακας 3.8: Κυριότεροι εκπεμπόμενοι ρύποι ανά μέθοδο αφαλάτωσης

3.7.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις αντίστροφης ώσμωσης

Η αφαλάτωση υφάλμυρου ή θαλασσινού νερού με χρήση της μεθόδου με αντίστροφη ώσμωση έχει τις εξής περιβαλλοντικές επιπτώσεις είτε άμεσες είτε έμμεσες οι οποίες δίνονται αναλυτικά[39]:

- 1) Ο έμμεσος αντίκτυπος στο περιβάλλον λόγω της ανάγκης αύξησης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για μονάδες αφαλάτωσης: Η Κατανάλωση ενέργειας στην αφαλάτωση του θαλασσινού νερού στις εγκαταστάσεις αντίστροφης ώσμωσης έχει βελτιωθεί με νέες τεχνολογικές εξελίξεις στη διαδικασία όπως τα συστήματα ανάκτησης ενέργειας. Αυτές οι μονάδες αφαλάτωσης απαιτούν ένα εξωτερική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τις θερμικές εγκαταστάσεις. Για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια είναι αναγκαία η καύση καυσίμων σε μια θερμική μονάδα, που παράγει ρυπογόνα καυσαέρια στην ατμόσφαιρα όπως διοξείδιο του άνθρακα[39].
- 2) Επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον ως αποτέλεσμα της επαναφοράς της συμπυκνωμένης άλμης στη θάλασσα: Στις μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης, υπάρχει συμπύκνωση της εξερχόμενης άλμης κατά 1,3 – 1,7 φορές. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η σωστή διασπορά της άλμης που απορρίπτεται και να ελαχιστοποιούν οι δυσμενείς επιπτώσεις τους στη θάλασσα και στο περιβάλλον, είναι απαραίτητο να επιλεγεί η κατάλληλη τεχνολογία για το σκοπό αυτό[39].
- 3) Επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον ως αποτέλεσμα διαφορετικών χημικών στοιχείων, που χρησιμοποιούνται στην προ-επεξεργασία και τον καθαρισμό των μεμβρανών: Εκτός από την υψηλή συγκέντρωση αλάτων, η απορριπτόμενη άλμη περιέχει διάφορες χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται κατά το στάδιο προ-επεξεργασίας της αφαλάτωσης. Τα πιο σημαντικά είναι τα εξής[39]:
 - Υποχλωριώδες νάτριο (NaOCl) που χρησιμοποιείται για την χλωρίωση, αποτρέποντας βιολογική ανάπτυξη
 - Χλωριούχο σίδηρο (FeCl_3) που χρησιμοποιείται για την κροκίδωση και την αφαίρεση της αιωρούμενης ύλης από το νερό
 - Χρησιμοποιείται θειικό ή υδροχλωρικό οξύ για την ρύθμιση του pH
 - Εξαμεταφωσφορικό νάτριο και παρόμοιες χημικές ουσίες, για την προστασία των μεμβρανών και των σωληνώσεων τους σωλήνες και στις μεμβράνες

- Διθειώδες νάτριο (NaHSO_3), το οποίο χρησιμοποιείται στο προκειμένου να εξουδετερωθούν τα υπολείμματα χλωρίου στο νερό τροφοδοσίας
- 4) Επιπτώσεις του θορύβου: Ο παράγοντας της ηχορύπανσης που προκαλείται από τις μονάδες της αντιστροφής ώσμωσης είναι πολύ σημαντικός. Οι αντλίες υψηλής πίεσης, τα συστήματα ανάκτησης ενέργειας όπως στρόβιλοι και λοιπά παράγουν υψηλά επίπεδα θορύβου άνω των 90dB. Επομένως οι μονάδες αυτές θα πρέπει να βρίσκονται μακριά από κατοικημένες περιοχές[39].

Στον παρακάτω (Πίνακα 3.9) με δεδομένα που πάρθηκαν από την βιβλιογραφία παρουσιάζεται η χημική σύσταση του θαλασσινού νερού και της άλμης που απορρίπτεται της μονάδας αντιστροφής ώσμωσης Bocabarranco που βρίσκεται στις Κανάριες νήσους με δυναμικότητα παραγωγής νερού $7000\text{m}^3/\text{ημέρα}$ [39].

Chemical composition of seawater and brine reject in Bocabarranco Plant		
mg/l	Seawater	Brine
Calcium	450	814
Magnesium	1,520	2,751
Sodium	11,415	20,657
Potassium	450	814
Bicarbonate	250	452
Chloride	20,800	37,639
Sulphate	3,110	5,628
Silicon	5	9
TDS	38,000	68,764

Table 4 Chemical Doses used in Bocabarranco Plant		
Chemical doses	kg/m ³	ppm
NaOCl	0.053	3.0
H ₂ SO ₄	0.068	16.4
NaHSO ₃	0.027	2.0
Antiscalant	0.009	4.1
FeCl ₃	0.055	1.7
Calcium hypochloride	0.005	2.8

Πίνακας 3.9: Απεικόνιση χημικής σύστασης του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας και της άλμης που απορρίπτεται καθώς και των πρόσθετων χημικών στοιχείων κατά το στάδιο της προ-επεξεργασίας αντίστοιχα[39]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ ΜΕ ΕΜΒΑΘΥΝΣΗ ΣΤΙΣ ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ

4.1 Εισαγωγή

Η αφαλάτωση είναι μια διεργασία διαχωρισμού αλάτων και νερού από υδατικά, αλατούχα διαλύματα και εφαρμόζεται σε μεγάλη κλίμακα για την παραγωγή καθαρού νερού για κάθε χρήση (οικιακή, βιομηχανική, αγροτική). Σε αυτό το κεφάλαιο, αναλύεται, η αντίστροφη ώσμωση η οποία είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος αφαλάτωσης και στηρίζεται στη χρήση μεμβρανών. Ποσοστιαία αποτελεί το 62% των μεθόδων αφαλάτωσης και το 88% των μεθόδων που χρησιμοποιούν μεμβράνες.

Γύρω στο 1960, η αντίστροφη ώσμωση άρχισε να εφαρμόζεται για τη παραγωγή πόσιμου νερού από υφάλμυρα ύδατα. Το 1970, έπειτα από τη βελτίωση των ημιπερατών μεμβρανών, ξεκίνησε η εφαρμογή της στη βιομηχανία για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού. Όσον αφορά την ένταξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.) στις μεθόδους αφαλάτωσης, ο συνδυασμός φωτοβολταϊκών και συστημάτων αντίστροφης ώσμωσης είναι ο πιο διαδεδομένος αφού αποτελεί το 43% όλων των συνδυασμών Α.Π.Ε. και μεθόδων αφαλάτωσης.



Εικόνα 4.1: Απεικόνιση διάταξης μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης επεξεργασίας θαλασσινού νερού SWRO[12]

4.2 Αρχή λειτουργίας ώσμωσης

Για να κατανοηθεί η διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης, πρέπει πρώτα να γίνει κατανοητή η έννοια της ώσμωσης [41],[42].

Ώσμωση ονομάζεται το φαινόμενο της διέλευσης περισσότερων μορίων διαλύτη, μέσω ημιπερατής μεμβράνης, από τον διαλύτη στο διάλυμα ή από το διάλυμα μικρότερης συγκέντρωσης (αραιότερο) προς το διάλυμα μεγαλύτερης συγκέντρωσης σε διαλυμένη ουσία (πυκνότερο). Ημιπερατή είναι η μεμβράνη που επιτρέπει να περνούν μέσα από τους πόρους της τα μόρια του διαλύτη, αλλά δεν επιτρέπει να περνούν τα μόρια της διαλυμένης ουσίας. Ημιπερατές μεμβράνες υπάρχουν και φυσικές (π.χ. η κυτταρική μεμβράνη) και συνθετικές (π.χ. το σελοφάν).

Η ώσμωση είναι μια φυσική διαδικασία κατά την οποία ο διαλύτης κινείται, αυθόρμητα, μέσω μεμβράνης που είναι διαπερατή για τα μόριά του όχι όμως και για τα μόρια της διαλυμένης ουσίας και διαχωρίζει δύο διαλύματα διαφορετικών συγκεντρώσεων ή χωρίζει ένα διαλύτη από ένα διάλυμα. Χωρίς την ύπαρξη της μεμβράνης θα συνέβαινε απλή ανάμιξη των δύο διαλυμάτων ή του διαλύτη και του διαλύματος. Αν από την ημιπερατή μεμβράνη περνά και διαλυμένη ουσία, τότε η διαδικασία παύει να είναι ώσμωση και γίνεται διάχυση μεταξύ των δύο διαλυμάτων.

Η ώσμωση πραγματοποιείται με σκοπό να εξισωθούν οι συγκεντρώσεις των διαλυμάτων από τις δύο πλευρές της ημιπερατής μεμβράνης. Το φαινόμενο της ώσμωσης είναι πολύ σημαντικό στα διάφορα βιολογικά συστήματα, καθώς πολλές βιολογικές μεμβράνες είναι ημιπερατές.

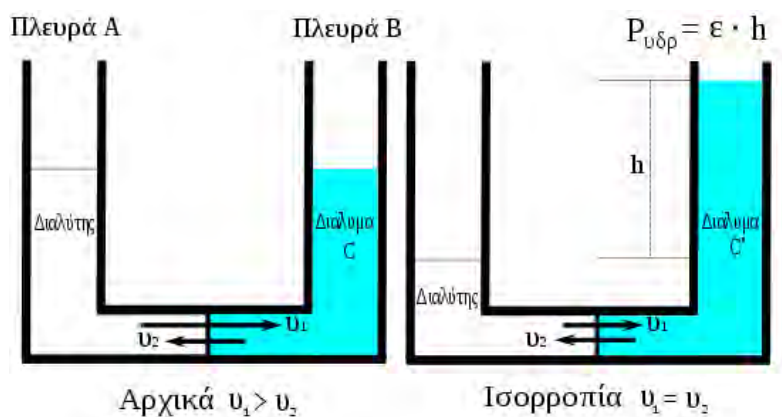
Για την καλύτερη μελέτη και εξήγηση της ώσμωσης, παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις διαλυμάτων που χωρίζονται με ημιπερατή μεμβράνη. Έτσι, υπάρχει η ώσμωση μεταξύ διαλύματος και διαλύτη, (Σχήμα 4.1α), και η ώσμωση μεταξύ διαλυμάτων διαφορετικών συγκεντρώσεων, (Σχήμα 4.2β).

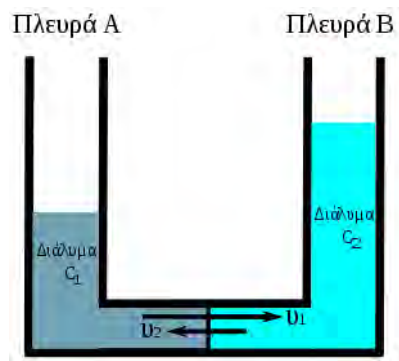
Στην πρώτη περίπτωση, (Σχήμα 4.1α), φέρονται σε επαφή, μέσω ημιπερατής μεμβράνης, ένα υδατικό διάλυμα κάποιας χημικής ένωσης (π.χ. ζάχαρης) συγκέντρωσης C και καθαρός διαλύτης (που θεωρούμε ότι έχει συγκέντρωση σε διαλυμένη ουσία $C=0$) (νερό). Αρχικά, η ταχύτητα μετακίνησης, u_1 , των μορίων του νερού από τον καθαρό διαλύτη προς το διάλυμα είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα μετακίνησης, u_2 , των μορίων του νερού από το διάλυμα προς τον καθαρό διαλύτη. Δηλαδή αρχικά είναι $u_1 > u_2$. Έτσι, ο όγκος του διαλύματος αυξάνεται, οπότε παρατηρείται ανύψωση της στάθμης του διαλύματος μέσα στο δεξιό τμήμα του δοχείου. Το φαινόμενο της ώσμωσης θα συνεχιστεί με σκοπό να εξισωθούν οι συγκεντρώσεις από τις δύο πλευρές της ημιπερατής μεμβράνης. Αυτό όμως

δε μπορεί να συμβεί, διότι ο καθαρός διαλύτης δεν περιέχει διαλυμένη ουσία.

Με το πέρασμα του χρόνου, η ανύψωση της στάθμης του διαλύματος επιβραδύνεται και τελικά σταθεροποιείται σε ορισμένο ύψος, h , οπότε και σταματά το φαινόμενο της ώσμωσης. Αυτό συμβαίνει διότι η υδροστατική πίεση, $P_{υδρ} = \epsilon \cdot h$, που δημιουργείται, λόγω της ανύψωσης της στάθμης και οφείλεται στη στήλη του διαλύματος ύψους h , εξαναγκάζει τα μόρια του διαλύτη να εξέρχονται με την ίδια ταχύτητα με την οποία εισέρχονται. Τελικά αποκαθίσταται κατάσταση δυναμικής ισορροπίας όπου $u_1 = u_2$.

Όσον αφορά την περίπτωση όπου υπάρχει ώσμωση μεταξύ διαλυμάτων διαφορετικών συγκεντρώσεων, τα δύο τμήματα του δοχείου περιέχουν διαλύματα της ίδιας ουσίας, αλλά διαφορετικών συγκεντρώσεων C_1 (αραιότερο) και C_2 (πυκνότερο) και ισχύει $C_1 < C_2$. Αρχικά η ταχύτητα διάχυσης των μορίων του διαλύτη από το αραιότερο προς το πυκνότερο διάλυμα είναι μεγάλη. Έτσι θα συμβεί ώσμωση από το διάλυμα με συγκέντρωση C_1 προς το διάλυμα συγκέντρωσης C_2 . Το φαινόμενο της ώσμωσης θα συνεχιστεί μέχρι να εξισωθούν οι συγκεντρώσεις των διαλυμάτων από τις δύο πλευρές της μεμβράνης, δηλαδή μέχρι να γίνει $C_1' = C_2'$, όπου C_1' και C_2' οι νέες συγκεντρώσεις όταν σταματήσει η ώσμωση. Στο σημείο αυτό αποκαθίσταται δυναμική ισορροπία, δηλαδή ίδιος αριθμός μορίων διαλύτη περνά μέσα από την ημιπερατή μεμβράνη στη μονάδα του χρόνου και προς τις δύο κατευθύνσεις (δηλαδή $u_1 = u_2$). Το φαινόμενο μπορεί να σταματήσει, επίσης, αν τα δύο διαλύματα έχουν μεγάλη διαφορά συγκεντρώσεων και η υδροστατική στήλη είναι τόσο ψηλή που σταματά την ώσμωση εμποδίζοντας τη διέλευση των μορίων του διαλύτη πριν εξισωθούν οι συγκεντρώσεις. Φυσικά δεν παρατηρείται ώσμωση αν από την αρχή τα δύο διαλύματα έχουν ίδιες συγκεντρώσεις, δηλαδή είναι αρχικά $C_1 = C_2$.





Σχήμα 4.1: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της ώσμωσης μεταξύ: α) διαλύματος και διαλύτη και β) διαλυμάτων διαφορετικών συγκεντρώσεων

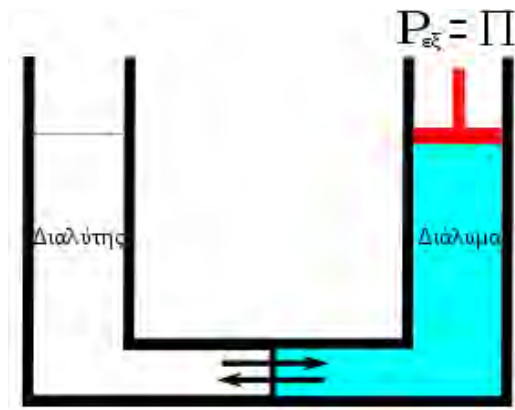
4.2.1 Ωσμωτική πίεση

Η έννοια της ωσμωτικής πίεσης που αναφέρθηκε προηγουμένως αναλύεται σε αυτή την υποενότητα. Συγκεκριμένα, η ωσμωτική πίεση, Π , διαλύματος, που διαχωρίζεται με ημιπερατή μεμβράνη από τον καθαρό διαλύτη, ονομάζεται η ελάχιστη πίεση που πρέπει να ασκηθεί εξωτερικά στο διάλυμα, ώστε να εμποδιστεί το φαινόμενο της ώσμωσης, χωρίς να μεταβληθεί ο όγκος του διαλύματος, (Σχήμα 4.2). Γενικά η ωσμωτική πίεση είναι μεγάλη, π.χ. για υδατικό διάλυμα καλαμοσάκχαρου 1 % w/v στους 15 °C είναι 0,684 atm. Στα φυτικά κύτταρα μπορεί να είναι μεταξύ 5 και 10 atm. Η ωσμωτική πίεση του αίματος στους 0° είναι 6,74 atm και οφείλεται κατά κύριο λόγο στα διάφορα ανόργανα άλατα που βρίσκονται στο πλάσμα, σημαντικότερο των οποίων είναι το χλωριούχο νάτριο. Η ώσμωση μπορεί να σταματήσει :

- Όταν η στήλη του διαλύματος στο σωλήνα στην πλευρά Β ανεβεί αρκετά, ώστε η υδροστατική πίεση της στήλης να αναγκάσει τα μόρια του διαλύτη να εξέρχονται προς την πλευρά Α με την ίδια ταχύτητα με την οποία εισέρχονται στην πλευρά Β.
- Αν από την αρχή είχε ασκηθεί στο διάλυμα στην πλευρά Β η κατάλληλη εξωτερική πίεση. Η ωσμωτική πίεση αναφέρεται σ' αυτή την περίπτωση. Η εξωτερική πίεση που απαιτείται είναι ίση με την υδροστατική πίεση ($P_{υδρ} = \rho \cdot h$) που δημιουργείται από την ανύψωση της στάθμης του διαλύματος όταν το φαινόμενο έχει καταλήξει σε ισορροπία.

Μεταξύ δύο διαλυμάτων :

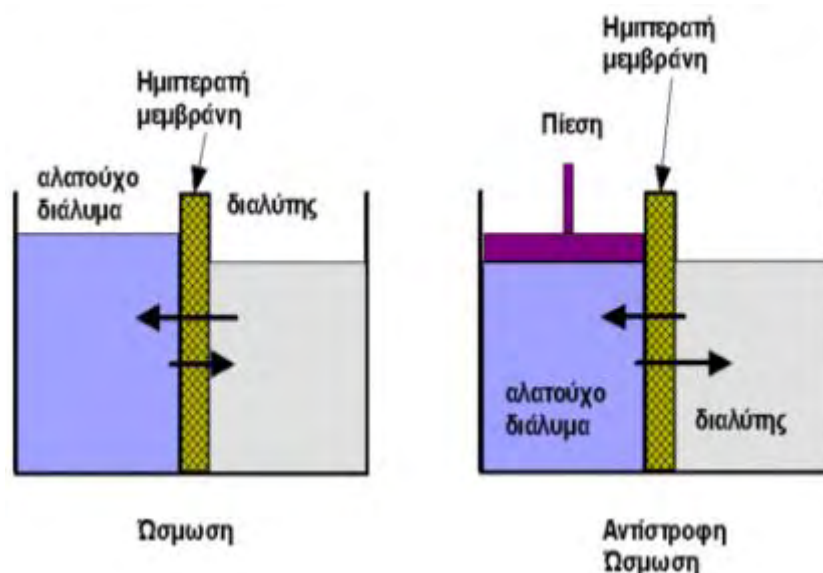
- Ισοτονικά ονομάζονται αν έχουν την ίδια τιμή ωσμωτικής πίεσης.
- Υποτονικό ονομάζεται το διάλυμα που έχει τη μικρότερη τιμή ωσμωτικής πίεσης.
- Υπερτονικό ονομάζεται το διάλυμα που έχει τη μεγαλύτερη τιμή ωσμωτικής πίεσης.



Σχήμα 4.2: Για να μη συμβεί ώσμωση μπορούμε να ασκήσουμε εξωτερική πίεση ($P_{εξ}$) ίση με την ωσμωτική, δηλ. $P_{εξ} = \Pi$

4.3 Αρχή λειτουργίας αντίστροφης ώσμωσης

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου στηρίζεται σε αντιστροφή του φυσικού φαινομένου της ώσμωσης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, φυσιολογικά, όταν δυο υγρά με διαφορετική πυκνότητα έρθουν σε επαφή, τότε υπάρχει κινητικότητα μέχρι να υπάρξει ισορροπία, δηλαδή όλο το μείγμα να αποκτήσει την ίδια πυκνότητα, (Σχήμα 4.3α). Αν όμως ασκηθεί πίεση στο αλατούχο διάλυμα, υψηλότερη της ωσμωτικής, τότε η ροή αντιστρέφεται και υφίσταται έξοδος καθαρού νερού από το αλατούχο διάλυμα προς το διαλύτη, (Σχήμα 4.3β). Στις σύγχρονες εφαρμογές αφαλάτωσης, η διαδικασία της αντιστροφής ώσμωσης είναι αυτοματοποιημένη με μια αντλία υψηλής πίεσης να διοχετεύει συνεχώς θαλασσινό νερό σε μεμβράνες που βρίσκονται μέσα σε ένα δοχείο υψηλής πίεσης (high pressure vessel). Το διάλυμα τροφοδοσίας (feed water) διαχωρίζεται στο διήθημα (καθαρό νερό, 40 - 50% του νερού εισόδου) που διέρχεται από τις μεμβράνες (permeate water) και στο απορριπτόμενο διάλυμα υψηλής συγκέντρωσης αλάτων, την άλμη ή αλμόλουπο (brine). Το απορριπτόμενο διάλυμα είναι το 50-60% του νερού τροφοδοσίας και εκεί παραμένει το 99,8 % των αλάτων του διηθήματος. Το διήθημα είναι νερό εξαιρετικά χαμηλής περιεκτικότητας σε άλατα κατάλληλο για ύδρευση, άρδευση και τις περισσότερες βιομηχανικές χρήσεις[43] .

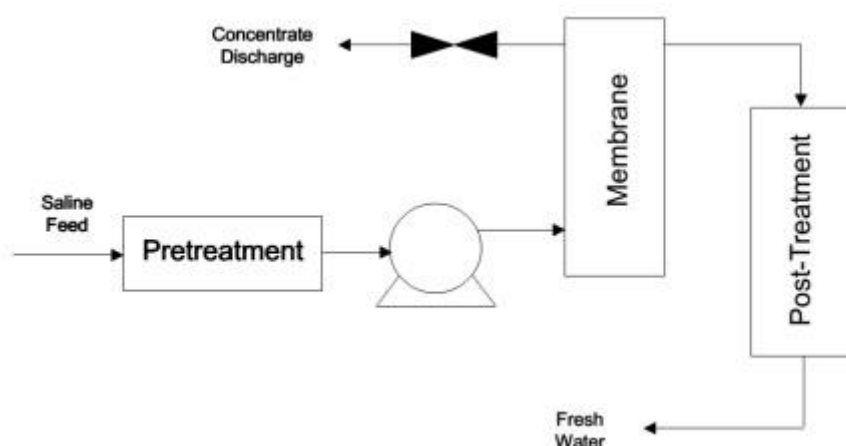


Σχήμα 4.3: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου (α) της ώσμωσης και (β) της αντίστροφης ώσμωσης

4.3.1 Περιγραφή της διεργασίας αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση

Μία εγκατάσταση RO αποτελείται από τα εξής στάδια-διατάξεις όπως φαίνεται στο παρακάτω (Σχήμα 4.4):

- την προ-επεξεργασία,
- στάδιο αντίστροφης ώσμωσης (αντλία υψηλής πίεσης, διάταξη μεμβρανών)
- τη μετά-επεξεργασία



Σχήμα 4.4: Απεικόνιση λειτουργίας μονάδας αφαλάτωσης με τη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης[46]

Προ-επεξεργασία

Η προ-επεξεργασία είναι πολύ σημαντική στη διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης (RO) επειδή προστατεύει τις επιφάνειες της μεμβράνης και επίσης παρέχει προστασία στις αντλίες υψηλής πίεσης και στη γενικότερα στη εγκατάσταση. Η φύση της προ-επεξεργασίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του ύδατος τροφοδοσίας, τον τύπο και τη διαμόρφωση της μεμβράνης, τον λόγο ανάκτησης και την απαιτούμενη ποιότητα νερού του παραχθέντος προϊόντος. Σε αυτό το στάδιο, το θαλασσινό νερό υφίσταται επεξεργασία έτσι ώστε να καταστραφούν οι μικροοργανισμοί και να αποφευχθεί η εναπόθεση αλάτων στις μεμβράνες. Η προ-επεξεργασία του θαλάσσιου νερού συνήθως περιλαμβάνει:

- ✓ Φίλτρο εισόδου (με τοποθέτηση σχάρας στην αναρρόφηση για να μην εισέλθουν ψάρια, φύκια και πλαστικά).
- ✓ Προ-χλωρίωση του θαλάσσιου νερού (με διάλυμα υποχλωριούχου νατρίου).
- ✓ Προσθήκη οξέος (συνήθως θειικό οξύ για τη ρύθμιση της οξύτητας και την αποφυγή απόθεσης αλάτων).

- ✓ Συσσωμάτωση των κολλοειδών/οργανικών ουσιών (με προσθήκη χλωριούχου σιδήρου και ηλεκτρολύτη)
- ✓ Φίλτρο άμμου SF, με χαλαζιακή άμμο ειδικών διαβαθμίσεων, καθώς και ανθρακίτη για την κατακράτηση ακόμα μικρότερων στερεών αιωρούμενων σωματιδίων.
- ✓ Φίλτρα πολυπροπυλενίου για κατακράτηση των στερεών ουσιών με μέγεθος μέχρι και 1μm, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν φθορά στις μεμβράνες.
- ✓ Αποχλωρίωση ,με θειούχο νάτριο ή φίλτρο ενεργού άνθρακα για την κατακράτηση χλωρίου, οργανικών ουσιών, επιφανειακών παραγώγων, γιατί οι μεμβράνες καταστρέφονται στην παρουσία ελεύθερου χλωρίου.
- ✓ Αποστείρωση με υπεριώδη ακτινοβολία

Στάδιο αντίστροφης ώσμωσης

Αντλίες υψηλής πίεσης (Εικόνα 4.2) παρέχουν την κατάλληλη πίεση που απαιτείται για να επιτρέψει στο νερό να διέλθει μέσω της μεμβράνης όπου η ημιπερατή μεμβράνη περιορίζει τη διέλευση των διαλυμένων αλάτων επιτρέποντας ταυτόχρονα την διέλευση του νερού. Στη συνέχεια, το συμπυκνωμένο νερό άλμης εκκενώνεται στη θάλασσα. Αυτή η πίεση κυμαίνεται από 15 έως 25 bar για το υφάλμυρο νερό και από 54 έως 80 bar για το θαλάσσιο νερό. Την ίδια στιγμή ένα μέρος του νερού που τροφοδοτείται στις μεμβράνες απορρίπτεται χωρίς να περάσει μέσα από αυτές. Χωρίς αυτή την ελεγχόμενη απόρριψη, η συγκέντρωση των αλάτων στο νερό θα συνέχιζε να αυξάνει, με επακόλουθο την εναπόθεση των υπερκορεσμένων αλάτων και αύξηση της ώσμωτικής πίεσης κατά μήκος των μεμβρανών. Η ποσότητα του νερού αυτού είναι μεταξύ 20% και 70% της ροής τροφοδοσίας και εξαρτάται από τη συγκέντρωση των αλάτων στο νερό τροφοδοσίας.



Εικόνα 4.2: Αντλία υψηλής πίεσης κατάλληλη για αντίστροφη ώσμωση

Διάταξη μεμβρανών

Οι μεμβράνες RO πρέπει να είναι ημιδιαπερατές, να έχουν υψηλό βαθμό διαπερατότητας στο νερό αλλά να παρουσιάζουν ένα αδιαπέραστο εμπόδιο στα άλατα. Μια μεμβράνη πρέπει να έχει μεγάλη επιφάνεια για να επιτρέπει τη μέγιστη ροή. Υπάρχουν διαθέσιμες μεμβράνες οι οποίες είναι κατάλληλες για λειτουργία αντλίας έως και 84 kg / cm^2 . Αυτή η πίεση κυμαίνεται από 54 έως 80 bar για το θαλασσινό νερό, ανάλογα με την περιεκτικότητα σε αλάτι. Οι μεμβράνες RO κατασκευάζονται σε ποικίλες διαμορφώσεις. Δύο από τις πλέον εμπορικά επιτυχείς στοιχεία μεμβρανών τα οποίες θα δούμε και αναλυτικότερα στη συνέχεια είναι σπειροειδείς (spiral wound) και των κοίλων ινών (hollow fine fibre), και τα δύο χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση του υφάλμυρου νερού και του θαλασσινού νερού.

Μετά-επεξεργασία

Στο στάδιο της μετά-επεξεργασίας πραγματοποιείται η προετοιμασία του παραγόμενου νερού ώστε να αρχίσει η διανομή του. Αυτή η προετοιμασία περιλαμβάνει:

- ✓ την απομάκρυνση των διαλυμένων αερίων όπως το υδρόθειο H_2S , και το διοξείδιο του άνθρακα CO_2 , την ρύθμιση της οξύτητας (pH) με την προσθήκη ασβεστίου (Ca) ή νατρίου (Na) για να ικανοποιήσει τις προδιαγραφές του πόσιμου νερού
- ✓ Ρύθμιση της οξύτητας (pH) και αύξηση της σκληρότητας (με προσθήκη ειδικά επεξεργασμένου ασβέστη και διοξειδίου του άνθρακα)
- ✓ και την τελική χλωρίωση.

Στην μέθοδο αυτή το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που καταναλώνεται χρησιμοποιείται από τις αντλίες που ασκούν πίεση στο νερό. Η σημαντικότερη απώλεια ενέργειας είναι η εκτόνωση της άλμης, όταν βγαίνει με υψηλή πίεση από τη συσκευή και γι' αυτό, σε μεγάλες κυρίως μονάδες, υπάρχουν συστήματα ανάκτησης της ενέργειας αυτής, όπως υδροστρόβιλοι, με αποτελεσματικότητα μέχρι και 95%.



Εικόνα 4.3: Εργοστάσιο αντίστροφης ώσμωσης RO στη Μάλτα με ικανότητα παραγωγής 24,000 m³/ημέρα

4.3.2 Απόρριψη του υπολείμματος (άλμης)

Το τελικό στάδιο της διεργασίας αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση αποτελεί η απόρριψη του υπολείμματος, δηλαδή της άλμης. Το στάδιο αυτό, αν και εκ πρώτης όψεως φαίνεται απλό, παρουσιάζει δύο σημαντικά προβλήματα που έχουν να κάνουν με το χώρο απόρριψης:

- Την πολύ υψηλή συγκέντρωση σε άλατα, και κατ' επέκταση ώσμωτική πίεση, της άλμης
- Την παρουσία στο ρεύμα απόρριψης χημικών που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενα στάδια για τον καθαρισμό του νερού και των μεμβρανών.

Η συγκέντρωση της άλμης σε άλατα μπορεί να είναι από 50 – 100% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του θαλασσινού νερού τροφοδότησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή ωσμωτική πίεση του διαλύματος (περίπου 50 bar), τιμή πολύ μεγαλύτερη αυτής του θαλασσινού νερού. Συνεπώς, η απόρριψη ενός τέτοιου ρεύματος κατευθείαν στη θάλασσα μπορεί να βλάψει τα τοπικά οικοσυστήματα, διότι τα είδη που τα αποτελούν είναι προσαρμοσμένα στις συνήθεις συνθήκες ωσμωτικής πίεσης.

Το πρόβλημα αυτό λύνεται κυρίως μέσω:

- Αραίωσης της άλμης με θαλασσινό νερό και απόρριψη του μίγματος αυτού, στην περίπτωση ύπαρξης απορριπτόμενου ρεύματος θαλασσινού νερού από άλλη διεργασία (πχ. εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας δίπλα σε μονάδα αφαλάτωσης). Έτσι, το τελικό απορριπτόμενο μίγμα έχει συγκέντρωση σε άλατα μεγαλύτερη κατά 10 – 15% σε σχέση με το θαλασσινό νερό, που είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια.
- Απευθείας εκτόξευσης του υπολείμματος στην επιφάνεια της θάλασσας με χρήση κατάλληλης διάταξης. Όταν δεν είναι δυνατή η αραίωση της άλμης, τότε μια λύση είναι η απ' ευθείας απόρριψή της στη θάλασσα. Όμως, η απόρριψη αυτή δεν πρέπει να γίνεται στον πυθμένα, καθώς η κίνηση των υδάτων εκεί είναι πολύ αργή και δεν γίνεται σωστή ανάμειξη, με αποτέλεσμα την δημιουργία περιοχών με υψηλή συγκέντρωση σε άλατα. Η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η επιφανειακή απόρριψη της άλμης μέσω εκτόξευσης, όπου επιτυγχάνεται καλύτερη ανάμειξη και ομογενοποίηση.
- Λιχοδέτευσης της άλμης σε αλυκές (salt evaporation ponds), με σκοπό την ανάκτηση των αλάτων μέσω εξάτμισης του νερού, είτε σε ηλιακές λίμνες (solar ponds), με σκοπό την παραγωγή ενέργειας.

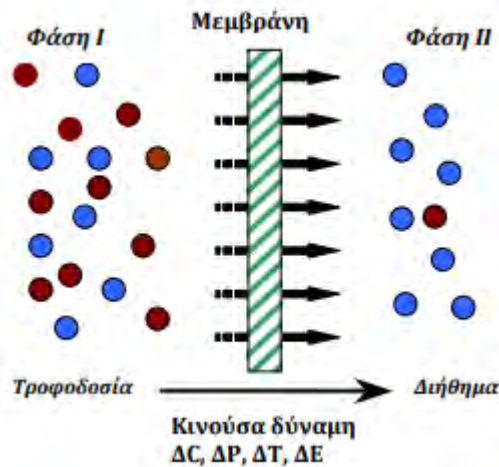
Η παρουσία στο ρεύμα απόρριψης, χημικών που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενα στάδια για τον καθαρισμό του νερού και των μεμβρανών, αποτελεί το δεύτερο σημαντικό παράγοντα που πρέπει να αντιμετωπιστεί για την ασφαλή απόρριψη της άλμης στη θάλασσα. Τα χημικά που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι υψηλής καθαρότητας και με χαμηλό περιεχόμενο σε φώσφορο. Επίσης, πρέπει τα χρησιμοποιημένα χημικά καθαρισμού των μεμβρανών να αδρανοποιούνται πριν απορριφθούν, ώστε να ελαχιστοποιείται η επιβάρυνση των θαλάσσιων οικοσυστημάτων.

4.4 Μεμβράνες

Με τον όρο μεμβράνη χαρακτηρίζεται το ημιπερατό υλικό που επιτρέπει την εκλεκτική διέλευση του υγρού διαλύτη, ενώ παράλληλα εμποδίζει τη διέλευση, ανάλογα με τη διεργασία, των διεσπαρμένων κolloειδών ή ενυδατωμένων ιόντων. Για την περίπτωση της αφαλάτωσης, από ενεργειακής σκοπιάς, ο διαχωρισμός με μεμβράνες εμφανίζει ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των θερμικών μεθόδων. Σε αντίθεση με την εξάτμιση και την απόσταξη, δε λαμβάνει χώρα αλλαγή φάσης κι έτσι αποφεύγεται η κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την λανθάνουσα θερμότητα. Τα παρακάτω στοιχεία που αφορούν τις μεμβράνες αντλήθηκαν από την παρακάτω διδακτορική διατριβή[43].

Οι διεργασίες μεμβρανών είναι μία σχετικά νέα τεχνολογία, μιας και η εμπορική τους χρήση ξεκίνησε κατά την δεκαετία του '70. Σήμερα, χαρακτηρίζονται από ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών εφαρμογών που συνεχώς αυξάνεται. Η ταξινόμηση τους μπορεί να γίνει με διαφορετικούς τρόπους, ανάλογα με α) το υλικό κατασκευής της μεμβράνης, β) τη φύση της κινούσας δύναμης, γ) τον μηχανισμό διαχωρισμού, δ) το μέγεθος των πόρων της μεμβράνης, κ.α. Σε μία διεργασία μεμβρανών, το σημαντικότερο στοιχείο της είναι η μεμβράνη, (Σχήμα 4.5).

Η φάση I είναι συνήθως η τροφοδοσία, ενώ η φάση II περιλαμβάνει το παραγόμενο προϊόν των μεμβρανών, που καλείται διήθημα. Ο διαχωρισμός επιτυγχάνεται λόγω της ιδιότητας που εμφανίζει η μεμβράνη, να επιτρέπει τη μεταφορά ενός συστατικού (συνήθως του διαλύτη) πιο εύκολα απ' ό,τι τα υπόλοιπα, εξαιτίας των φυσικοχημικών διαφορών μεταξύ της μεμβράνης και των συστατικών του διηθήματος. Συγκεκριμένα, η μεταφορά είναι αποτέλεσμα της κινούσας δύναμης που επιδρά στα συστατικά της τροφοδοσίας. Η δύναμη αυτή, μπορεί να είναι η διαφορά της πίεσης, ΔP , της συγκέντρωσης, ΔC , της θερμοκρασίας, ΔT , ή του ηλεκτρικού δυναμικού, ΔE .



Σχήμα 4.5: Σχηματική απεικόνιση ενός διφασικού συστήματος διαχωριζόμενου από μεμβράνη

Οι μεμβράνες με τις περισσότερες και σημαντικότερες εμπορικές εφαρμογές σήμερα είναι οι μεμβράνες των οποίων η λειτουργία στηρίζεται στη διαφορά πίεσης. Το βασικό χαρακτηριστικό των διεργασιών αυτών είναι ότι ο διαλύτης αποτελεί την συνεχή φάση και ότι η συγκέντρωση του διαλύματος είναι σχετικά μικρή. Σημειώνεται επίσης πως τα δομικά χαρακτηριστικά της μεμβράνης (π.χ. ενεργός στοιβάδα, μέγεθος και κατανομή μεγέθους των πόρων) που επιλέγονται για μια διεργασία καθορίζονται με βάση το μέγεθος και τις χημικές ιδιότητες του διαλύτη αλλά και των διαλυμένων στερεών που πρόκειται να διαχωριστούν.

Οι μεμβράνες μπορούν να επιτύχουν τον διαχωρισμό ενώσεων που ανήκουν σε μια μεγάλη περιοχή μεγεθών και μοριακών βαρών, από μακρομοριακά συστατικά, όπως το άμυλο και οι πρωτεΐνες, μέχρι μονοθενικά ιόντα. Σε έναν διαχωρισμό υγρού/στερεού, το βασικό κριτήριο για την επιλογή της κατάλληλης μεμβράνης αποτελεί το μέγεθος του συστατικού που επιδιώκεται να διαχωριστεί.

Ανάλογα με την πίεση που ασκείται στη μεμβράνη και το μέγεθος των σωματιδίων της διαλυμένης ουσίας που συγκρατείται και συνεπώς ανάλογα με το μέγεθος πόρων της μεμβράνης, οι διεργασίες μεμβρανών διακρίνονται: στην μικροδιήθηση (microfiltration), στην υπερδιήθηση (ultrafiltration), στην νανοδιήθηση (nanofiltration) και στην αντίστροφη ώσμωση (Πίνακας 4.1).

- ❖ Μικροδιήθηση (MF): χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση σωματιδίων μεγέθους 0.08-2 μm . Αφαιρούνται κατ' αυτόν τον τρόπο βακτήρια, θραύσματα κυττάρων, κολλοειδή κ.α. Χρησιμοποιείται για εφαρμογές καθαρισμού νερού, επεξεργασίας λυμάτων κ.α[53].
- ❖ Υπερδιήθηση(UF): οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την τεχνολογία έχουν μέγεθος πόρων 0,01-0,1 μm . Μόνο το νερό και μόρια χαμηλού μοριακού βάρους μπορούν να διέλθουν μέσω της μεμβράνης ενώ συγκρατούνται μόρια υψηλού μοριακού βάρους όπως πολυμερή, πρωτεΐνες, κολλοειδή κ.α. Χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία τροφίμων και ποτών, σε βιοτεχνολογικές εφαρμογές, στη βιομηχανία πετροχημικών κ.α[53].
- ❖ Νανοδιήθηση (NF): Η τεχνολογία αυτή μας δίνει τη δυνατότητα να διαχωρίσουμε ενώσεις χαμηλού μοριακού βάρους ενώ οι πιέσεις που ασκούνται είναι χαμηλές ή μέσες. Συγκρατούνται πολυσθενή ιονισμένα άλατα (ασβεστίου, μαγνησίου) και οργανικές ενώσεις με μικρό μοριακό βάρος και έτσι παράγεται νερό που δεν είναι πλήρως αφαλατωμένο (όπως στην αντίστροφη ώσμωση). Χρησιμοποιείται για επιλεκτική αφαλάτωση[53].
- ❖ Αντίστροφη ώσμωση (RO): Αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνολογία μεμβρανών για την αφαλάτωση του υφάλμυρου και θαλασσινού νερού έχοντας τη δυνατότητα συγκράτησης στοιχείων και ενώσεων χαμηλού μοριακού βάρους. Απαιτείται υψηλή πίεση λειτουργίας. Την τελευταία δεκαετία έχει δημιουργηθεί μία νέα κατηγορία διεργασιών μεμβρανών, οι λεγόμενοι βιοαντιδραστήρες (membrane bioreactors), η λειτουργία των οποίων αποτελεί συνδυασμό βιοαντιδράσεων και διαχωρισμού με μεμβράνες

Τεχνολογία	Κινητήριος δύναμη	Μηχανισμός λειτουργίας	Λειτουργική δομή Μέγεθος πόρων	Τυπικό, Εύρος, Λειτουργίας μεμβράνης (μm)	Περιγραφή συγκρατούμενων σωματιδίων
Μικροδιήθηση (MF)	Διαφορά πίεσης (1-5bar)	Διαμέσου πόρων (κόσκινο)	Μακρόποροι (>50nm)	0,08-2,0	Αιωρούμενα στερεά, μερικά βακτήρια+ μικρόβια
Υπερδιήθηση (UF)	Διαφορά πίεσης (1-10bar)	Διαμέσου πόρων (κόσκινο)	Μεσόποροι (2-50nm)	0,005-0,2	Κολλοειδή μακρομόρια, τα περισσότερα είδη βακτηρίων, ιοί
Νανοδιήθηση (NF)	Διαφορά πίεσης (5-40bar)	Διαμέσου πόρων (κόσκινο) Διάχυση, Διάλυση, Επαναδιάλυση	Μικρόποροι (<2nm)	10⁻³-10⁻²	Μικρά μόρια, μικρόβια
Αντίστροφη ώσμωση (RO)	Διαφορά πίεσης (10-100bar)	Διάχυση, Διάλυση, Επαναδιάλυση	Μη-πορώδεις <2nm	10⁻⁴-10⁻³	Πολύ μικρά μόρια, χρώμα, σκληρότητα, θειικά, Νιτρικά ιόντα

Πίνακας 4.1: Απεικόνιση του εύρους επεξεργασίας μεμβρανών και «είδος» σωματιδίων απομάκρυνσης[52]

Στην αντίστροφη ώσμωση που περιγράφηκε προηγουμένως, όταν στην πλευρά με το υψηλής συγκέντρωσης σε άλας διάλυμα ασκηθεί εξωτερική πίεση μεγαλύτερη από την ωσμωτική πίεση του διαλύματος, τότε τα μόρια του διαλύτη εξέρχονται από το πυκνότερο προς το αραιότερο διάλυμα. Η συνολική ροή νερού υπολογίζεται από την Εξ. 4.1, με την παραδοχή ότι δεν διέρχεται ποσότητα διαλυμένης ουσίας μέσα από την μεμβράνη:

$$J_w = k_w (\Delta P - \Delta \Pi) = \frac{Q_p}{A} \quad (4.1)$$

όπου J_w είναι η ανηγμένη ροή του νερού, k_w ο συντελεστής μεταφοράς του νερού, ΔP η εφαρμοζόμενη πίεση, $\Delta \Pi$ η ωσμωτική πίεση, Q_p ο ρυθμός ροής του ρεύματος του διηθήματος και A η επιφάνεια της μεμβράνης. Για την περίπτωση που διέρχεται και ορισμένη ποσότητα, έστω και ελάχιστη, της διαλυμένης ουσίας μέσω της μεμβράνης, η ανηγμένη ροή της υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$J_i = k_i \Delta C_i = \frac{Q_p C_p}{A} \quad (4.2)$$

όπου J_i είναι η ανηγμένη ροή της διαλυμένης ουσίας i , k_i ο συντελεστής μεταφοράς της διαλυμένης ουσίας, ΔC_i η διαφορά της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας μεταξύ των δύο πλευρών της μεμβράνης και C_p η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στο διήθημα. Η εξίσωση υπολογισμού της διαφοράς της συγκέντρωσης είναι η εξής:

$$\Delta C_i = \frac{C_F + C_C}{2} - C_p \quad (4.3)$$

όπου C_F η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στο ρεύμα τροφοδοσίας και C_C η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στο συμπύκνωμα.

4.4.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη των διεργασιών με μεμβράνες

Η απόδοση κάθε διεργασίας με μεμβράνες, καθορίζεται από την ικανότητά τους για παραγωγή διηθήματος υψηλής καθαρότητας, με τη μεγαλύτερη δυνατή παροχή. Τα σημαντικότερα μεγέθη που συνήθως χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της απόδοσης λειτουργίας των μεμβρανών είναι τα παρακάτω:

- Το διήθημα (permeate): είναι το κλάσμα της τροφοδοσίας που διέρχεται μέσα από τη μεμβράνη.
- Το συμπύκνωμα (concentrate): το κλάσμα της τροφοδοσίας που δεν περνά μέσα από την μεμβράνη.
- Η ανηγμένη ροή διηθήματος (permeate flux): ο όγκος (ή μάζα) του διηθήματος που διέρχεται μέσα από τη μεμβράνη ανά μονάδα επιφάνειάς της, στη μονάδα του χρόνου και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$J = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} \quad (4.4)$$

όπου J ο ρυθμός ροής του διηθήματος, A η επιφάνεια της μεμβράνης και dV/dt ο όγκος του διηθήματος που διέρχεται από τη μεμβράνη ανά μονάδα χρόνου.

- Ο συντελεστής απόρριψης ή κατακράτησης της μεμβράνης (rejection coefficient). Πρόκειται για την ποσοτική έκφραση της χαρακτηριστικής ιδιότητας των μεμβρανών. Ορίζεται ως η ποσότητα των διαλυμένων ουσιών που κατακρατούνται από τη μεμβράνη ως προς την αρχική τους ποσότητα στο ρεύμα τροφοδοσίας, δηλαδή:

$$R_0 = \frac{C_f - C_p}{C_f} = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (4.5)$$

- Ο βαθμός ανάκτησης (recovery), ο οποίος ορίζεται από την σχέση:

$$r(\%) = \frac{Q_p}{Q_f} \times 100 \quad (4.6)$$

όπου Q_F είναι ο ρυθμός ροής του ρεύματος τροφοδοσίας και Q_p ο ρυθμός ροής του διηθήματος.

- Η υδραυλική διαφορά πίεσης στην μεμβράνη (transmembrane pressure-TMP). Στην πράξη υπολογίζεται ως η μέση τιμή της διαφοράς πίεσης στην είσοδο και στην έξοδο του στοιχείου μεμβράνης.
- Το μοριακό όριο διαχωρισμού της μεμβράνης (molecular weight cut off, MWCO). Αποτελεί το τυπικό μοριακό βάρος των σωματιδίων που δύναται να συγκρατήσει η μεμβράνη.

4.4.2 Υλικά παραγωγής πολυμερικών μεμβρανών

Η επιλογή του υλικού της μεμβράνης επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού μέσω των συντελεστών μεταφοράς k_w και k_i . Σε γενικές γραμμές, επιδιώκεται το υλικό κατασκευής των μεμβρανών να χαρακτηρίζεται από όσο το δυνατόν μεγαλύτερο k_w και k_i .

Εξίσου σημαντική με την εκλεκτικότητα, θεωρείται και η περατότητα (permeability) μιας μεμβράνης. Γενικά, η ανηγμένη ροή του διηθήματος μπορεί να βελτιωθεί με τη μείωση του πάχους της μεμβράνης. Κατά προσέγγιση, η ροή είναι αντιστρόφως ανάλογη του πάχους της μεμβράνης και για το λόγο αυτό οι περισσότερες μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης εμφανίζουν ασύμμετρη δομή με ένα λεπτό, πυκνό άνω στρώμα πάχους ≤ 1 μm υποστηριζόμενο από ένα πορώδες υπόστρωμα πάχους $\approx 50\text{-}150$ μm . Η αντίσταση στη μεταφορά μάζας προέρχεται κατά κύριο λόγο από το πυκνό άνω στρώμα, το οποίο καλείται ενεργός στοιβάδα (active layer). Ανάλογα με το εάν η ενεργός επιφάνεια και το υπόστρωμα είναι κατασκευασμένες από το ίδιο υλικό, οι μεμβράνες διακρίνονται στις απλές ασύμμετρες (όμοιο υλικό) και στις μικτές ασύμμετρες (διαφορετικό υλικό).

Στην περίπτωση της αντίστροφης ώσμωσης οι μεμβράνες, που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι κυρίως 3 τύπων:

- Μεμβράνες οξικής κυτταρίνης (cellulose acetate membranes – CA)
- Μεμβράνες αρωματικών πολυαμιδίων (aromatic polyamide membranes - PA)
- Σύνθετες μεμβράνες λεπτού φιλμ (thin film composite membranes – TFC)

❖ **Μεμβράνες οξικής κυτταρίνης (cellulose acetate membranes – CA)**

Μια σημαντική κατηγορία απλών ασύμμετρων μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης, που κατασκευάζονται με αλλαγή φάσης, είναι οι κυτταρικοί εστέρες (CA) και κυρίως η διόξινη (diacetate) και τριοξική κυτταρίνη (triacetate cellulose). Τα υλικά αυτά είναι κατάλληλα για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού λόγω της υψηλής τους διαπερατότητας από το νερό, αλλά και της υψηλής συγκράτησης των αλάτων. Μολονότι οι μεμβράνες που είναι κατασκευασμένες από τα παραπάνω υλικά, χαρακτηρίζονται από εξαιρετικές λειτουργικές ιδιότητες, εντούτοις εμφανίζουν ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα, όπως είναι η χαμηλή αντοχή έναντι των χημικών πρόσθετων και η υποβάθμιση των χαρακτηριστικών τους από μεταβολές της θερμοκρασίας ή από την παρουσία βακτηρίων. Οι τυπικές συνθήκες λειτουργίας αφορούν τιμές pH 5-7 και θερμοκρασίες < 30°C για την αποφυγή υδρόλυσης των πολυμερικών αλυσίδων. Σημαντικά, επίσης, μειονεκτήματα των μεμβρανών που είναι κατασκευασμένες από κυτταρικούς εστέρες, αποτελούν η ταχεία υποβάθμισή τους καθώς και η χαμηλή εκλεκτικότητα τους έναντι των μικρών οργανικών μορίων.

❖ **Μεμβράνες αρωματικών πολυαμιδίων (aromatic polyamide membranes – PA)**

Τα τελευταία χρόνια, τα αρωματικά πολυαμίδια (PA) αποτελούν τα κύρια υλικά κατασκευής των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης. Τα πολυαμίδια παρουσιάζουν εξίσου υψηλές εκλεκτικότητες έναντι των αλάτων όπως και η κυτταρίνη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τιμές pH από 3 ως 11, ωστόσο η ροή του νερού διαμέσου τους είναι ελαφρώς χαμηλότερη. Το σημαντικότερο όμως μειονέκτημα των πολυαμιδίων είναι η ευαισθησία τους έναντι του ελεύθερου χλωρίου (Cl₂), το οποίο και προκαλεί αποικοδόμηση της ομάδας του αμιδίου.

❖ **Σύνθετες μεμβράνες λεπτού φιλμ ,thin film composite (TFC)**

Οι σύνθετες μεμβράνες (composite membranes) (TFC) αποτελούν τον πιο συνηθισμένο τύπο δομής που χρησιμοποιείται στις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης, ενώ αποκλειστικά σύνθετες είναι και οι μεμβράνες νανοδιήθησης. Στις τελευταίες, το ενεργό στρώμα και το υπόστρωμα αποτελούνται από διαφορετικά πολυμερικά υλικά, οπότε η βελτιστοποίηση της μεμβράνης αφορά τη βελτιστοποίηση καθενός από τα επιμέρους στρώματά της, παρουσιάζουν δε άριστη απόρριψη αλάτων, απόλυτη απόρριψη οργανικών ουσιών, υψηλή ανθεκτικότητα με εύρος pH 2-11 και θερμοκρασία λειτουργίας (0-45 °C) ενώ έχουν περιορισμένη ανοχή στο χλώριο.

Οι σύνθετες μεμβράνες παρουσιάζουν συνήθως μεγαλύτερη απόρριψη σε χαμηλότερες πιέσεις λειτουργίας από τα μείγματα οξικής κυτταρίνης. Τα σύνθετα υλικά της μεμβράνης μπορεί να είναι πολυαμίδιο, πολυσουλφόνη, πολυουρεθάνης, ή άλλα πολυμερή.

Ο παρακάτω (Πίνακας 4.2) παρέχει μια επισκόπηση των λειτουργικών προδιαγραφών που πάρθηκαν από βιβλιογραφικά δεδομένα[50], των στοιχείων της σύνθετης μεμβράνης RO τύπου SW30HR0380 . Είναι κατασκευασμένη από πολυαμίδιο σύνθετο λεπτό φιλμ (πάχους 1 μm) που υποστηρίζεται από στρώμα πολυσουλφόνης (πάχος 140 μm) διαμορφωμένο με σπειροειδές τύλιγμα spiral wound, με υψηλή αποδοτικότητα απόρριψης άλατος.

Τύπος Μεμβράνης	SW30HR-380
Υλικό μεμβράνης	Σύνθετη μεμβράνη από πολυαμίδιο
Αποτελεσματική περιοχή μεμβράνης (m ²)	35
Ροή διαπερατότητας (m ³ /d)	23
Απόρριψη άλατος (%)	99.7
Μέγιστη πίεση λειτουργίας (bar)	83
Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	45
Εύρος Ph	2-11

Πίνακας 4.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά μεμβράνης τύπου SW30HR-380[50]

Γενικά χαρακτηριστικά μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης

- Σχηματίζονται από λεπτό στρώμα από πολυμερές υλικό πάχους αρκετών χιλιάδων Angstroms το οποίο ρίχνεται σε πολυμερές πορώδες υλικό.
- Οι εμπορικές μεμβράνες έχουν υψηλή διαπερατότητα νερού και υψηλό βαθμό ημιδιαπερατότητας, δηλαδή το ποσοστό της μεταφοράς νερού πρέπει να είναι πολύ υψηλότερο από το ρυθμό μεταφοράς των διαλυμένων ιόντων
- Η μεμβράνη πρέπει να είναι σταθερή σε ένα ευρύ φάσμα του Ph και της θερμοκρασίας και να έχουν καλή μηχανική ακεραιότητα. Η ζωή των εμπορικών μεμβρανών κυμαίνεται μεταξύ 3-5 ετών. Κατά μέσο όρο, το ετήσιο ποσοστό αναπλήρωσης μεμβρανών ανέρχεται σε 5-15%. Αυτό εξαρτάται από την ποιότητα του τροφοδοτικού νερού, τις συνθήκες προ-επεξεργασίας και τη σταθερότητα της λειτουργίας.

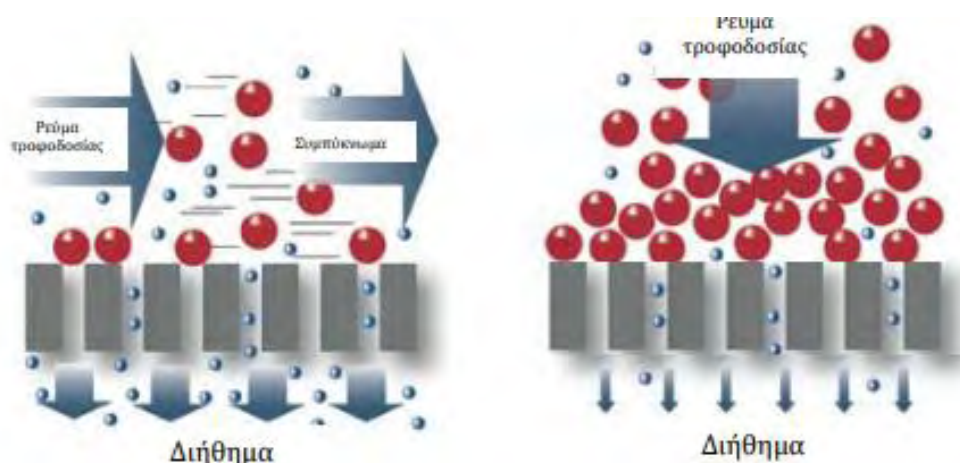
	ΑΡΩΜΑΤΙΚΑ ΠΟΛΥΑΜΙΔΙΑ	ΕΣΤΕΡΕΣ ΚΥΤΤΑΡΙΝΗΣ
Απόρριψη αλατιού	>99%	~ 95%
Κινητήρια Πίεση	150-250 psi	200-400 psi
Προεπεξεργασία	Αναγκαία	Προτείνεται
Όρια pH	1-13	4-6
Επιφανειακή Φόρτιση	Ανιονική	Ουδέτερη
Συχνότητα καθαρισμού	Συχνή	Σπάνια
Αφαίρεση Οργανικών	Αποτελεσματική	Καλή
Βιοσυσσώρευση	Προβληματική	Όχι προβληματική
Οξειδωτικά	Όχι ανεκτικά	Ανεκτικά

Πίνακας 4.3: Γενικά χαρακτηριστικά μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης αρωματικά πολυαμίδια, εστέρες κυτταρίνης

4.4.3 Τρόποι λειτουργίας των στοιχείων μεμβρανών

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος διήθησης χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλία, λόγω του μεγάλου αριθμού των εφαρμογών, αλλά και των τρόπων διάταξης των στοιχείων της μεμβράνης. Ο σχετικά απλούστερος τρόπος λειτουργίας ενός στοιχείου μεμβράνης είναι η κατά μέτωπο διήθηση (dead end filtration), η οποία και απαντάται κυρίως στη μικροδιήθηση. Στην κατά μέτωπο διήθηση, το ρεύμα τροφοδοσίας λόγω της εφαρμοζόμενης πίεσης κινείται κάθετα προς την επιφάνεια της μεμβράνης, όπως φαίνεται και στο (Σχήμα 4.6β), με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται μόνο δύο ρεύματα, αυτό της τροφοδοσίας και του διηθήματος. Τα σωματίδια που συγκρατούνται, συγκεντρώνονται στην επιφάνεια της μεμβράνης σχηματίζοντας μία στοιβάδα επικαθίσεων (cake), ενώ το παραγόμενο διήθημα συλλέγεται και απομακρύνεται.

Με σκοπό τον περιορισμό των επικαθίσεων και του περιορισμού του φαινομένου της πόλωσης συγκέντρωσης στην επιφάνεια της μεμβράνης αναπτύχθηκε η διήθηση εφαπτομενικής ροής (cross-flow filtration). Κατά τον τρόπο αυτό, το ρεύμα τροφοδοσίας ρέει παράλληλα προς την επιφάνεια της μεμβράνης, ενώ μόνο ένα κλάσμα του διαλύτη διέρχεται μέσα από τη μεμβράνη (διήθημα). Η παρουσία των σχετικά ισχυρών διατμητικών τάσεων, λόγω της εφαπτομενικής ταχύτητας, ευνοεί την αποκόλληση και απομάκρυνση μέρους των επικαθίσεων που έχουν σχηματιστεί στην επιφάνεια της μεμβράνης και τείνει να μειώσει την πόλωση συγκέντρωσης.



Σχήμα 4.6: Τρόποι λειτουργίας στοιχείων μεμβρανών: α) διήθηση εφαπτομενικής ροής και β) κατά μέτωπο διήθηση

4.4.4 Στοιχεία μεμβρανών

Η διαμόρφωση ενός στοιχείου μεμβρανών που χρησιμοποιείται σε μια διεργασία διαχωρισμού στερεού/υγρού, καθορίζεται από τις απαιτήσεις του εκάστοτε διαχωρισμού και είναι συνάρτηση παραγόντων όπως το ιζώδες, η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών, το μέγεθος των σωματιδίων και η θερμοκρασία. Γενικά, στις διεργασίες μεμβρανών συναντώνται τέσσερις τύποι στοιχείων:

- Τα στοιχεία επίπεδης διαμόρφωσης (Plate and frame)
- Τα σωληνοειδή στοιχεία (Tubular)
- Τα στοιχεία σπειροειδούς διαμόρφωσης (Spiral wound)
- Τα στοιχεία κοίλων λεπτών ινών (Hollow fine fiber)

Μία συνοπτική σύγκριση των τεσσάρων τύπων στοιχείων περιλαμβάνεται στον (Πίνακα 4.4). Στη συντριπτική πλειοψηφία των εφαρμογών για την επεξεργασία του νερού, χρησιμοποιούνται στοιχεία σπειροειδούς διαμόρφωσης μιας και παρουσιάζουν μεγαλύτερο λόγο επιφάνειας προς όγκο και σε μικρότερο βαθμό τα στοιχεία κοίλων ινών.

Παράμετρος	Είδος στοιχείου			
	Επίπεδο	Σωληνοειδές	Κοίλων ινών	Σπειροειδούς διαμόρφωσης
Ειδική επιφάνεια (m^2/m^3)	300-500	30-200	500-9000	200-800
Ανθεκτικότητα σε ρύπανση	Καλή	Πολύ καλή	Χαμηλή	Μέτρια
Ευκολία καθαρισμού	Καλή	Εξαιρετική	Χαμηλή	Χαμηλή
Σχετικό κόστος	Υψηλό	Υψηλό	Χαμηλό	Χαμηλό

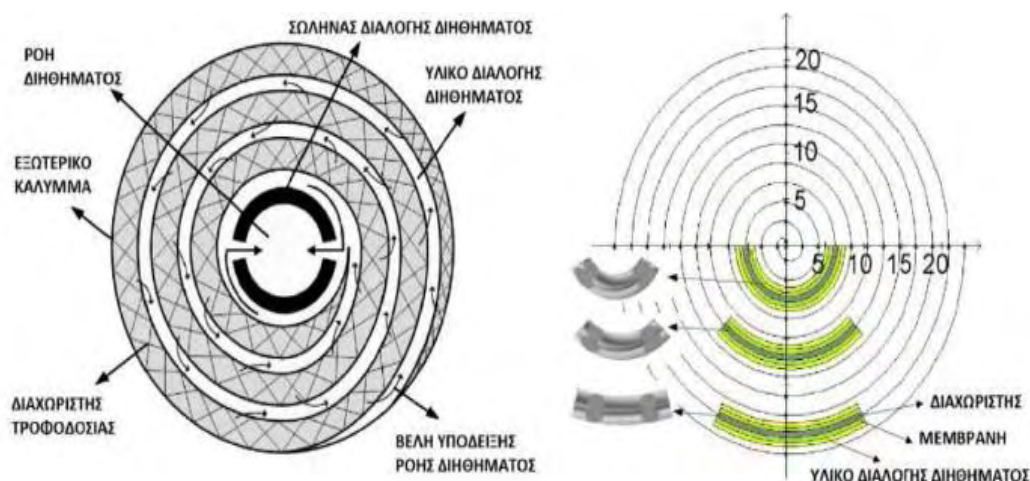
Πίνακας 4.4: Συγκριτικός πίνακας των στοιχείων μεμβρανών

- **Τα στοιχεία σπειροειδούς διαμόρφωσης (spiral wound)**

Αποτελούνται από επαλληλία διπλωμένων “φακέλων”, (Σχήμα 4.7α). Κάθε φάκελος απαρτίζεται από δυο επάλληλα φύλλα μεμβράνης, τα οποία είναι καλά σφραγισμένα με κόλλα κατά τις τρεις πλευρές τους και ενδιάμεσα περικλείουν ένα ένθετο πολυμερικό υλικό με τη μορφή πλέγματος (spacer). Η τέταρτη πλευρά του φακέλου εφαρμόζεται κατά το μήκος ενός διάτρητου σωλήνα και στη συνέχεια, ο φάκελος περιτυλίγεται γύρω από αυτόν τον κεντρικό διάτρητο σωλήνα. Η τροφοδοσία γίνεται κατά την αξονική διεύθυνση και το διήθημα, δηλαδή το ποσό της τροφοδοσίας που καταφέρνει να διαπεράσει τους πόρους της μεμβράνης, συγκεντρώνεται σε ένα υφασμάτινο πορώδες υλικό και διαγράφοντας μια ελικοειδή πορεία

καταλήγει στον κεντρικό διάτρητο σωλήνα του στοιχείου και απομακρύνεται (Εικόνα 4.4). Το συμπύκνωμα, έχοντας υψηλή συγκέντρωση αλάτων συνεχίζει να ρέει μέσω του πλέγματος και τελικά οδηγείται στην έξοδο του στοιχείου. Η χρησιμοποίηση του ένθετου, αφενός εξασφαλίζει τον διαχωρισμό μεταξύ των φύλλων της μεμβράνης και αφετέρου, συμβάλλει στην δημιουργία συνθηκών ασταθούς ή και τυρβώδους ροής, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερους συντελεστές μεταφοράς μάζας[44],[45] .

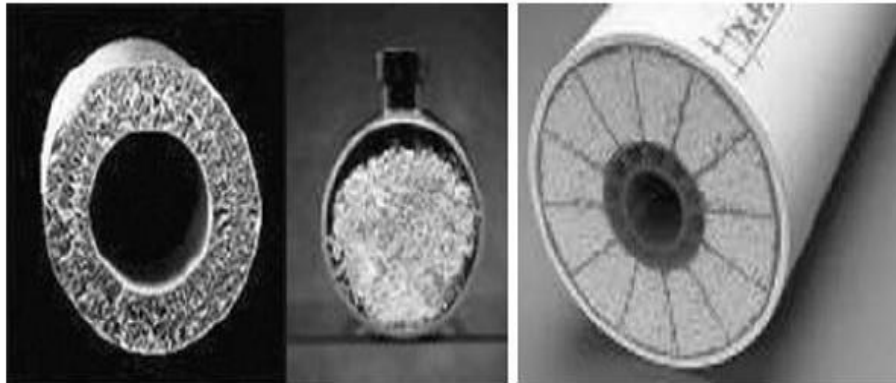
Τα στοιχεία των μεμβρανών σπειροειδούς περιέλιξης πιο συχνά κατασκευάζονται από επίπεδο φύλλο μεμβράνης είτε από μίγμα διοξικής και τριοξικής κυτταρίνης είτε από λεπτό σύνθετο επικάλυμμα. Ένα λεπτό σύνθετο επικάλυμμα μεμβράνης αποτελείται από ένα λεπτό ενεργό στρώμα ενός πολυμερούς χυτού πάνω σε ένα πιο παχύ στρώμα υποστήριξης ενός διαφορετικού πολυμερούς.



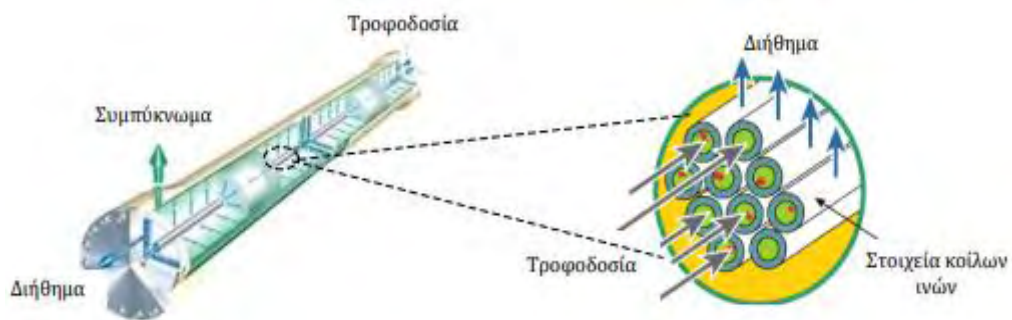
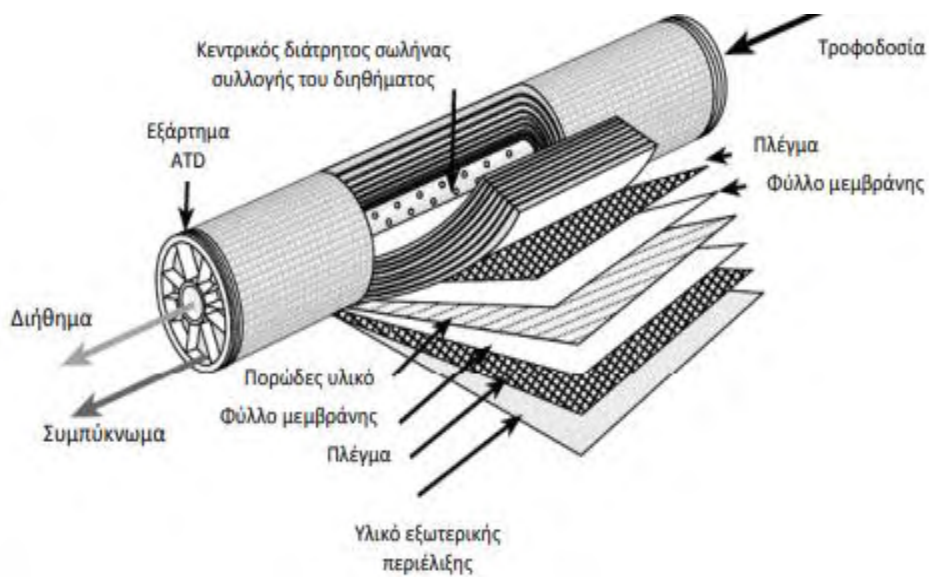
Εικόνα 4.4: Εγκάρσια τομή στοιχείου σπειροειδούς περιέλιξης[48]

- **Τα στοιχεία των λεπτών κοίλων ινών (hollow fine fiber)**

Η τροφοδοσία συνήθως γίνεται υπό πίεση από την εξωτερική πλευρά των ινών (Σχήμα 4.7β). Κάθε ίνα σωληνοειδούς διαμόρφωσης είναι καλυμμένη με λεπτή ημιπερατή μεμβράνη πάχους 0.1-1 μm. Το καθαρό νερό αφού διαπεράσει το τοίχωμα της ίνας συλλέγεται στο εσωτερικό κοίλο μέρος της. Αντίθετα, το συμπυκνωμένο ρεύμα ρέει παράλληλα προς την εξωτερική επιφάνεια των κοίλων ινών προς την έξοδο του στοιχείου και με τη βοήθεια ενός αγωγού απομακρύνεται από το στοιχείο. Τα υλικά μεμβράνης είναι μείγματα οξικής κυτταρίνης και υλικού τύπου πολυαμιδίου. Λόγω των πολύ στενά συσκευασμένων ινών και της πολύπλοκης ροής της τροφοδοτικής ροής στο εσωτερικό της μονάδας οι μεμβράνες λεπτών ινών απαιτούν νερό τροφοδοσίας καλύτερης ποιότητας (χαμηλότερη συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων) από τις μεμβράνες σπειροειδούς περιέλιξης.



Εικόνα 4.5: Εγκάρσια τομή κοίλης ίνας στοιχείου κοίλων ινών[47]



Σχήμα 4.7: Στοιχεία μεμβρανών: α) σπειροειδούς διαμόρφωσης και β) κοίλων ινών

➤ Γενικά, τα κύρια είδη των μεμβρανών είναι τα ακόλουθα και διακρίνονται ως προς μορφολογία τους στις εξής κατηγορίες (Σχήμα4.8) :

- ❖ Πυκνής δομής
- ❖ Πορώδους δομής, με δύο υποκατηγορίες: Συμμετρικές , Ασύμμετρες (ανισοτροπικές)
- ❖ Μη πορώδης δομής
- ❖ Σύνθετες λεπτού υμενίου

Οι μεμβράνες παρασκευάζονται συνήθως σε πάχος 0.01 έως 0.2mm μπορεί να έχουν στην επιφάνειά τους μακροπόρους με μέγεθος >50nm, μεσοπόρους 2-50nm, μικροπόρους ή πόρους μεγέθους μοριακής τάξεως <2nm. Αν οι πόροι στην επιφάνεια της μεμβράνης έχουν διάμετρο $d_p \leq 2\text{nm}$, τότε η μεμβράνη χαρακτηρίζεται συνήθως ως μη πορώδης. Στην περίπτωση αυτή η μεμβράνη παρουσιάζει μόνο μικροπόρους ή πόρους μοριακής τάξεως. Οι πορώδεις αντίθετα μεμβράνες παρουσιάζουν στην επιφάνειά τους μέσο- ή μακρο- πόρους. Ανάλογα τώρα με τη δομή της μεμβράνης, αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί συμμετρική (για ομοιόμορφη δομή σε όλο το πάχος της μεμβράνης) ή ασύμμετρη (όταν η μεμβράνη έχει δύο πλευρές με διαφορετικού μεγέθους πόρους). Ασύμμετρη χαρακτηρίζεται, επίσης, ορισμένες φορές, μια μη πορώδης μεμβράνη, τοποθετημένη σε ένα λεπτό, πορώδες υπόστρωμα (skinned membrane). Συχνά οι ασύμμετρες μεμβράνες χαρακτηρίζονται και ως ανισότροπες, ενώ ως ισότροπες μεμβράνες χαρακτηρίζονται αυτές που παρουσιάζουν μια ομογενή δομή. Τέλος, όσον αφορά τη σύσταση των μεμβρανών, αυτές κατατάσσονται σε ομογενείς και ετερογενείς. Οι ομογενείς μεμβράνες παρασκευάζονται από ένα πολυμερές ή αποτελούνται από μίγμα συμβατών μεταξύ τους πολυμερών, υπό μορφή ενός ομογενούς διαλύματος. Οι ετερογενείς μεμβράνες αποτελούνται από μίγμα μη αναμιξιμων πολυμερών (τουλάχιστον δύο φάσεις παρούσες). Ετερογενείς είναι επίσης οι μεμβράνες πολλών στρωμάτων (non integrally skinned ή composite membranes), καθώς και οι ενισχυμένες μεμβράνες[51].

Μεμβράνες μικροπόρων

Μια μικροπορώδης μεμβράνη είναι παρόμοια στη δομή και στη λειτουργία της με ένα συμβατικό φίλτρο. Διαθέτει άκαμπτη, ιδιαίτερα χαοτική δομή με τυχαία κατανομή διασυνδεδεμένων πόρων. Ωστόσο, οι πόροι αυτοί διαφέρουν από εκείνους σε ένα συμβατικό φίλτρο, καθώς είναι εξαιρετικά μικροί, της τάξης των 0,01 - 10 μm σε διάμετρο. Όλα τα σωματίδια, με διάμετρο μεγαλύτερη από το μεγαλύτερο πόρο, απορρίπτονται εντελώς από τη μεμβράνη. Σωματίδια με ενδιάμεση διάμετρο μικρότερη από το μεγαλύτερο πόρο απορρίπτονται εν μέρει, σύμφωνα με την κατανομή μεγέθους πόρων της μεμβράνης. Σωματίδια με διάμετρο πολύ μικρότερη σε σχέση με τους μικρότερους πόρους διέρχονται της μεμβράνης. Έτσι, ο διαχωρισμός των διαλυμένων ουσιών από μικροπορώδεις μεμβράνες είναι, κυρίως, συνάρτηση του μοριακού βάρους και της κατανομής μεγέθους των πόρων. Σε γενικές γραμμές, μόνο τα μόρια που διαφέρουν σημαντικά σε μέγεθος μπορούν να διαχωριστούν αποτελεσματικά από μικροπορώδεις μεμβράνες, όπως για παράδειγμα στην υπερδιήθηση και στη μικροδιήθηση[54].

Μη πορώδεις μεμβράνες

Οι μη πορώδεις μεμβράνες αποτελούνται από ένα πυκνό φιλμ μέσω του οποίου μεταφέρονται συστατικά με διάχυση με την κινητήρια δύναμη της διαφοράς πίεσης, της συγκέντρωσης ή του ηλεκτρικού δυναμικού. Ο διαχωρισμός των διαφόρων συστατικών του διαλύματος συνδέεται άμεσα με το σχετικό ρυθμό μεταφοράς τους στο εσωτερικό της μεμβράνης, ο οποίος καθορίζεται από τη διάχυση και τη διαλυτότητα στο υλικό της μεμβράνης. Μια σημαντική ιδιότητα των μη πορώδων μεμβρανών είναι ότι ακόμη και συστατικά παρόμοιου μεγέθους μπορούν να διαχωριστούν, όταν η συγκέντρωσή τους στη μεμβράνη, δηλαδή η διαλυτότητά τους, διαφέρει σημαντικά. Για τους περισσότερους διαχωρισμούς αερίων, τη μεταφορά υγρού με εξάτμιση και την αντίστροφη ώσμωση χρησιμοποιούνται μη πορώδεις μεμβράνες για την εκτέλεση του διαχωρισμού. Ωστόσο, αυτές οι μεμβράνες έχουν συνήθως ασύμμετρη δομή για τη βελτίωση της ροής[54].

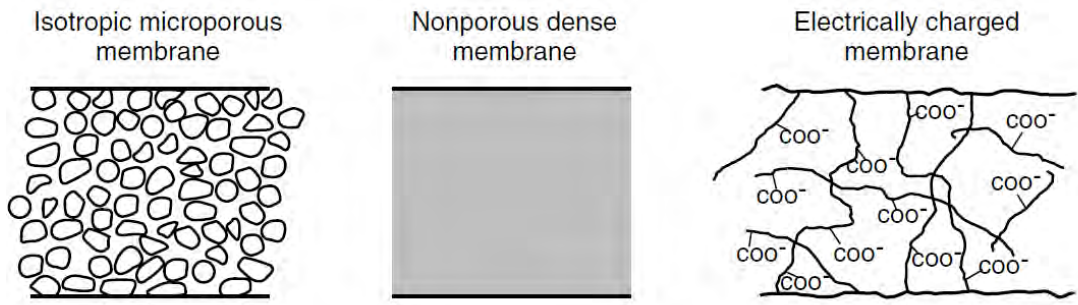
Ηλεκτρικά φορτισμένες μεμβράνες

Οι ηλεκτρικά φορτισμένες μεμβράνες μπορεί να είναι μικροπορώδεις ή μη πορώδεις. Πιο συχνά είναι μικροπορώδεις, με τα τοιχώματα των πόρων να φέρουν θετικά ή αρνητικά φορτισμένα ιόντα. Μια μεμβράνη με θετικά φορτισμένα ιόντα αναφέρεται ως μεμβράνη ανταλλαγής ανιόντων, επειδή δεσμεύει τα ανιόντα στο περιβάλλον ρευστό. Ομοίως, μια μεμβράνη που περιέχει αρνητικά φορτισμένα ιόντα ονομάζεται μεμβράνη ανταλλαγής κατιόντων. Ο διαχωρισμός επιτυγχάνεται κυρίως με τον αποκλεισμό των ιόντων του ίδιου φορτίου με τα ιόντα των τοιχωμάτων της μεμβράνης και σε πολύ μικρότερο βαθμό από το μέγεθος των πόρων. Ο διαχωρισμός επηρεάζεται από το φορτίο και από τη συγκέντρωση των ιόντων στο διάλυμα. Για παράδειγμα, τα μονοθενή ιόντα αποκλείονται λιγότερο αποτελεσματικά από ότι τα διθενή και σε διαλύματα υψηλής ιοντικής ισχύος μειώνεται η εκλεκτικότητα. Οι ηλεκτρικά φορτισμένες μεμβράνες χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία ηλεκτρολυτικών διαλυμάτων κατά την ηλεκτροδιάλυση[54].

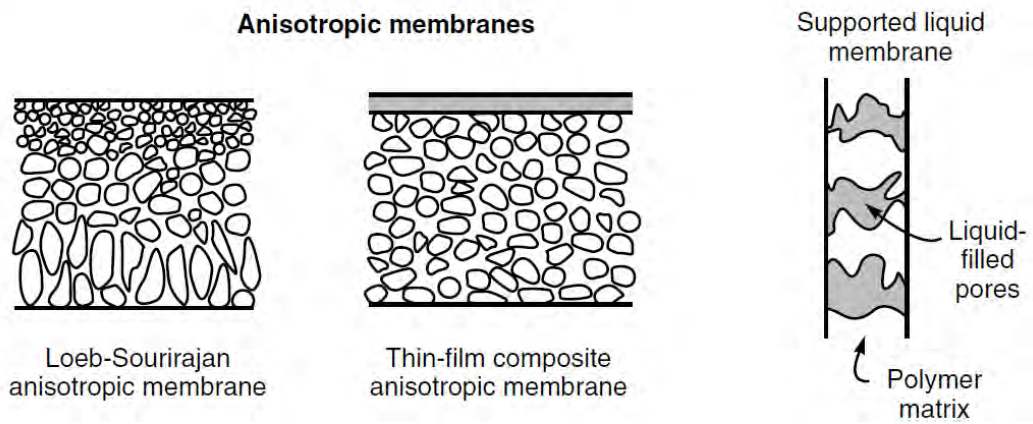
Ασύμμετρες μεμβράνες

Ο ρυθμός της μεταφοράς των συστατικών μέσω της μεμβράνης είναι αντιστρόφως ανάλογος με το πάχος της. Ο υψηλός ρυθμός μεταφοράς είναι επιθυμητός στις διαδικασίες διαχωρισμού με μεμβράνες για οικονομικούς λόγους. Επομένως, η μεμβράνη πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο λεπτή. Η συμβατική τεχνολογία κατασκευής περιορίζει το πάχος περίπου στα 20 μm, για ικανοποιητική μηχανική αντοχή και μη ελαττωματική μεμβράνη. Η ανάπτυξη νέων τεχνικών κατασκευής μεμβράνης, για την παράγωγή ασύμμετρων δομών, ήταν ένα από τα μεγαλύτερα επιτεύγματα της τεχνολογίας μεμβρανών κατά τη διάρκεια των τελευταίων 30 ετών. Οι ασύμμετρες μεμβράνες αποτελούνται από ένα εξαιρετικά λεπτό στρώμα στην επιφάνεια, που στηρίζεται σ' ένα πολύ πιο παχύ πορώδες πυκνό υπόστρωμα. Το επιφανειακό στρώμα και το υπόστρωμα μπορούν να κατασκευαστούν στο ίδιο στάδιο ή ξεχωριστά. Οι ιδιότητες διαχωρισμού και ο ρυθμός διαπερατότητας της μεμβράνης καθορίζονται αποκλειστικά από το επιφανειακό στρώμα. Το υπόστρωμα λειτουργεί ως μηχανική υποστήριξη. Τα πλεονεκτήματα των υψηλότερων ροών που παρέχονται από ασύμμετρες μεμβράνες είναι τόσο μεγάλα, ώστε όλες σχεδόν οι εμπορικές διεργασίες χρησιμοποιούν τέτοιες μεμβράνες[54].

Symmetrical membranes



Anisotropic membranes



Σχήμα 4.8: Κύρια είδη μεμβρανών. Πάνω: Συμμετρικές μεμβράνες και Κάτω: Ασύμμετρες μεμβράνες[54]

4.4.5 Παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία των μεμβρανών

Οι παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία των μεμβρανών είναι η πίεση λειτουργίας, η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας, η ανάκτηση αφαλατωμένου νερού και η συγκέντρωση αλάτων στο νερό τροφοδοσίας. Παρακάτω μελετάται κάθε μία παράμετρος ξεχωριστά και το πώς επηρεάζει τη λειτουργία των μεμβρανών.

A) Πίεση λειτουργίας

Η πίεση στην είσοδο της μεμβράνης επηρεάζει τη ροή του αφαλατωμένου νερού. Με τον όρο πίεση εννοούμε τη δρώσα δύναμη που ασκείται στη μεμβράνη, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της ασκούμενης πίεσης και της ωσμωτικής πίεσης. Συγκεκριμένα, η μεταφορά του νερού είναι ανάλογη με τη διαφορά πίεσης, δηλαδή με το χημικό δυναμικό του νερού τροφοδοσίας και του αφαλατωμένου νερού. Η επίδραση, λοιπόν, της εφαρμοζόμενης πίεσης είναι γραμμικά ανάλογη της ροής του νερού.

B) Επίδραση της θερμοκρασίας

Η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας οδηγεί σε μείωση της πυκνότητας του νερού και σε μείωση της ωσμωτικής πίεσης. Συνεπώς, η συνολική ροή του αφαλατωμένου νερού αυξάνεται. Η επίδραση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη αλάτων φαίνεται και στο παρακάτω (Σχήμα 4.9):



Σχήμα 4.9: Η επίδραση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη αλάτων

Γ) Επίδραση της συγκέντρωσης των αλάτων στο νερό τροφοδοσίας

Η αύξηση της συγκέντρωσης των αλάτων στο νερό τροφοδοσίας αυξάνει την ωσμωτική πίεση του νερού τροφοδοσίας. Αυτή η αύξηση της ωσμωτικής πίεσης έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της τελικής ασκούμενης πίεσης στη μεμβράνη. Όταν όμως σταθεροποιείται η πίεση εισόδου, η αύξηση της συγκέντρωσης αλάτων μειώνει τη ροή του αφαλατωμένου νερού και την απόρριψη των αλάτων.

Δ) Επίδραση του pH

Οι μεμβράνες αντιστροφής ώσμωσης έχουν μεγάλο εύρος λειτουργίας όσον αφορά το pH. Συγκεκριμένα, οι μεμβράνες οξικής κυτταρίνης έχουν εύρος λειτουργίας pH 4-8, ενώ μπορούν να αντέξουν και για εύρος 3-9. Οι μεμβράνες λεπτού υμένα έχουν εύρος λειτουργίας 2-11, ενώ μπορούν να αντέξουν και για εύρος 1-12. Το pH δεν επηρεάζει τη ροή του αφαλατωμένου νερού, όμως για τιμές pH έξω από τα όρια λειτουργίας ή αντοχής της μεμβράνης μπορεί να έχουμε καταστροφή του πολυμερικού υλικού της.

Ε) Επίδραση του βαθμού ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού

Η αύξηση της ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού σε συνθήκες σταθερής πίεσης αυξάνει την ωσμωτική πίεση του νερού τροφοδοσίας. Αυτή η αύξηση έχει σαν αποτέλεσμα την πιθανότητα δημιουργίας ανθρακικών επικαθίσεων, γεγονός το οποίο εμποδίζει τη διέλευση αφαλατωμένου νερού και μειώνει την απορριπτική ικανότητα της μεμβράνης, αυξάνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας από την μεμβράνη.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Jane Kycera, Desalination water from water, 2014. Scrivener Publishing, Wiley, file:///C:/Users/Giwrgos/Downloads/JaneKuceraDesalination_WaterfromWater-Wiley-Scrivener2014.pdf,
- [2] Παλιεράκης, Γ, «Αφαλάτωση με χρήση ηλιακών συλλεκτών» Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα 2007
- [3] Jadwiga R. Ziolkowska, Desalination leaders in the global market – current trends and future perspectives, water science & technology: water Supply | 16.3 | 2016
- [4] World Health Organization, (1984). Guide lines for Drinking-Water Quality, 1st Edition. Geneva, Switzerland: World Health Organization
- [5] Ημερήσια Εφημερίδα Κυκλάδων , κοινή γνώμη.gr , <http://www.koinignomi.gr/news/politiki/politiki-notio-aigaio/2016/05/05/pentaplasia-timi-gia-toys-nisiotes-kostos-neroy.html>, Μάιος 2017
- [6] Στεφάνου Κ. Σπανομήτσιου, Βελτιστοποίηση Μονάδας Παραγωγής πόσιμου ύδατος με αφαλάτωση θαλασσινού νερού και χρήση αιολικής και ηλιακής ενέργειας Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2004
- [7] E. Mathioulakis, V. Belessiotis, E. Delyannis, Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art, Desalination 203 (2007) 346–365
- [8] Shatat, Mahmoud I. M. (2008) New and renewable energy and environmental engineering, Durham theses, Durham University. Available at Durham E-Theses Online: <http://etheses.dur.ac.uk/2234/>
- [9] K. Zotalis¹, E. G. Dialynas², N. Mamassis¹, and A. N. Angelakis³ Desalination Technologies: Hellenic Experience, Water 2014, 6(5), 1134-1150
- [10] Lan-xiang HOU, Zhen YAN, Application of fluid pressure energy recovery technology in the seawater desalination system 2016, School of Mechanical and Electrical Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, China
- [11] History of Desalination Cost Estimations Pinhas Glueckstern, Mekorot Water Co. Tel-Aviv, Israel
- [12] L.O. Villacorte, S.A.A. Tabatabaia, N. Dhakala, G. Amyc, J.C. Schippersa, M.D. Kennedy. Algal blooms: an emerging threat to seawater reverse osmosis desalination, Desalination and Water Treatment (2014) 1–11
- [13] Kim Choon Ng, Kyaw Thu, Youngdeuk Kim, Anutosh Chakraborty, Gary Amy, Adsorption desalination: An emerging low-cost thermal desalination method, Desalination 308 (2013) 161–179
- [14] Washington D.C. Project Center, Authors: Alex Joseph Beaudoin , Shaun Joseph Bonefas, Ian Robert Jacoway, Allison Lynn Marx Analysis of Domestic and International Desalination to Outline the Decision Making Landscape for Implementation and Operation of Desalination Plants in the United States December 16, 2015, 45-46

- [15] Ali Al-Karaghoul, Lawrence L. Kazmerski, Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24 (2013) 343–356
- [16] Nicos X. Tsiourtis, Desalination and the environment. Water Development Department, Ministry of Agriculture, Natural Resources and Environment, Nicosia, Cyprus, *Desalination and the environment, Desalination* 141 (2001) 223-236
- [17] Tamim Younos, The Economics of Desalination, Virginia Polytechnic Institute and State University, universities council of water resources, *Journal of contemporary water research & education* issue 132, pages 39-45, December 2005
- [18] Jadwiga R. Ziolkowska, Is Desalination Affordable?—Regional Cost and Price Analysis, DOI 10.1007/s11269-014-0901-y, December 2014
- [19] Bennett A (2011) Cost effective desalination: innovation continues to lower desalination costs. *Filter Separate* 48(4):24–27
- [20] Bennett A (2012) Cost effective desalination: innovation continues to lower desalination costs. <http://www.filtsep.com/view/23919/cost-effective-desalination-innovation-continues-to-lower-desalination-costs/> (04/29/2014
- [21] GWI (Global Water Intelligence) (2013) Market profile and desalination markets, 2009–2012 yearbooks and GWI website. <http://www.desaldata.com/> (05/23/2014)
- [22] Noredine Ghaffour, Thomas M. Missimer, Gary L. Amy GL, Technical review and evaluation of the economics of water, desalination: current and future challenges for better water supply sustainability. *Desalination* 309 (2013) 197–207
- [23] Νυδρέος Σακουέλος Παναγιώτης, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Μονάδες αφαλάτωσης στην Ελλάδα :Αποτύπωμα Άνθρακα, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας πολιτεχνική σχολή, τμήμα μηχανικών χωροταξίας πολεοδομίας και περιφερειακής ανάπτυξης, βόλος 2010
- [24] Mohamed A. eltawil, Zhao Zhengming, and Liqiang Yuan, Twelfth, Renewable energy powered desalination systems: Technologies and economics-state of the art, International Water Technology Conference, IWTC12 2008 Alexandria, Egypt
- [25] Karagiannis, I.C, Soldatos, P.G, Water desalination cost literature: review and assessment. *Desalination* 223 (1–3), 448–456, 2007
- [26] Reddy, K.V, Ghaffour, N, Overview of the cost of desalinated water and costing methodologies. *Desalination* 205, 340–353, 2007
- [27] Vince, F, Marechal, F, Aoustin, E, Breant, P, Multiobjective optimization of RO desalination plants. *Desalination* 222 (1–3), 96–118, 2008.
- [28] Yun, T.I, Gabelich, C, Cox, M.R, Mofidi, A.A, Lesan, R, Reducing costs for large-scale desalting plants using large diameter, reverse osmosis membranes. *Desalination* 189, 141–154, 2006
- [29] Lauren F. Greenlee, Desmond F. Lawler, Benny D. Freeman, Benoit Marrot, Philippe Moulin, Reverse osmosis desalination: Water

sources, technology, and today's challenges. *water research* 43 (2009) 2317–2348.

[30] Wilf, M, Bartels, C, 2006. Integrated membrane desalination systems - current status and projected development. *Hydranautics* Available from: <http://www.membranes.com/> (accessed 1/3/2018.).

[31] Service, R.F, 2006. Desalination freshens up. *Science* 313, 1088–1090.

[32] Blank, J.E, Tusel, G.F, Nisan, S, 2007. The real cost of desalted water and how to reduce it further. *Desalination* 205, 298–311.

[33] Mathioulakis, E, Belessiotis, V, Delyannis, E, 2007. Desalination by using alternative energy: review and state-of-the-art. *Desalination* 203, 346–365.

[34] Miller, J.E., 2003. Review of Water Resources and Desalination Technologies, Available from: Sandia National Laboratories <http://www.prod.sandia.gov/cgi-bin/techlib/access-control.pl/2003/030800.pdf> (accessed 1/3/2018).

[35] Andrea Cipollina, Giorgio Micale, Lucio Rizzuti, *Seawater Desalination, Conventional and Renewable Energy Processes*, 2009, publishing by Springer

[36] Πασίσης Ιωάννης, *Ενεργειακά συστήματα και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας* Γεωπονικό πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα αξιοποίησης φυσικών πόρων και γεωργικής μηχανικής, πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών, Αθήνα, 2011

[37] International Desalination Association and Global Water Intelligence Release New Data in 30th Worldwide Desalting Inventory, TOPSFIELD, MA, USA and OXFORD, UK, October 9, 2017

[38] Ε.Μαλιδέρου, Σ.Ροζάκης, Γ.Παπαδάκης, *Οικονομική ανάλυση και σύγκριση δύο συστημάτων ηλιακής αφαλάτωσης, μικρής δυναμικότητας* Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

[39] J. Jaime Sadhwania, Jose M. Vezaa, Carmelo Santanab, Case studies on environmental impact of seawater desalination, *Desalination* 185 (2005) 1–8

[40] Mahmoud Shatat and Saffa B. Riffat, Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources, Institute of Sustainable Energy Technology, University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, UK, *International Journal of Low-Carbon Technologies* 2014, 9, 1–19, 2012

[41] Γιαννακουδάκης Δ. Α. «Φυσική Χημεία Καταστάσεων της Ύλης και Θερμοδυναμική», Θεσσαλονίκη, 1986.

[42] Γεωργάτος Ι. Ε. «Βιοχημεία, Τόμος Α', Δομή μακρομορίων-Ένζυμα-Βιολογικές Οξειδώσεις», Θεσσαλονίκη, 1985.

[43] Σιουτόπουλος Δημήτριος, «Συγκριτική μελέτη της ρύπανσης μεμβρανών, αντίστροφης ώσμωσης και υπερδιήθησης από οργανικές ενώσεις», Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Χημικών μηχανικών, 2010.

[44] Koutsou C.P, Yiantsios S.G, Karabelas A.J, A numerical and experimental study of mass transfer in spacer-filled channels: Effects of spacer geometrical characteristics and Schmidt number, *Journal of Membrane Science*, 326 234-251, (2009)

- [45] Wang F, Tarabara V, Coupled effects of colloidal deposition and salt concentration polarization on reverse osmosis membrane performance, *Journal of Membrane Science*, 293 111-123, (2007)
- [46] James E. Miller Materials Chemistry Department Sandia National Laboratories, Review of Water Resources and Desalination Technologies, March 2003
- [47] Li, Fane A, Winston W, Matsuura T, *Advanced membrane technology and applications*, p. 137, Wiley, 2008
- [48] Richard W. Baker, *Membrane technology and applications*, 2nd edition, p.144, Wiley, 2004, John Wiley and sons ,Ltd
- [49] The Perth Seawater Desalination Plant- Water Corporation Australia
Διαδίκτυο: <https://www.water-technology.net/projects/perth/>
- [50] N. Melián-Martel, J.J. Sadhwani, S. Malamis, M. Ochsenkühn-Petropoulou, Structural and chemical characterization of long-term reverse osmosis membrane fouling in a full scale desalination plant, *Desalination* 305 (2012) 44–53
- [51] Μαρκόπουλος Ν.Ι, 2002: Διεργασίες διαχωρισμού με μεμβράνες (Αναθεωρημένη έκδοση). Εκδόσεις University Studio Press. Θεσσαλονίκη
- [52] Κουφαχείλης Α, Αναερόβια χώνευση υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου σε ένα περιοδικό αναερόβιο αντιδραστήρα με ανακλαστήρες (PABR) και κλασματοποίηση των εκροών. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Διατμηματικό μεταπτυχιακό Πρόγραμμα στις Περιβαλλοντικές Επιστήμες, Πάτρα, 2009
http://library.tee.gr/digital/kdth/kdth_m3070/kdth_m3070_fitili.pdf
- [53] Noredine Ghaffour, Thomas M. Missimer, Gary L. Amy, Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability, *Desalination* 309 (2013) 197–207
- [54] Richard W. Baker, overview of membrane science and technology, *Membrane Technology and Applications*, Second Edition, 2004 John Wiley & Sons, Ltd.
- [55] Osman A. Hamed, Overview Of Hybrid Desalination Systems - Current Status And Future Prospects, *Desalination* 186 (2005) 207–214
- [56] Asam Almulla, Ahmad Hamad, Mohamed Gadalla, Integrating hybrid systems with existing thermal desalination plants, *Desalination* 174 (2005) 171-192
- Ηλεκτρονικές διευθύνσεις**
- [57] WET A.E water technology,
<http://www.watertechnologies.gr/tekhнологies-nerou/>
- [58] <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm>