



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ  
ΣΠΟΥΔΩΝ**

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &**

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ**

**ΥΔΑΤΙΚΩΝ**

**ΠΟΡΩΝ»**

**ΤΙΤΛΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Η εφαρμογή της  
αφαλάτωσης για την  
παραγωγή πόσιμου  
νερού: Τεχνολογίες  
και περιβαλλοντικές  
επιπτώσεις

***ΦΟΙΤΗΤΗΣ***

**ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΣΤΟΥΠΑΣ**

**Αθήνα, Οκτώβριος 2021**

**Επιβλέπουσα:**

**Γαβαλάκη Ευγενία**

## Περίληψη

Με τον όρο «αφαλάτωση» αναφέρεται κάθε διαδικασία για την αφαίρεση των αλάτων από ένα αλατούχο διάλυμα, συνηθέστερα από θαλασσινό, υφάλμυρο ή οποιασδήποτε άλλης φύσης αλατούχο νερό. Στο πλαίσιο αυτό, η αφαλάτωση είναι μία διαδικασία η οποία στοχεύει στην παραγωγή καθαρού και πόσιμου νερού μέσα από την επεξεργασία θαλασσινού, υφάλμυρου ή άλλου νερού το οποίο συναντάται στη φύση και το οποίο δεν είναι πόσιμο.

Η παγκόσμια δυναμικότητα παραγωγής πόσιμου νερού μέσα από διαδικασίες αφαλάτωσης έχει πλέον ξεπεράσει τα 100 εκατομμύρια κυβικά μέτρα ανά ημέρα, ακολουθώντας εκθετική αύξηση τις τελευταίες δεκαετίες και την ολοένα αυξανόμενη δυσκολία κάλυψης της παγκόσμιας ζήτησης νερού.

Οι διαθέσιμες τεχνολογίες αφαλάτωσης έχουν ένα πολύ μεγάλο εύρος, με αποτέλεσμα, σε συνδυασμό με το ευρύ φάσμα μεθόδων προεπεξεργασίας και μετεπεξεργασίας του προς αφαλάτωση νερού, να καθίσταται πλέον εφικτή η παραγωγή πόσιμου και καθαρού νερού μέσω αφαλάτωσης σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις όπου αυτό απαιτείται. Σαφώς, τα χαρακτηριστικά του νερού το οποίο υπόκειται σε αφαλάτωση μπορούν να επηρεάζουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα και τον βαθμό απόδοσης των μονάδων αφαλάτωσης και για τον λόγο αυτόν απαιτείται η προσεκτική αξιολόγηση των χαρακτηριστικών του νερού για την επιλογή της πλέον κατάλληλης μεθόδου αφαλάτωσης.

Οι δύο μεγάλες κατηγορίες τεχνολογιών αφαλάτωσης οι οποίες αναλύονται στα πλαίσια της παρούσης είναι οι θερμικές μέθοδοι, όπου για την αφαλάτωση το νερό αλλάζει φάση, και οι μέθοδοι οι οποίες βασίζονται σε μεμβράνες, όπου το νερό παραμένει καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας στην υγρή του φάση.

Βασικοί παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν τη διείσδυση των τεχνολογιών αφαλάτωσης σχετίζονται τόσο με τα ισχύοντα θεσμικά πλαίσια όσο και με το κόστος παραγωγής καθαρού νερού από αφαλάτωση. Καθώς εξελίσσεται η τεχνολογία μεμβρανών και γενικότερα η τεχνολογία και καθώς αυξάνεται η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τόσο αυξάνεται η διείσδυση της αφαλάτωσης.

Σημειώνεται ότι για την πλειονότητα των τεχνολογιών και μεθόδων αφαλάτωσης απαιτείται η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ή θερμικής ενέργειας.

Ενδιαφέρον εντοπίζεται για τον συνδυασμό μονάδων αφαλάτωσης με μονάδες παραγωγής ενέργειας, όπου χρησιμοποιούνται ορυκτά καύσιμα, για την εκμετάλλευση του παραγόμενου ατμού και τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης όσο και με μονάδες παραγωγής ενέργειας βασισμένες σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών των μονάδων αφαλάτωσης από πράσινη ενέργεια.

## Abstract

The term 'desalination' refers to any procedure for removing salts from a saline solution, most commonly from sea salt, brackish or any other saline water. In this context, desalination is a process that aims to produce clean and potable water through the treatment of sea, brackish or other water that is found in nature and which is not naturally potable.

The global capacity of drinking water production through desalination processes has recently exceeded 100 million cubic meters per day, following an exponential increase in recent decades and reflecting the growing difficulty of meeting global water demand.

The available desalination technologies have a very wide range, so that, in combination with the wide range of methods of pre-treatment and post-treatment of water for desalination, it is now possible to produce potable and clean water through desalination in almost any cases where this is required. Clearly, the characteristics of the water subject to desalination can have a significant impact on the effectiveness and on the efficiency of desalination units and therefore the careful assessment of water characteristics is required to select the most appropriate desalination method.

The two major categories of desalination technologies analyzed in this dissertation are thermal methods, where the water changes phase during desalination, and methods based on membranes, where the water remains throughout the desalination process in its liquid phase.

Key factors that determine the penetration of desalination technologies relate both to the current institutional frameworks and to the cost of producing clean water from desalination. As membrane technology and technology in general evolve and as the penetration of renewable energy sources increases, so does the penetration of desalination. It is noted that the majority of desalination technologies and methods require the consumption of electricity or thermal energy.

Particular interest is identified in combining desalination plants with power plants, where fossil fuels are used, for exploiting the steam produced and improving efficiency, as well as with renewable energy-based power plants to meet the needs of green energy desalination plants.

## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	2
Abstract.....	4
Περιεχόμενα .....	6
Κατάλογος εικόνων.....	10
Κατάλογος πινάκων .....	14
Συνομογραφίες .....	15
Εισαγωγή.....	16
1 Διαχείριση υδάτινων πόρων.....	22
1.1 Η τεκμηρίωση της αξίας του πόσιμου νερού .....	22
1.2 Νερό και ανάπτυξη .....	25
1.3 Βιώσιμη διαχείριση υδάτινων πόρων.....	27
1.4 Θεσμικό πλαίσιο .....	30
1.5 Η υφιστάμενη κατάσταση στην Ελλάδα .....	32
2 Αφαλάτωση.....	38
2.1 Εισαγωγή.....	38
2.2 Διαδικασία αφαλάτωσης .....	39
2.3 Θερμικές μέθοδοι .....	44
2.3.1 Πολυβάθμια εκτόνωση.....	44
2.3.2 Πολυβάθμια εξάτμιση .....	46
2.3.3 Εξάτμιση μέσω συμπίεσης ατμών .....	48
2.3.4 Αφαλάτωση με χρήση απορριπτέας θερμότητας .....	50
2.3.5 Ηλιακή απόσταξη.....	52

2.4 Μέθοδοι βασισμένες σε μεμβράνες.....	53
2.4.1 Ηλεκτρόλυση και αντίστροφη ηλεκτρόλυση.....	54
2.4.2 Ώσμωση και αντίστροφη ώσμωση.....	56
2.4.3 Απόσταξη μέσω μεμβρανών.....	59
2.5 Σύγκριση μεθόδων αφαλάτωσης.....	60
3 Αντίστροφη ώσμωση – θεωρητικό υπόβαθρο και ορισμοί.....	66
3.1 Ώσμωση και αντίστροφη ώσμωση.....	66
3.2 Ανάκτηση νερού κατά τη διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης.....	68
3.3 Απόρριψη αλατιού και πέρασμα αλατιού.....	69
3.4 Διήθημα ή ροή αλατιού (salt flux).....	71
3.5 Πόλωση συγκέντρωσης.....	71
4 Συστήματα μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης.....	73
4.1 Συστήματα μεμβρανών πλάκας και πλαισίου (Plate and frame modules).....	73
4.2 Συστήματα μεμβρανών σπειροειδούς τυλίγματος (Spiral wound modules).....	75
4.3 Συστήματα μεμβρανών κοίλων ινών (Hollow fiber modules).....	77
4.4 Συστήματα μεμβρανών σωληνοειδούς διαμόρφωσης.....	78
4.5 Χαρακτηρισμός των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης.....	80
4.5.1 Μέγεθος πόρων.....	80
4.5.2 Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός.....	80
5 Προβλήματα της τεχνολογίας αντίστροφης ώσμωσης.....	82
5.1 Βιο-πλήρωση (bio-fouling).....	82
5.2 Οργανική πλήρωση (organic fouling).....	85
5.3 Ανόργανη πλήρωση - κλιμάκωση (inorganic fouling).....	85

5.4 Κολλοειδής πλήρωση (colloidal fouling) .....	87
6Τεχνολογίες προ επεξεργασίας του νερού τροφοδοσίας για τις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης .....	89
6.1 Συστήματα πρόσληψης νερού τροφοδοσίας .....	89
6.2 Απολύμανση.....	90
6.3 Κροκίδωση - καθίζηση .....	90
6.4 Κοκκώδης διήθηση.....	91
6.5 Μεμβράνες μικροδιήθησης MF και υπερδιήθησης UF.....	91
7Οικονομική ανάλυση αφαλάτωσης μέσω αντίστροφης ώσμωσης .....	92
7.1 Δείκτης συσχέτισης ποσότητας παραγόμενου νερού μέσω της διαδικασίας της αφαλάτωσης και κόστους παραγωγής (Energy – Water Nexus Assessment) .....	100
8 Υβριδικά συστήματα.....	103
8.1 Αιολική ενέργεια και ηλιακή.....	105
9. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις άλμης.....	107
9.1 Ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της άλμης.....	107
9.2Υφιστάμενοι τρόποι διάθεσης της άλμης.....	112
9.2.1 Επιφανειακή εναπόθεση της άλμης.....	113
9.2.2 Εναπόθεση της άλμης στο σύστημα αποχέτευσης .....	113
9.2.3 Έγχυση της άλμης σε βαθιά πηγάδια .....	114
9.2.4 Εναπόθεση της άλμης επί του εδάφους .....	115
10Εφαρμογές αντίστροφης ώσμωσης .....	116
10.1 Εισαγωγή.....	117
10.2 Περιπτώσεις εφαρμογής.....	117
10.2.1 Κύπρος .....	117
10.2.2 Ισπανία.....	120



10.2.3Ελλάδα .....	121
Συμπεράσματα.....	130
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	135

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Πλήθος μηνών κατά τους οποίους σημειώνεται λειψυδρία (Mekonnen & Hoekstra, 2016).....	23
Εικόνα 2: Ποσοστό συνδεδεμένων νοικοκυριών με τα δίκτυα ύδρευσης, αποχέτευσης και βιολογικού καθαρισμού στην Ευρώπη των 28 (EurEau, 2017 ) .....	33
Εικόνα 3: Συνολική ετήσια κατανάλωση νερού στην Ευρωπαϊκή Ένωση (των 28) (EurEau, 2017 ).....	34
Εικόνα 4: Νησιωτικά συμπλέγματα της Ελλάδας (Kartalidis, et al., 2016) .....	35
Εικόνα 5: Μονάδες αφαλάτωσης στην Ελλάδα (Kartalidis, et al., 2016) .....	36
Εικόνα 6: Εξέλιξη δυναμικότητας παραγωγής πόσιμου νερού από αφαλάτωση (Kartalidis, et al., 2016) .....	37
Εικόνα 7: Παγκόσμια εγκατεστημένη χωρητικότητα παραγωγής πόσιμου νερού από αφαλάτωση και ετήσια μεταβολή (Eke, et al., 2020) .....	40
Εικόνα 8: Κατανομή εγκατεστημένης χωρητικότητας παραγωγής πόσιμου νερού από αφαλάτωση (Eke, et al., 2020) .....	40
Εικόνα 9: Εκθετική αύξηση εγκατεστημένης χωρητικότητας παραγωγής πόσιμου νερού από αφαλάτωση στην Ευρώπη και την Αφρική (Eke, et al., 2020).....	41
Εικόνα 10: Κατανομή στρατηγικών και τεχνολογιών κατασκευής μονάδων αφαλάτωσης (Eke, et al., 2020) .....	41
Εικόνα 11: Εξέλιξη της κατανομής των πηγών υδάτινων πόρων οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πόσιμου νερού μέσα από διαδικασίες αφαλάτωσης (Eke, et al., 2020) .....	42
Εικόνα 12: Κατηγοριοποίηση μεθόδων και τεχνολογιών αφαλάτωσης (Youssef, et al., 2014) .....	43
Εικόνα 13: Σχηματικό διάγραμμα διεργασίας πολυβάθμιας εκτόνωσης (Kalogirou, 2014) .....	45

Εικόνα 14: Σχηματικό διάγραμμα διεργασίας πολυβάθμιας εξάτμισης (Khan, et al., 2021) .....	47
Εικόνα 15: Σχηματικό διάγραμμα διεργασίας εξάτμισης μέσω συμπίεσης ατμών (Khan, et al., 2021) .....	49
Εικόνα 16: Σχηματικό διάγραμμα διεργασίας αφαλάτωσης με χρήση απορριπτέας θερμότητας (Adak & Tewari, 2014) .....	51
Εικόνα 17: Σχηματικό διάγραμμα ηλιακής αφαλάτωσης (Piccininni, et al., 2007).....	53
Εικόνα 18: Σχηματικό διάγραμμα διαδικασίας ηλεκτρόλυσης (Campione, et al., 2018) .....	55
Εικόνα 19: Φαινόμενο ώσμωσης και αντίστροφης ώσμωσης (Ashraf, et al., 2013) ..	57
Εικόνα 20: Σχηματικό διάγραμμα αφαλάτωσης μέσω αντίστροφης ώσμωσης (Gambier & Badreddin, 2009 ) .....	58
Εικόνα 21: Σχηματικό διάγραμμα διαδικασίας απόσταξης μέσω μεμβράνης (Khoukhi, et al., 2015) .....	60
Εικόνα 22: Κόστος παραγόμενο νερού σε σχέση με τη δυναμικότητα (Μουτάφης, 2008) .....	62
Εικόνα 23: Αλατότητα νερού τροφοδοσίας και παραγόμενου νερού από διαφορετικές τεχνολογίες αφαλάτωσης (Youssef, et al., 2014) .....	63
Εικόνα 24: Καταναλισκόμενη ηλεκτρική και θερμική ενέργεια ανά κυβικό μέτρο παραγόμενου καθαρού νερού από διαφορετικές τεχνολογίες αφαλάτωσης (Youssef, et al., 2014) .....	64
Εικόνα 25: Κόστος παραγωγής καθαρού νερού από διαφορετικές τεχνολογίες αφαλάτωσης (Youssef, et al., 2014) .....	65
Εικόνα 26: Απεικόνιση ώσμωσης (a), ωσμωτικής ισορροπίας (b) και αντίστροφης ώσμωσης (c) (Qasim, et al., 2019).....	66
Εικόνα 27: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας πλάκας και πλαισίου (Spellman, 2015) .....	74

Εικόνα 28: Α) Τομή μεμβράνης σπειροειδούς τυλίγματος Β) Λεπτομερής τομή μεμβράνης σπειροειδούς τυλίγματος (Spellman, 2015) .....	76
Εικόνα 29: Τομή τυπικής μεμβράνης κοίλων ινών (Qasim, et al., 2019) .....	78
Εικόνα 30: Τομή μεμβράνης σωληνοειδούς διαμόρφωσης (Spellman, 2015) .....	79
Εικόνα 31: Εποπτικό διάγραμμα μονάδας αντίστροφης ώσμωσης με σύστημα ανάκτησης ενέργειας μέσω υδροστροβίλου .....	96
Εικόνα 32: Εποπτικό διάγραμμα μονάδας αντίστροφης ώσμωσης με σύστημα ανάκτησης ενέργειας εναλλάκτη πίεσης.....	97
Εικόνα 33: Διάγραμμα ροής – πίεσης (Atab, et al., 2016) .....	97
Εικόνα 33: Διάγραμμα επιφάνειας μεμβρανών – πίεσης (Atab, et al., 2016).....	98
Εικόνα 33: Διάγραμμα διαπερατότητας – πίεσης (Atab, et al., 2016).....	98
Εικόνα 33: Διάγραμμα κατανάλωσης ενέργειας και τεχνολογίας ανάκτησης ενέργειας (Atab, et al., 2016) .....	99
Εικόνα 34: Εγκαταστάσεις αφαλάτωσης του προγράμματος A.G.U.A. στην Ισπανία (Zarzo, et al., 2012) .....	121
Εικόνα 35: Μονάδα αντίστροφης ώσμωσης στην Μήλο (ITAGroup, 2021) .....	122
Εικόνα 36: Ανεμογεννήτριες μονάδας αντίστροφης ώσμωσης στην Μήλο (ITAGroup, 2021) .....	123
Εικόνα 37: Δεξαμενές αποθήκευσης παραγόμενου νερού μονάδας αντίστροφης ώσμωσης στην Μήλο (ITAGroup, 2021).....	124
Εικόνα 38: Νέα μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης στη Θήρα (TEMAK, 2009) .....	125
Εικόνα 39: Νέα μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης στην Οία δυναμικότητας 2.400m <sup>3</sup> /ημέρα (CycladesVoice, 2018).....	126
Εικόνα 40: Νέα μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης στην Οία δυναμικότητας 2.400m <sup>3</sup> /ημέρα (CycladesVoice, 2018).....	126

Εικόνα 41: Θέσεις εγκατάστασης και λειτουργίας μονάδων αφαλάτωσης στη Σύρο  
(Kartalidis, et al., 2016) .....127

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Σύγκριση μεθόδων αφαλάτωσης (Youssef, et al., 2014) .....	63
Πίνακας 2: Συνιστώσες κόστους αρχικής επένδυσης και λειτουργίας για μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης (Ebrahim & Abdel-Jawad, 1994), (Karagiannis & Soldatos, 2008) .....	94
Πίνακας 3: Οικονομική ανάλυση μονάδων αντίστροφης ώσμωσης με σύστημα ανάκτησης ενέργειας μέσω εναλλάκτη πίεσης (Atab, et al., 2016).....	100
Πίνακας 4: Περιεχόμενα επιβλαβή συστατικά της παραγόμενης άλμης από την αφαλάτωση (Panagoroulios et al., 2019).....	99
Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά μονάδων αφαλάτωσης στη Σαντορίνη (Zotalis, et al., 2014) .....	124

## Συντομογραφίες

MSF	MultipleStageFlashing	Πολυβάθμιαεκτόνωση
MED	MultipleEffectDistillation	Πολυβάθμιαεξάτμιση
VC	VaporCompression	Εξάτμισημέσωσυμπίεσηςατμών
LTE	LowTemperatureEvaporation	Εξάτμισησεχαμηλήθερμοκρασία
SD	Solardistillation	Ηλιακήαπόσταξη
RO	ReverseOsmosis	ΑντίστροφηΏσμωση
ED	Electrodialysis	Ηλεκτροδιάλυση
EDR	ReverseElectrodialysis	ΑντίστροφηΗλεκτροδιάλυση
FO	ForwardOsmosis	Ώσμωση
RO	ReverseOsmosis	ΑντίστροφηΏσμωση
PSIA	Poundspersquareinchabsolute	Απόλυτεςλίβρεςανάτετραγωνικήίντσα
SWRO	SeaWaterReverseOsmosis	ΑντίστροφηΏσμωσηθαλασσινούνερού
BWRO	BrackishWaterReverseOsmosis	ΑντίστροφηΏσμωσηυφάλμυρουνερού

## Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται διερεύνηση της εφαρμογής της διαδικασίας της αφαλάτωσης για την παραγωγή πόσιμου νερού, παρουσιάζονται οι διαθέσιμες τεχνολογίες και εξετάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται ανασκόπηση στο πεδίο της διαχείρισης των υδάτινων πόρων και η ανάλυση της σύνδεσης νερού-ανάπτυξης. Επίσης αναφέρεται στην βιώσιμη ανάπτυξη και στο θεσμικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης γύρω από το νερό με την Κοινοτική Οδηγία 2000/60/EC και την οδηγία πλαίσιο σχετικά με την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης 2020/2184/EC.

Το δεύτερο κεφάλαιο ξεκινά με μία σύντομη εισαγωγή όπου τεκμηριώνεται η αξία της αφαλάτωσης. Η μεγάλη αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, η αστικοποίηση, η εκβιομηχάνιση, η ολοένα και αυξανόμενη ξηρασία ελέω κλιματικής αλλαγής έχουν ως επακόλουθο την λειψυδρία και την υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτινων πόρων. Η αφαλάτωση δηλαδή η παραγωγή νερού είτε πόσιμου είτε για βιομηχανικές χρήσεις με βάση το θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό, αποτελεί μία βιώσιμη λύση για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος. Η αφαλάτωση εφαρμόζεται σε όλο τον κόσμο, η δυναμικότητα παραγωγής αυξάνεται με ραγδαίο ρυθμό φτάνοντας τα εκατό εκατομμύρια κυβικά πόσιμου νερού ανά ημέρα και υιοθετείται ως κύρια πηγή πόσιμου νερού στις χώρες της Μέσης Ανατολής λόγω λειψυδρίας, αύξησης του πληθυσμού, επάρκειας ορυκτών καυσίμων και οικονομικής ανάπτυξης.

Οι τεχνολογίες αφαλάτωσης διαχωρίζονται στις θερμικές μεθόδους, τις μεθόδους μεμβρανών, τις χημικές μεθόδους και την μέθοδο της προσρόφησης με τις δύο πρώτες να έχουν εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα και να αναλύονται εκτενέστερα. Οι θερμικές μέθοδοι γίνονται μέσω αλλαγής φάσης του θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού και περιλαμβάνουν τις τεχνολογίες της πολυβάθμιας εκτόνωσης, της πολυβάθμιας εξάτμισης, της εξάτμισης μέσω συμπίεσης ατμών και την ηλιακή απόσταξη.



Στην μέθοδο της πολυβάθμιας εκτόνωσης, αλμυρό νερό θερμαίνεται σε σημείο λίγο χαμηλότερο από το σημείο βρασμού στην πρώτη φάση επεξεργασίας. Ακολούθως θερμαίνεται σε θερμοκρασία περίπου 90°C έως 120°C ενώ σε κάθε φάση, η πίεση είναι χαμηλότερη από την πίεση κορεσμού προκειμένου να ατμοποιείται το ζεστό νερό. Ακολούθως, τα δοχεία, όπου συγκεντρώνονται οι υδρατμοί έρχονται σε επαφή με σωλήνες οι οποίοι μεταφέρουν κρύο θαλασσινό νερό και λαμβάνεται καθαρό νερό μέσα από την υγροποίηση των συμπυκνωμάτων νερού.

Στην μέθοδο της πολυβάθμιας εξάτμισης το νερό εξατμίζεται σε χαμηλή πίεση ένα μέρος των υδρατμών συλλέγεται και ένα άλλο χρησιμοποιείται για την εξάτμιση αλμυρού νερού σε επόμενο στάδιο.

Στην μέθοδο της εξάτμισης μέσω συμπίεσης υδρατμών το αλμυρό νερό ψεκάζεται επάνω σε σωλήνες στους οποίους κυκλοφορεί ατμός, σε κλειστό σύστημα υπό πίεση.

Στην μέθοδο αφαλάτωσης μέσω απορριπτέας θερμότητας, γίνεται χρήση της απορριπτέας θερμότητας από βιομηχανίες, θερμοηλεκτρικούς σταθμούς κ.α. και χρησιμοποιείται για την εξάτμιση του αλμυρού νερού.

Στην μέθοδο της ηλιακής απόσταξης αξιοποιείται η θερμότητα από την ηλιακή ακτινοβολία και η οποία χρησιμοποιείται για τη θέρμανση θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού το οποίο βρίσκεται σε μία γυάλινη δεξαμενή. Οι υδρατμοί που δημιουργούνται συγκεντρώνονται στην οροφή της δεξαμενής και συλλέγονται για την παραγωγή γλυκού νερού.

Οι μέθοδοι μεμβρανών περιλαμβάνουν τις διεργασίες ηλεκτροδιάλυσης και τις διεργασίες αντίστροφης όσμωσης. Κατά τις διεργασίες ηλεκτροδιάλυσης το νερό διαχωρίζεται ηλεκτροχημικά με χρήση διαπερατών ιονισμένων μεμβρανών. Οι χρησιμοποιούμενες μεμβράνες ενεργοποιούν την ανταλλαγή ιόντων μεταξύ των στοιχείων του νερού και έχουν την ικανότητα να μεταφέρουν επιλεκτικά ιόντα με θετικό ή αρνητικό φορτίο και να απορρίπτουν τα ιόντα του αντίθετου φορτίου. Οι διαδικασίες αυτές βρίσκουν ως επί το πλείστο

εφαρμογή για την αφαλάτωση υφάλμυρου νερού, καθώς η απαιτούμενη ενέργεια είναι ανάλογη της συγκέντρωσης αλάτων στο νερό.

Όσμωση είναι η φυσική διαδικασία κατά την οποία τα διαλυμένα μόρια του νερού κινούνται από ένα διάλυμα χαμηλής διαλυμένης συγκέντρωσης (χαμηλή οσμωτική πίεση) προς ένα διάλυμα υψηλής διαλυμένης συγκέντρωσης (υψηλή οσμωτική πίεση) σε μία ημιπερατή μεμβράνη. Η ημιπερατή μεμβράνη απορρίπτει τις διαλυτές ουσίες και επιτρέπει μόνο στα μόρια του νερού να περάσουν. Η διαδικασία της ώσμωσης συνεχίζεται έως ότου επιτευχθεί μία κατάσταση οσμωτικής ισορροπίας όπου τα χημικά δυναμικά σε όλη την μεμβράνη γίνονται ίσα. Η ροή των μορίων μπορεί να σταματήσει ή να αναστραφεί με την εφαρμογή εξωτερικής πίεσης στο διάλυμα υψηλότερης συγκέντρωσης. Στην περίπτωση που η εφαρμοζόμενη διαφορά πίεσης είναι μεγαλύτερη σε μέγεθος από τη διαφορά οσμωτικής πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης, τα μόρια του νερού εξαναγκάζονται να ρέουν προς την αντίθετη κατεύθυνση του φυσικού φαινομένου της ώσμωσης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αντίστροφη ώσμωση και είναι η πλέον διαδεδομένη διεργασία αφαλάτωσης, καθώς παρουσιάζει το χαμηλότερο ενεργειακό κόστος σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους ευρείας εφαρμογής.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο για την τεχνολογία της αντίστροφης όσμωσης με την επεξήγηση των εννοιών και την καταγραφή του τυπολογίου της οσμωτικής πίεσης, της ανάκτησης νερού, της απόρριψης και περάσματος αλάτων μέσω της μεμβράνης, το διήθημα αλάτων και την πόλωση συγκέντρωσης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται ανασκόπηση των διαθέσιμων διαμορφώσεων μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης οι οποίες είναι Πλάκα και πλαίσιο (Plate and frame modules), Σπειροειδούς τυλίγματος (Spiral wound modules), Κοίλων ινών (Hollow fiber modules), Σωληνοειδούς διαμόρφωσης (Tubular Modules). Ακολούθως γίνεται αναφορά στον τρόπο χαρακτηρισμού των μεμβρανών, που αφορά το μέγεθος των πόρων της μεμβράνης και τον φυσικοχημικό χαρακτηρισμό.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά το πρόβλημα της πλήρωσης των μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης. Η πλήρωση των μεμβρανών είναι ένα σύνθετο πρόβλημα και επιμερίζεται στην βιο-πλήρωση (bio-fouling) που είναι και ο σημαντικότερος παράγοντας και αφορά την ανάπτυξη βιομάζας στην επιφάνεια των μεμβρανών (βιοφίλμ), οργανική πλήρωση (organic fouling) από οργανικές ουσίες όπως φύκη, λύματα και χουμικές ουσίες, ανόργανη πλήρωση (inorganic fouling) όπως το θειικό ασβέστιο, ανθρακικό ασβέστιο, φωσφορικό ασβέστιο, θειικό βάριο, και διοξείδιο του πυριτίου και κολλοειδής πλήρωση (colloidal fouling) από κολλοειδή στερεά.

Στο έκτο κεφάλαιο αναλύονται οι τεχνολογίες προεπεξεργασίας του αλμυρού νερού, προκειμένου να εισέλθει σε κατάλληλη μορφή για την διεργασία της αντίστροφης όσμωσης και να προληφθεί στο μέγιστο βαθμό το φαινόμενο της πλήρωσης των μεμβρανών. Η πρόσληψη του νερού, παλαιότερα, γινόταν από την επιφάνεια του θαλασσινού νερού και αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αυξημένη συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών. Για την αποτροπή του φαινομένου η συνηθισμένη πρακτική σήμερα είναι η πρόσληψη από υπόστρωμα του υδροφορέα. Στην συνέχεια γίνεται κροκίδωση – καθίζηση, είτε μέσω της χρήσης κροκιδωτικών, είτε μέσω συστήματος επίπλευσης αέρα, προκειμένου η θολότητα νερού από τα 30 NTU της τροφοδοσίας να πέσει στα 2 NTU. Ακόμη, γίνεται διήθηση μέσω φίλτρων άμμου για την συγκράτηση στερεών, ενώ σε πολλές εγκαταστάσεις εφαρμόζονται μεμβράνες μικροδιήθησης και υπερδιήθησης για την μείωση της φόρτισης των μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης. Η απολύμανση του νερού είναι απαραίτητη πριν την είσοδο του νερού τροφοδοσίας στο σύστημα μεμβρανών, καθώς με αυτόν τον τρόπο αποτρέπεται η δημιουργία βιοφίλμ.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται οικονομική ανάλυση της αφαλάτωσης, μέσω αντίστροφης όσμωσης. Η κύρια συνιστώσα του κόστους είναι η κατανάλωση ενέργειας και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που αυτή συνεπάγεται. Η κατανάλωση ενέργειας αφορά κατά περίπου 71% στην διαδικασία διήθησης από μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης, 10,8% προ επεξεργασία, 5% παροχή επεξεργασμένου νερού, 5,3% για την άντληση νερού τροφοδοσίας και 7,6% για

λοιπές εγκαταστάσεις. Το κόστος διήθησης κυμαίνεται από 2,5 με 4kWh/m<sup>3</sup> και εξαρτάται από την δυναμικότητα της μονάδας, το σύστημα ανάκτησης ενέργειας, τον βαθμό προεπεξεργασίας, την αλατότητα του νερού τροφοδοσίας και την τεχνολογία των μεμβρανών. Ακολούθως γίνεται επισκόπηση σχετικά με την αφαλάτωση στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Η χρήση της αφαλάτωσης δεν αποτελεί μεγάλο μέρος της τροφοδοσίας πόσιμου νερού (μόλις 4,2% του συνόλου), ωστόσο στις Μεσογειακές χώρες αποτελεί βασική τεχνολογία για την παροχή δημόσιας ύδρευσης (82% του συνόλου εγκαταστάσεων). Η τεχνολογία που εφαρμόζεται κατά κύριο λόγο είναι αυτή της αντίστροφης όσμωσης (91% του συνόλου). Ακόμη προσδιορίζεται η σχέση ανάμεσα σε ενέργεια και υδατικούς πόρους μέσω του energywater nexus.

Στο όγδοο κεφάλαιο διερευνώνται τα υβριδικά συστήματα αφαλάτωσης. Τα υβριδικά συστήματα έχουν ως πρωτεύοντα στόχο την μείωση της απαιτούμενης ενέργειας για αφαλάτωση και κατά συνέπεια την μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν συχνά την εμπρόσθια όσμωση ως στάδιο προγενέστερο της αντίστροφης όσμωσης για την μείωση του φορτίου προς τις μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης. Ακόμη χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή και η αιολική για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της εγκατάστασης.

Στο ένατο κεφάλαιο διερευνώνται οι περιβαλλοντικές συνέπειες της άλμης που παράγεται από τις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης καθώς και οι τρόποι διάθεσής της. Συγκεκριμένα οι περιβαλλοντικές συνέπειες της άλμης αφορούν την επιβάρυνσή της με βαρέα μέταλλα, τα οποία μάλιστα με υψηλότερη θερμοκρασία γίνονται περισσότερο τοξικά καθώς και την αύξηση της αλατότητας του νερού σε μακροχρόνια κλίμακα με δυσμενείς συνέπειες για το οικοσύστημα. Εξετάζονται οι τρόποι διάθεσης της άλμης η οποίες είναι η επιφανειακή εναπόθεσή της, η εναπόθεση στο σύστημα αποχέτευσης, η έγχυση σε βαθιά πηγάδια καθώς και η εναπόθεση επί του εδάφους.

Στο δέκατο κεφάλαιο εξετάζεται το πεδίο εφαρμογής της αντίστροφης όσμωσης στις μεσογειακές χώρες με παραδείγματα σε Κύπρο, Ισπανία και Ελλάδα. Στην Κύπρο παρουσιάζονται οι μονάδες Δεκελείας, Λεμεσού, ΑΗΚ Βασιλικού ,

Λάρνακας, Πάφου. Στην Ισπανία διάφορες εγκαταστάσεις με την εφαρμογή του προγράμματος AGUA. Τέλος στην χώρα μας με την πρότυπη μονάδα της Μήλου, μονάδες στην Σαντορίνη, στην Σύρο, στον Αλμυρό Ποταμό Κρήτης και στην Μύκονο.

Η εργασία καταλήγει στα συμπεράσματα σχετικά με τις διεργασίες αφαλάτωσης, την κυριαρχία της μεθόδου της αντίστροφης όσμωσης ως μεθόδου, τα οικονομοτεχνικά στοιχεία, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τις περιπτώσεις εφαρμογής.

## 1 Διαχείριση υδάτινων πόρων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα ευρήματα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση στο πεδίο της διαχείρισης των υδάτινων πόρων, γίνεται η ανασκόπηση της σύνδεσης του νερού με την ανάπτυξη, καθώς και αναφέρεται η βιώσιμη διαχείριση των υδάτινων πόρων. Επιπλέον, στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μία συνοπτική ανασκόπηση του ισχύοντος θεσμικού πλαισίου, με αναφορά στην κείμενη κοινοτική οδηγία οι οποίες βρίσκει εφαρμογή στην Ελλάδα, ενώ παρουσιάζεται και η υφιστάμενη κατάσταση στην χώρα σε ό,τι αφορά στην διαχείριση των υδάτινων πόρων υπό το πρίσμα του ισχύοντος θεσμικού κοινοτικού πλαισίου.

### 1.1 Η τεκμηρίωση της αξίας του πόσιμου νερού

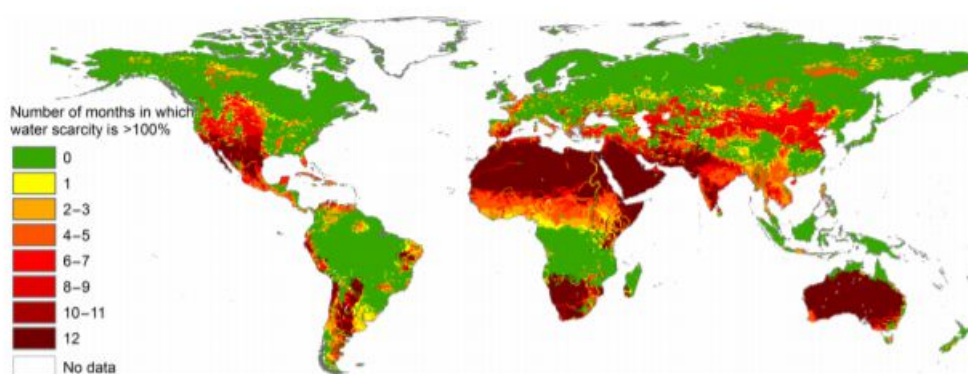
Σύμφωνα με την παγκόσμια έκθεση της Επιτροπής για την Ανάπτυξη των Υδάτων των Ηνωμένων Εθνών (World Water Development Report) παρουσιάστηκαν οι παράμετροι και οι τάσεις οι οποίες διαμορφώνουν τη ζήτηση και τη διαθεσιμότητα του νερού στο παρόν και με ορίζοντα το 2050.

Η ασφάλεια των υδάτων και η ικανότητα των κατά τόπους πληθυσμών να διασφαλίσουν τη βιώσιμη πρόσβαση σε επαρκείς ποσότητες νερού αποδεκτής ποιότητας τίθενται περισσότερο από ποτέ σε κίνδυνο και αναμένεται να τεθούν σε περισσότερο κίνδυνο στο μέλλον (Burek, etal., 2016), (World Water Assessment Programme (Nations Unies), 2018).

Η έλλειψη καθαρού νερού αποτελεί μείζον ζήτημα στον σημερινό κόσμο, ο οποίος αριθμεί έναν πληθυσμό περί των 8 δισεκατομμυρίων ανθρώπων. Η πίεση στα συστήματα ύδρευσης αναμένεται να αυξηθεί έως το 2050, οπότε ο παγκόσμιος πληθυσμός αναμένεται να αυξηθεί μεταξύ των 9,4 και των 10,2 δισεκατομμυρίων, σημειώνοντας ποσοστιαία αύξηση 22% έως 34%. Η πίεση αυτή αναμένεται να επιδεινωθεί πρωτίστως από την αύξηση του πληθυσμού σε διάφορες περιοχές χωρίς αυτή η αύξηση να ακολουθεί τη διαθεσιμότητα φυσικών πόρων, μεταξύ των οποίων και υδάτινων πόρων. Σύμφωνα με την παραπάνω αναφερόμενη έκθεση, το

μεγαλύτερο μέρος αυτής της αύξησης του πληθυσμού αναμένεται να σημειωθεί στις αναπτυσσόμενες χώρες, πρωτίστως στην Αφρική και δευτερευόντως στην Ασία, όπου η έλλειψη καθαρού νερού αποτελεί ήδη μείζον ζήτημα, συγκριτικά με άλλες περιοχές του κόσμου.

Επί του παρόντος, λίγο λιγότερο από το ήμισυ του παγκόσμιου πληθυσμού ζει σε περιοχές που υποφέρουν από λειψυδρία τουλάχιστον για έναν μήνα το χρόνο. Σύμφωνα με τους Mekonnen και Hoekstra (2016) το ποσοστό αυτό προσδιορίζεται στο 52% του παγκόσμιου πληθυσμού (Mekonnen & Hoekstra, 2016).



**Εικόνα 1: Πλήθος μηνών κατά τους οποίους σημειώνεται λειψυδρία (Mekonnen & Hoekstra, 2016)**

Έως το 2050, το ποσοστό αυτό αναμένεται να φτάσει περίπου στο 60%, σύμφωνα με συγκρατημένες προβλέψεις (Mekonnen & Hoekstra, 2016).

Σύμφωνα με την παγκόσμια έκθεση της Επιτροπής για την Ανάπτυξη των Υδάτων των Ηνωμένων Εθνών παράγοντες όπως η ζήτηση του νερού, η διαθεσιμότητα υδάτινων πόρων και η ποιότητα του διαθέσιμου νερού είναι ιδιαίτερα δύσκολο να προβλεφθούν. Ωστόσο, και οι τρεις παραπάνω συνιστώσες οι οποίες διαμορφώνουν το παγκόσμιο status γύρω από τη ζήτηση του νερού έχουν μειωθεί και υποβαθμιστεί σε σχέση με το παρελθόν.

Τόσο η παραπάνω αναφερόμενη έκθεση του ΟΗΕ όσο και αντίστοιχη έκθεση του ΟΟΣΑ επικεντρώνονται στην εφαρμογή λύσεων οι οποίες βασίζονται στη φύση, δηλαδή είτε είναι εμπνευσμένες από τη φύση είτε βασίζονται στην καλύτερη εκμετάλλευση των φυσικών πόρων. Χαρακτηριστικά αναφέρεται η πρόταση της υιοθέτησης των ξηρών τουαλετών, η οποία είναι απολύτως εμπνευσμένη από τη

φύση και η οποία μπορεί να αποφέρει διπλό όφελος, τόσο σε ό,τι αφορά στην κατανάλωση των υδάτινων πόρων όσο και σε ό,τι αφορά στην υποβάθμιση του υδροφόρου ορίζοντα και εν γένει των υδάτινων πόρων (OECD, 2012).

Γίνεται αντιληπτή η ανάγκη για υιοθέτηση πρόβλημα για την αντιμετώπιση της διαφαινόμενης κρίσης της διαθεσιμότητας πόσιμου νερού, ενεργώντας άμεσα για τη χρήση και τη διατήρηση των υδάτων. Εντοπίζονται σημαντικά εμπόδια στην κατάρτιση επαρκούς σχεδιασμού των υδάτων. Αρχικά, ένα ταμπού αποτελεί η μη αποδοχή του γεγονότος ότι η διαρκής ανάπτυξη δεν μπορεί να είναι ταυτόχρονα βιώσιμη (Kornina & Washington, 2016).

Ένα ακόμη ταμπού το οποίο λειτουργεί ως εμπόδιο είναι ο αντίκτυπος του πληθυσμού, θέμα το οποίο δεν τίθεται προς διαπραγμάτευση καθώς θεωρείται αντίθετο στον σεβασμό προς την ανθρωπότητα, αν και ήδη έχουν αρχίσει να υιοθετούνται μέτρα για τον περιορισμό του υπερπληθυσμού, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στην Κίνα (Kornina & Washington, 2016), (Wada, και συν., 2016).

Σύμφωνα με την παραπάνω αναφερόμενη έκθεση του ΟΗΕ, ο παράγοντας του παγκόσμιου πληθυσμού δεν λαμβάνεται ορθώς υπόψη κατά τον σχεδιασμό πολιτικών για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων, οδηγώντας μαζί με άλλους παράγοντες στην έλλειψη καλού και μακρόπνοου σχεδιασμού για την κάλυψη της ζήτησης του νερού, για την ορθή τιμολόγηση του νερού και εν γένει για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων (World Water Assessment Programme (Nations Unies), 2018).

Επιπλέον, και εκτός από την αναμενόμενη αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, η εντατικοποίηση της αστικοποίησης αναμένεται να επιδεινώσει περαιτέρω την κατάσταση στη διαχείριση των υδάτινων πόρων. Σύμφωνα με έκθεση του ΟΗΕ, στο τέλος του 2017, το 55% του παγκόσμιου πληθυσμού κατοικούσε σε αστικά κέντρα (United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2019).



## 1.2 Νερό και ανάπτυξη

Αν και περισσότερα από τα δύο τρίτα της επιφάνειας της γης καλύπτονται από νερό, το νερό το οποίο είναι διαθέσιμο για κατανάλωση, για την υποστήριξη του σύγχρονου τρόπου ζωής είναι ένα πολύ μικρό ποσοστό του συνολικά διαθέσιμου νερού της γης.

Πιο συγκεκριμένα, το γλυκό νερό, μέρος του οποίου μπορεί να καλύψει τις ανάγκες της ανθρωπότητας, είναι μόλις το 2,5% της συνολικής ποσότητας νερού το οποίο είναι διαθέσιμο στη γη, με το υπόλοιπο 97,5% να είναι θαλασσινό, δηλαδή αλμυρό νερό.

Ωστόσο, όπως προαναφέρεται, από το 2,5% αυτό, ένα μέρος του νερού είναι διαθέσιμο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Πιο συγκεκριμένα, περίπου το 69% του 2,5% βρίσκεται εγκλωβισμένο στους δύο πόλους της γης και στις κορυφές των βουνών, υπό μορφή χιονιού, με το εναπομένον 30% να εντοπίζεται στον υδροφόρο ορίζοντα και μόλις το 1% να βρίσκεται σε στο έδαφος ή σε υγροτόπους.

Η αειφόρος ανάπτυξη, δηλαδή η ανάπτυξη η οποία υποστηρίζεται χωρίς να επιβαρύνεται το περιβάλλον και χωρίς να γίνεται κατάχρηση των φυσικών πόρων έχει αναδειχθεί ως μονόδρομος για τη συνέχιση της ανάπτυξης σε παγκόσμιο επίπεδο.

Στα πλαίσια αυτά, γίνεται αντιληπτό πως η συνολική ποσότητα του διαθέσιμου πόσιμου νερού γίνεται διαρκώς μικρότερη. Οι ποσότητες νερού δηλαδή στις οποίες μπορεί να βασίζεται μακροπρόθεσμα η ανθρωπότητα, είναι ένα ακόμη μικρότερο μέρος του συνόλου, καθώς οι υδάτινοι πόροι δεν είναι εις όλον ανανεώσιμοι, ειδικά υπό το πρίσμα της μόλυνσης των υδάτων.

Ως εκ τούτου, για την υποστήριξη της ανάπτυξης μακροπρόθεσμα θα πρέπει να επιβραδύνει η κατανάλωση των φυσικών υδάτινων πόρων.

Το μοντέλο της αειφόρου ή βιώσιμης ανάπτυξης εισάγει ένα μοντέλο σχεδιασμού και διαχείρισης των υδάτινων πόρων, το οποίο πρέπει να στοχεύει στην κάλυψη των σημερινών αναγκών σε νερό, χωρίς να υποδαυλίζονται οι ανάγκες σε νερό των μελλοντικών γενεών.

Οι αιτίες οι οποίες έχουν διαμορφώσει τη σημερινή κρίση του νερού διαφοροποιούνται ανά ήπειρο και ανά χώρα, αλλά και από περιοχή σε περιοχή, όπως επιδρούν διαφορετικές οικονομικές, πολιτικές και κοινωνικές συνθήκες, οι οποίες διαμορφώνουν τη ζήτηση του νερού και εν γένει την περιβαλλοντικά υπεύθυνη συμπεριφορά των καταναλωτών αναφορικά με την κατανάλωση του νερού (Beal, Stewart, & Fielding, 2013).

Μια προτεινόμενη συστηματική προσέγγιση αναφορικά με τα χαρακτηριστικά τα οποία διαμορφώνουν τη σημερινή κρίση νερού μπορεί να συμπεριλαμβάνει τα παρακάτω σημεία (Μυλόπουλος, 2000):

- Μακροπρόθεσμα, η συνολική ποσότητα του διαθέσιμου νερού σε κάθε συγκεκριμένη χώρα και περιοχή είναι αμετάβλητη και πεπερασμένη. Αυτός είναι ένας καθοριστικός παράγοντας ο οποίος συνετέλεσε στη σημερινή κρίση του νερού, καθώς ενώ οι υδάτινοι πόροι είναι σταθεροί και πεπερασμένοι, η ζήτηση του νερού αυξάνεται διαρκώς. Μάλιστα, πρακτικές οι οποίες στοχεύουν στην άντληση υδάτων από βαθύτερα στρώματα του υδροφόρου ορίζοντα μπορούν να καλύψουν το πρόβλημα προσωρινά, αλλά να το εντείνουν μακροπρόθεσμα.
- Μέχρι σήμερα έχουν ήδη αξιοποιηθεί ή ξεκινούν να αξιοποιούνται οι αποδοτικότερες και οικονομικότερες μέθοδοι για την εκμετάλλευση των διαθέσιμων υδάτινων πόρων. Ως εκ τούτου, αναμένεται να εισαχθεί περισσότερο κόστος στην τιμή του νερού
- Το νερό είναι αναγκαίο για την ίδια τη ζωή, αλλά και κεφαλαιώδους σημασίας για ένα μεγάλο πλήθος πολύ σημαντικών ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, από την ύδρευση και την παραγωγή τροφίμων, μέχρι τη βιομηχανική δραστηριότητα, την παραγωγή ενέργεια κ.α.. Η αύξηση του πληθυσμού της γης, οδηγεί σε διαρκή αύξηση της ζήτησης νερού, ενώ ταυτόχρονα η αλλαγή του σύγχρονου τρόπου ζωής η οποία είναι διαρκής οδηγεί και αυτή σε αύξηση της ζήτησης του νερού.

Ο αντίκτυπος της κρίσης του νερού ανεξαρτήτως του αν αυτή έχει και φυσικές συνιστώσες, επιδεινώνεται από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες, οι

οποίες οδηγούν σε αλόγιστη, πολλές φορές κατανάλωση νερού, οδηγώντας σε χαμηλές επάρκειες νερού σε διαφορετικές περιοχές.

Βασική συνιστώσα η οποία αν δεν εντείνει, εντούτοις συντηρεί το πρόβλημα είναι οι εφαρμοζόμενες πολιτικές για τη διαχείριση του νερού, οι οποίες συχνά αποδεικνύονται ανεπαρκείς.

Υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ της κρίσης των χαμηλών αποθεμάτων νερού και της κρίσης που δημιουργείται από την ανεπαρκή διαχείριση του νερού. Εντούτοις, εντοπίζεται μεγάλο περιθώριο βελτίωσης σε ό,τι αφορά στην αποτελεσματικότερη διαχείριση των υδάτινων πόρων και δη σε ό,τι αφορά στη διαχείριση της ζήτησης του νερού παγκοσμίως, αλλά και στην Ελλάδα.

### **1.3 Βιώσιμη διαχείριση υδάτινων πόρων**

Τα τελευταία χρόνια σημειώνεται μία γενικότερη στροφή στη βιωσιμότητα σε όλο το φάσμα των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, προκειμένου να ανακοπούν οι αρνητικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και με απώτερο σκοπό να εξασφαλιστεί η διαθεσιμότητα φυσικών πόρων, συμπεριλαμβανομένων των υδάτινων πόρων για τις επόμενες γενιές.

Στο γενικότερο πλαίσιο μετάβασης σε μοντέλα βιώσιμης ανάπτυξης εντάσσονται και οι πολιτικές και στρατηγικές βιώσιμης διαχείρισης των υδάτινων πόρων.

Στα πλαίσια της μετάβασης σε μοντέλα βιώσιμης ανάπτυξης, τόσο το νερό όσο και άλλοι φυσικοί πόροι γίνεται αντιληπτό πως είναι πεπερασμένοι και καθίσταται αναγκαία η εξεύρεση τρόπων για τον εξορθολογισμό της χρήσης τους.

Στην κατεύθυνση εξορθολογισμού της χρήσης των φυσικών πόρων επιστρατεύεται πρωτίστως η τεχνολογία και δευτερεύοντος άλλες επιστήμες. Το ζητούμενο για τη βιώσιμη ανάπτυξη είναι η κάλυψη των αναγκών του σύγχρονου κόσμου, υπό το πρίσμα της διαρκούς ανάπτυξης με παράλληλη μείωση των χρησιμοποιούμενων φυσικών πόρων και εν γένει με παράλληλη μείωση της επίδρασης του σύγχρονου τρόπου ζωής στο περιβάλλον.

Στα πλαίσια αυτά απαιτείται η διατήρηση και ορθολογική χρήση των κατά τόπους υδάτινων δυναμικών, μέσα από τον σχεδιασμό και την εφαρμογή νέων πολιτικών για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων.

Σύμφωνα με το ισχύον θεσμικό πλαίσιο, τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, τις εκθέσεις του ΟΗΕ και άλλων φορέων αναφορικά με τη βιώσιμη ανάπτυξη και τη βιώσιμη διαχείριση των υδάτινων πόρων, εισάγονται οι παρακάτω βασικοί πυλώνες για το σχεδιασμό της πολιτικής διαχείρισης των υδάτινων πόρων (Task Committee on Sustainability Criteria, Water Resources Planning and Management Division, ASCE and the Working Group of UNESCO/IHP IV Project M-4.3, 1998), (European Commission, 1991), (European Commission, 2006), (European Commission, 1991), (European Commission, 1998), (European Commission, 2000):

- Ενιαία και ολιστική αντιμετώπιση των κοινωνικών, οικονομικών, τεχνικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων οι οποίες διαμορφώνουν τις μεθόδους διαχείρισης των υδάτινων πόρων. Ο πυλώνας αυτός σηματοδοτεί τη μετάβαση από την παλαιότερη θεώρηση όπου το νερό και οι υδάτινοι πόροι διαχειρίζονταν ξεχωριστά σε μία θεώρηση όπου στη διαχείρισή τους εισάγονται και άλλες παράμετροι οι οποίες διαμορφώνουν τη ζήτηση του νερού. Στα πλαίσια αυτά, όλες οι οικονομικές δραστηριότητες εξετάζονται ενιαία σε επίπεδο υδατικού διαμερίσματος ή και υδρολογικής λεκάνης. Επιπλέον, στα πλαίσια αυτά, οι παραπάνω παράμετροι εξετάζονται συγχρόνως ποσοτικά και ποιοτικά προκειμένου για την εξαγωγή ακριβών συμπερασμάτων και για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των προς εφαρμογή πολιτικών.
- Ορθολογική διαχείριση της ζήτησης για τον υπολογισμό της ορθής τιμής του νερού. Στα πλαίσια αυτά εισάγεται η λογική της διατήρησης των υφιστάμενων πηγών ακόμη και όταν αυτές πλησιάζουν προς εξάντληση, καθώς καθίσταται κατανοητό πως η διαρκής εξεύρεση νέων πηγών υδάτων είναι οικονομικά μη αποδοτική και ταυτόχρονα επιβαρύνει δυσανάλογα το περιβάλλον. Συμπερασματικά, αυτός ο πυλώνας βασίζεται στη μετάβαση από τη διαρκή αναζήτηση νέων και περισσότερων πηγών υδάτων στην ορθολογική διαχείριση της ζήτησης προκειμένου αυτή να μπορεί να

καλυφθεί από τις υφιστάμενες πηγές νερού, καθώς αυτή η μέθοδος προκρίνεται ως τεχνικά ευκολότερη, οικονομικά βιωσιμότερη και περιβαλλοντικά φιλικότερη.

- Σύλληψη της οικονομικής αξίας του νερού, πέραν της κοινωνικής του αξίας, και εξορθολογισμός των μεθόδων υπολογισμού της αξίας του προκειμένου αυτή να συλλέγεται από τους καταναλωτές ορθά. Σαφώς είναι αναγκαία η αντιμετώπιση του νερού ως κοινωνικό αγαθό, ωστόσο η πολιτική αυτή μπορεί να αφορά μικρό μόνον μέρος της ζήτησης, με το επαγόμενο κόστος να επιμερίζεται στους υπόλοιπους καταναλωτές οι οποίοι δύνανται να αναλάβουν την αντίστοιχη επιβάρυνση.
- Απελευθέρωση και αποκέντρωση της αγοράς του νερού, προκειμένου να συμμετέχουν στις πολιτικές και στις αποφάσεις για τη διαχείριση περισσότεροι παράγοντες άμεσα και έμμεσα, μέσω π.χ. ελεύθερης επιλογής του παρόχου τους. Στα πλαίσια αυτά, η διαχείριση της αγοράς του νερού θα πρέπει να γίνεται ενιαία για όλες τις δραστηριότητες, με διαχωρισμό των καταναλωτών όχι βάσει της δραστηριοποίησής τους, αλλά βάσει την διαθεσιμότητα νερού στον τόπο εγκατάστασης, προκειμένου κάθε καταναλωτής να επιβαρύνεται ανάλογα με τους παρακείμενα διαθέσιμους υδάτινους πόρους.

Στα πλαίσια σχεδιασμού των πολιτικών για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων, σημαντικό ρόλο παίζει η κατά κεφαλήν κατανάλωση νερού. Ειδικότερα, η κατά κεφαλήν κατανάλωση νερού είναι ένας κύριος παράγοντας ο οποίος διαμορφώνει τις εφαρμοζόμενες τιμολογιακές πολιτικές, τις μεθόδους υπολογισμού του κόστους του νερού, αλλά και τις μεθόδους πρόβλεψης της ζήτησης και πρόβλεψης αναμενόμενων μελλοντικών δαπανών για τη διατήρηση της λειτουργικότητας των δικτύων ύδρευσης.

Σαφώς, η κατά κεφαλήν κατανάλωση του νερού είναι μία συνιστώσα η οποία δεν μπορεί να προσφέρει πολλά δεδομένα αναφορικά με τη ζήτηση του νερού, καθώς αγνοεί βασικές συνιστώσες και παράγοντες οι οποίες μπορούν να επιδρούν στη ζήτηση και στο προφίλ της ζήτησης του νερού.

Χαρακτηριστικά, στην κατά κεφαλήν κατανάλωση του νερού δεν συμπεριλαμβάνονται δεδομένα τα οποία αφορούν στα δημογραφικά χαρακτηριστικά ή στο εισόδημα των καταναλωτών, στο είδος των καταναλωτών, στο μέγεθος των νοικοκυριών και στην επίδραση των περιβαλλοντικών και κλιματολογικών συνθηκών στη ζήτηση του νερού (Gikas & Angelakis, 2009), (Kampragou, Lekkas, & Assimacopoulos, 2011).

Ως εκ τούτου, παρατηρείται μία στροφή σε μοντέλα στα οποία αξιολογείται ένα σύνολο παραγόντων που διαμορφώνουν τη ζήτηση, την τιμολόγηση και επακόλουθα τους τρόπους μέσα από τους οποίους καλύπτεται η ζήτηση του νερού (Koloxytha, Myloroulos, & Mentis, 2002), (Xenos, Passios, Georgiades, Parlis, & Koutsoyiannis, 2002).

## **1.4 Θεσμικό πλαίσιο**

Τον Οκτώβριο του 2000 υιοθετήθηκε το ενιαίο ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων, μέσα από την έκδοση της Κοινοτικής Οδηγίας 2000/60/EC (European Commission, 2000).

Η οδηγία αυτή υιοθέτησε μία καινοτόμο προσέγγιση για την προστασία και τη διαχείριση των υδάτινων πόρων, εξετάζοντας όλες τις πτυχές και όλα τα επίπεδα στα των υδάτινων πόρων, από τις λεκάνες απορροής και τους ποταμούς, μέχρι την αστική κατανάλωση του νερού και τη διαχείριση των υγρών λυμάτων.

Η οδηγία αυτή έθεσε δεσμευτικούς στόχους για τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με ορίζοντα το 2015, αναφορικά με την προστασία των υδάτινων πόρων.

Η επάρκεια νερού σε όλα τα κράτη της Ευρώπης βρίσκεται υπό πίεση. Οι οικονομικές δραστηριότητες, η αύξηση του πληθυσμού και η αστικοποίηση αυξάνουν την πίεση στα δίκτυα ύδρευσης και θέτουν σε κίνδυνο όχι μόνον την επάρκεια νερού αλλά και την επαρκή πρόσβαση σε ασφαλή και ποιοτικά ύδατα.

Το θεσμικό αυτό πλαίσιο καταρτίστηκε και τα προτεινόμενα μέτρα υιοθετήθηκαν επί των παρακάτω πυλώνων:

- Η επάρκεια υδάτων σε όλα τα Ευρωπαϊκά Κράτη είναι κίνδυνο ο οποίος αναμένεται να ενταθεί μέχρι το 2050
- Τα αποθέματα υδάτων, οι ποταμοί και οι λίμνες απορροής στην Ευρώπη εμφανίζουν υψηλά ποσοστά μόλυνσης, η οποία δεν περιορίζεται στα εθνικά σύνορα και η υιοθέτηση κοινής πολιτικής είναι αναγκαία προκειμένου να διαφυλαχθεί η πρόσβαση σε ασφαλή ύδατα για όλα τα κράτη μέλη
- Η εξασφάλιση ποιοτικών υδάτων είναι ζωτικής σημασίας για την ανθρώπινη ζωή και τη βιοποικιλότητα
- Η περιβαλλοντική συνείδηση των ευρωπαίων πολιτών πρέπει να ενισχυθεί προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι κίνδυνοι που σχετίζονται με την επαρκή πρόσβαση σε ασφαλή και ποιοτικά ύδατα
- Η υιοθέτηση κοινής πολιτικής για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων πρέπει να είναι καθολική και να καλύπτει όλες τις πτυχές των υδάτινων πόρων
- Στα πλαίσια της κλιματικής αλλαγής, η υιοθέτηση κοινών μέτρων για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων είναι επιτακτική καθώς αναμένεται σημαντική αύξηση της ζήτησης και ταυτόχρονα σημαντική μείωση της διαθεσιμότητας υδάτων

Τον Δεκέμβριο του 2020 καταρτίστηκε η οδηγία πλαίσιο σχετικά με την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης 2020/2184/EC. Η οδηγία καθορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις με τις οποίες θα πρέπει να συμμορφώνεται το νερό που προορίζεται για τον ανθρώπινη κατανάλωση. Τα κράτη μέλη οφείλουν να λαμβάνουν τα αναγκαία μέτρα για να διασφαλίζουν ότι το νερό ανθρώπινης κατανάλωσης είναι απαλλαγμένο από οποιουσδήποτε μικροοργανισμούς και παράσιτα, καθώς και από ουσίες, οι οποίες, σε αριθμούς ή συγκεντρώσεις, σε ορισμένες περιπτώσεις, συνιστούν δυνητικό κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία, και ότι πληροί τις εν λόγω ελάχιστες απαιτήσεις.

Το 2017, το περιφερειακό γραφείο του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (ΠΟΥ) για την Ευρώπη διεξήγαγε λεπτομερή επανεξέταση του καταλόγου των

παραμέτρων και των παραμετρικών τιμών που καθορίζονται στην οδηγία 98/83/ΕΚ, προκειμένου να διαπιστώσει κατά πόσον απαιτείται προσαρμογή του εν λόγω καταλόγου στην τεχνική και την επιστημονική πρόοδο. Από 12-1-2026 γίνονται υποχρεωτικοί οι έλεγχοι επιπλέον χημικών παραμέτρων όπως η δισφαινόλη Α, χλωρικά, χλωριώδη, αλογονοοξικά οξέα, η μικροκυστίνη και το ουράνιο. Από 1-1-2022 καθίσταται υποχρεωτικοί οι έλεγχοι για β- οιστραδιόλη, εννεύλοφαινόλη. Ο έλεγχος για μικροπλαστικά γίνεται υποχρεωτικός μετά το 2024. Τα υφιστάμενα όρια μικροβιολογικών και χημικών παραμέτρων αναθεωρούνται επίσης.

Εξυπακούεται ότι τα όρια αυτά ισχύουν και για νερό που προέρχεται από αφαλάτωση. Η μόνη εξαίρεση που κάνει η οδηγία για το νερό από αφαλάτωση είναι η τελική συγκέντρωση βορίου να μην ξεπερνάει τα 2,4mg/l σε σχέση με το 1,5mg/l που είναι η παραμετρική τιμή.

Ασφαλές νερό ανθρώπινης κατανάλωσης δεν σημαίνει μόνον απουσία επιβλαβών μικροοργανισμών και ουσιών, αλλά και παρουσία ορισμένων ποσοτήτων φυσικών μεταλλικών στοιχείων και ιχνοστοιχείων, λαμβανομένου υπόψη ότι η μακροχρόνια κατανάλωση απιονισμένου νερού ή νερού με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε ιχνοστοιχεία, όπως ασβέστιο και μαγνήσιο, μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία. Ορισμένη ποσότητα των μεταλλικών αυτών στοιχείων είναι επίσης ζωτικής σημασίας για να διασφαλιστεί ότι το νερό ανθρώπινης κατανάλωσης δεν είναι ούτε επιθετικό ούτε διαβρωτικό και για να βελτιωθεί η γεύση του νερού αυτού. Οι ελάχιστες συγκεντρώσεις των εν λόγω μεταλλικών στοιχείων στο αποσκληρυμένο ή απιονισμένο νερό θα μπορούσαν να συνεκτιμηθούν σύμφωνα με τις τοπικές συνθήκες.

## **1.5 Η υφιστάμενη κατάσταση στην Ελλάδα**

Η Ελλάδα επιτυγχάνει υψηλά ποσοστά συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις των κοινοτικών οδηγιών για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων. Κατά την περίοδο 2011-2013, το πόσιμο νερό στην Ελλάδα έφτασε να είναι κατά 99% έως και 100% συμμορφούμενο με τις μικροβιολογικές, χημικές και ενδεικτικές απαιτήσεις οι

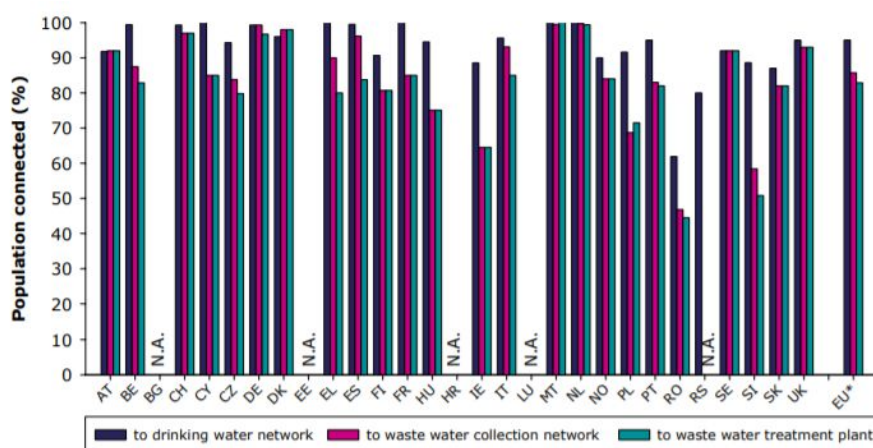


οποίες απορρέουν από την Κοινοτική Οδηγία 2020/2184/EC (European Commission, 2020).

Ωστόσο, σύμφωνα με εκτιμήσεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής αναμένεται ότι η Ελλάδα θα αντιμετωπίσει έναν από τους υψηλότερους δυνητικούς κινδύνους για την υγεία εξαιτίας της ανεπάρκειας πρόσβασης σε ασφαλές πόσιμο νερό με ορίζοντα το 2050 (European Commission , 2018).

Τα υπόγεια ύδατα είναι η κυρίαρχη πηγή πόσιμου νερού στην Ελλάδα, ενώ η Ελλάδα είναι μία από τις μόνον τέσσερις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης που βασίζονται στην αφαλάτωση για την εξασφάλιση πόσιμου νερού, με το ποσοστό του πόσιμου νερού το οποίο προέρχεται από αφαλάτωση να φτάνει στο 2% της συνολικής κατανάλωσης νερού (EurEau, 2017 ).

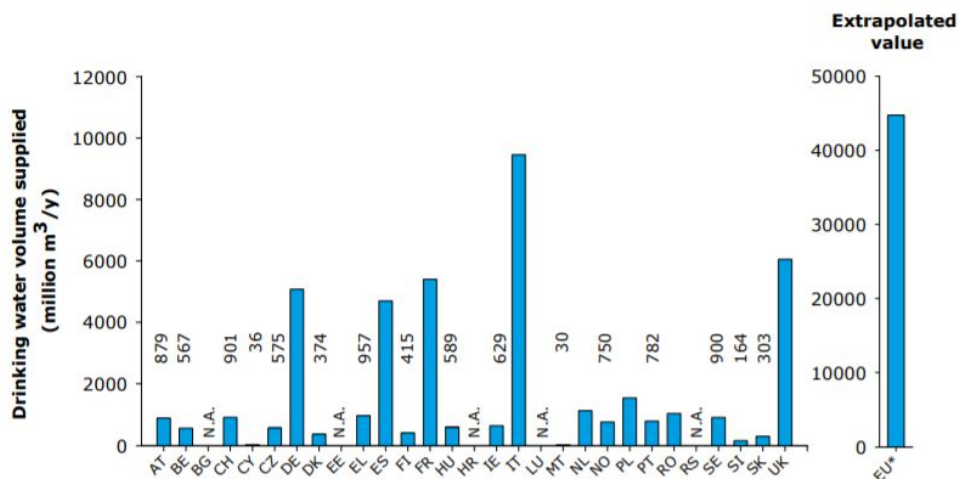
Η πλειονότητα, περί το 94% του ελληνικού πληθυσμού είναι συνδεδεμένο με τα δημόσια δίκτυα νερού (European Commission , 2018). Ένα καίριο ζήτημα το οποίο αντιμετωπίζει το δίκτυο ύδρευσης στην Ελλάδα είναι οι διαρροές, οι οποίες είναι σημαντικές και συχνά η διόρθωσή τους καθυστερεί (European Commission , 2018).



**Εικόνα 2: Ποσοστό συνδεδεμένων νοικοκυριών με τα δίκτυα ύδρευσης, αποχέτευσης και βιολογικού καθαρισμού στην Ευρώπη των 28 (EurEau, 2017 )**

Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι ο Δείκτης Διαρροής Υποδομών (ILI) για τα δίκτυα ύδρευσης στην Ελλάδα κυμαίνεται από 9,7 έως 16,1, ενώ τιμές άνω του 3 θεωρούνται μη αποδεκτές και συναντώνται ως επί το πλείστο σε αναπτυσσόμενες χώρες (Ashley, 2018).

Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία του Eur Eau, στην Ελλάδα σημειώνεται η μεγαλύτερη κατανάλωση νερού, η οποία φτάνει στα 257 l ανά κάτοικο ανά ημέρα σε σχέση με τα υπόλοιπα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης.



**Εικόνα 3: Συνολική ετήσια κατανάλωση νερού στην Ευρωπαϊκή Ένωση (των 28) (EurEau, 2017)**

Η δε έλλειψη γλυκών υδάτων και η άνοδος της στάθμης της θάλασσας αποτελούν μείζονες κινδύνους που οφείλονται στην κλιματική αλλαγή και θέτουν σε κίνδυνο την επάρκεια νερού με ορίζοντα το 2050. Τα μείζονα επεισόδια ξηρασίας προβλέπεται να γίνουν συχνότερα και σοβαρότερα, με ιδιαίτερα έντονες θερινές ξηρασίες (OECD, 2013).

Το προβλεπόμενο σωρευτικό κόστος παροχής πόσιμου νερού για τη δεκαετία 2040 – 2050 αναμένεται ότι θα φτάσει περίπου στο 1,3% του ΑΕΠ της χώρας (BankofGreece, 2011).

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι από το 2014, όλοι οι οικισμοί άνω των 2000 κατοίκων συμμορφώθηκαν με τις απαιτήσεις της κοινοτικής νομοθεσίας αναφορικά με τη συλλογή και διαχείριση των λυμάτων, είτε μέσω δικτύων αποχετεύσεων είτε μέσω ιδιωτικών συστημάτων εγκαταστάσεων συλλογής των λυμάτων (EurEau, 2017).

Τέλος, σημειώνεται ότι η Ελλάδα αντιμετώπισε πρόστιμα, ως επί το πλείστο όχι για τη συλλογή αλλά για την επεξεργασία των λυμάτων, ζήτημα το οποίο έχει βελτιωθεί σε μεγάλο βαθμό από το 2015 (EurEau, 2017).

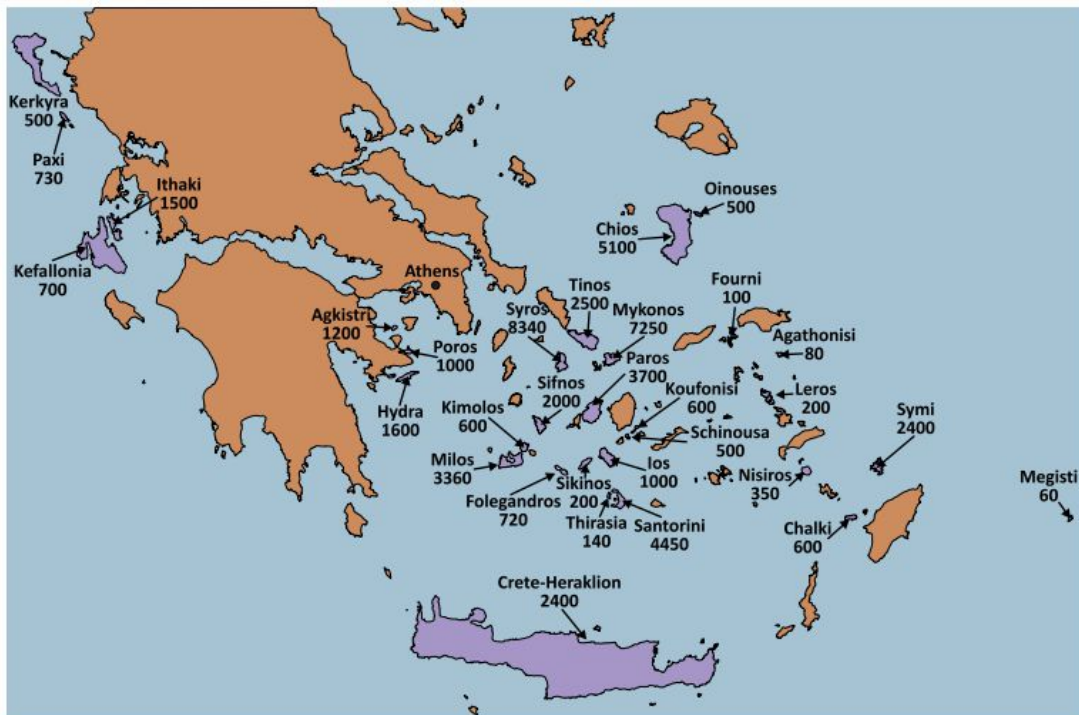
Ιδίως σε ό,τι αφορά στη διείδυση της αφαλάτωσης στην Ελλάδα, αρχικά εξετάζεται το ισοζύγιο της ζήτησης και της προσφοράς καθαρού και πόσιμου νερού στη χώρα, το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ιδίως στη νησιωτική χώρα (Kartalidis, Tzen, Kampragkou, & Assimacopoulos, 2016):



**Εικόνα 4: Νησιωτικά συμπλέγματα της Ελλάδας (Kartalidis, Tzen, Kampragkou, & Assimacopoulos, 2016)**

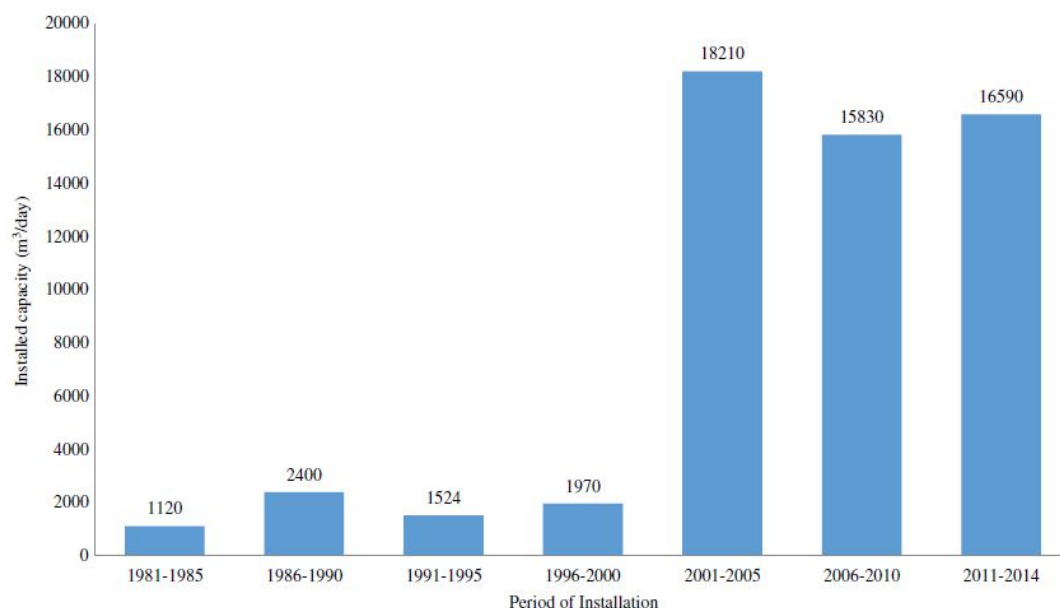
Στις παραπάνω νησιωτικές περιοχές και συμπλέγματα το ισοζύγιο ζήτησης και προσφοράς πόσιμου και καθαρού νερού είναι αρνητικό, με μοναδική εξαίρεση τις Ιόνιες νήσους (Kartalidis, Tzen, Kampragkou, & Assimacopoulos, 2016):

Παρακάτω παρατίθεται το δυναμικό παραγωγής καθαρού νερού από μονάδες αφαλάτωσης στην Ελλάδα (Kartalidis, Tzen, Kampragkou, & Assimacopoulos, 2016):



**Εικόνα 5: Μονάδες αφαλάτωσης στην Ελλάδα (Kartalidis, Tzen, Kampragkou, & Assimacopoulos, 2016)**

Στον παραπάνω χάρτη σημειώνεται η ημερήσια δυναμικότητα παραγωγής πόσιμου νερού από μονάδες αφαλάτωσης. Στην επόμενη εικόνα παρατίθενται στοιχεία τα οποία αφορούν στην εξέλιξη της εγκατάστασης μονάδων αφαλάτωσης στην Ελλάδα από το 1981 έως το 2014:



***Εικόνα 6: Εξέλιξη δυναμικότητας παραγωγής πόσιμου νερού από αφαλάτωση (Kartalidis, Tzen, Kampragkou, & Assimacopoulos, 2016)***

Η συνολική δυναμικότητα παραγωγής πόσιμου νερού από αφαλάτωση αυξήθηκε ραγδαία κατά την περίοδο 2001 έως 2014. Η αύξηση αυτή είναι απόρροια τόσο της έντασης των φαινομένων λειψυδρίας όσο και της υιοθέτησης νέου θεσμικού πλαισίου για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων, όπως αυτό παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

## 2 Αφαλάτωση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα ευρήματα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση στο πεδίο της αφαλάτωσης. Μετά από μία σύντομη εισαγωγή όπου τεκμηριώνεται η αξία της αφαλάτωσης, παρουσιάζονται οι εφαρμοζόμενες μέθοδοι αφαλάτωσης.

### 2.1 Εισαγωγή

Η παγκόσμια αύξηση του πληθυσμού, η αστικοποίηση και η εκβιομηχάνιση έχουν αυξήσει τις απαιτήσεις για υδάτινους πόρους. Ταυτόχρονα οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και αναλυτικότερα τα ακραία καιρικά φαινόμενα και η ολοένα και αυξανόμενη ξηρασία, έχουν περιπλέξει περαιτέρω και επιδεινώσει την ισορροπία του ισοζυγίου της προσφοράς και της ζήτησης του νερού. Με αυτήν την κοινή πίεση, τα ζητήματα που συνδέονται με το άγχος και η έλλειψη νερού αναμένεται να είναι διαδεδομένα και να αυξάνονται σημαντικά για τα επόμενα χρόνια. Η αυξανόμενη συνειδητοποίηση προς τις εκτεταμένες επιπτώσεις της λειψυδρίας και της φθίνουσας ποιότητας του νερού για το περιβάλλον και η ανθρωπότητα έχει ωθήσει σημαντικές προσπάθειες αναζήτησης βιώσιμων λύσεων για την αντιμετώπιση της τρέχουσας παγκόσμιας πρόκλησης. Μεταξύ των πολλών στρατηγικών που υιοθετήθηκαν για την παροχή προσιτών και ασφαλές πόσιμο νερό, διακρίνονται τόσο παραδοσιακές μέθοδοι οι οποίες βρίσκουν εφαρμογή τα τελευταία πολλά έτη, όσο και καινοτόμες μέθοδοι, όπως αυτές οι οποίες βασίζονται στην εφαρμογή νανοϋλικών και νανομεμβρανών (Goh, Ismail, & Hilal, 2016).

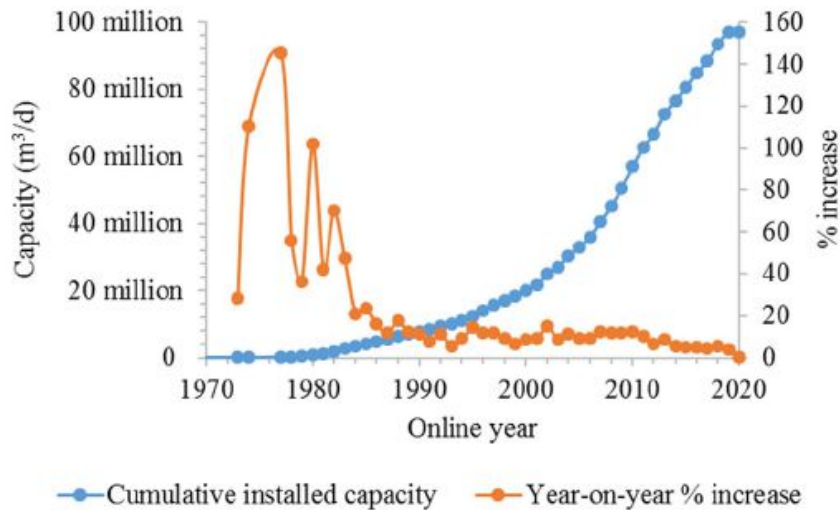
Οι τεχνολογίες αφαλάτωσης έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως τα τελευταία χρόνια για την παραγωγή καθαρού πόσιμου νερού από τον υδροφόρο ορίζοντα, το θαλασσινό νερό και τα αποθέματα υφάλμυρων υδάτων, για την βελτίωση της κάλυψης της ζήτησης του νερού αλλά και για την βελτίωση της ποιότητας του πόσιμου νερού, αλλά και του νερού για όλο το φάσμα των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων.

## 2.2 Διαδικασία αφαλάτωσης

Η διαδικασία της αφαλάτωσης ή παραγωγή δηλαδή πόσιμου νερού ή νερού για βιομηχανικές χρήσεις από θαλασσινό νερό γίνεται είτε μέσω θερμικής τεχνολογίας είτε μέσω μεμβρανών διήθησης. Η θερμική επεξεργασία εφαρμόζεται κυρίως σε χώρες με πλούσια κοιτάσματα ορυκτών καυσίμων, ενώ οι μεμβράνες διήθησης βρίσκουν την περισσότερη εφαρμογή σχεδόν σε ολόκληρο τον κόσμο (Villacorte, 2014).

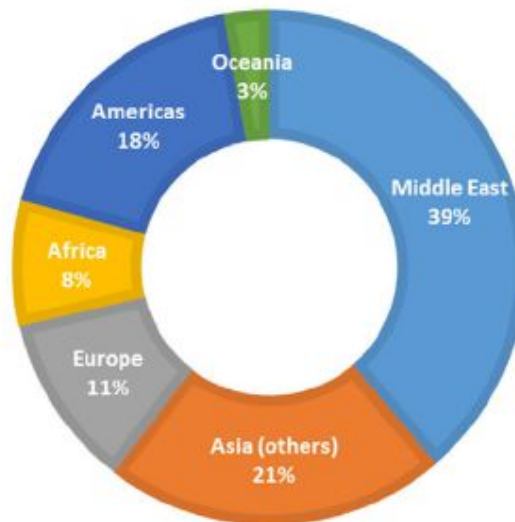
Το αλατούχο νερό το οποίο υπόκειται στη διαδικασία της αφαλάτωσης μπορεί να ταξινομηθεί είτε ως πλήρως θαλασσινό νερό είτε ως υφάλμυρο νερό. Μέσα από την εξέλιξη της τεχνολογίας στους τομείς των μεμβρανών και των χρησιμοποιούμενων υλικών, αλλά και στα πλαίσια της προαναφερθείσας στροφής σε μοντέλα και στρατηγικές βιώσιμης ανάπτυξης, π.χ. μέσα από την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι διαδικασίες αφαλάτωσης γίνονται διαρκώς πιο ανταγωνιστικές συγκριτικά με άλλες μεθόδους επεξεργασίας και παραγωγής πόσιμου νερού.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η εξέλιξη της εγκατεστημένης χωρητικότητας παραγωγής πόσιμου νερού από αφαλάτωση, συμπεριλαμβανομένων διαφόρων τεχνολογιών αφαλάτωσης, καθώς και η ετήσια αύξηση της εγκατεστημένης χωρητικότητας (Eke, Yusuf, Giwa, & Sodiq, 2020):



**Εικόνα 7: Παγκόσμια εγκατεστημένη χωρητικότητα παραγωγής πόσιμου νερού από αφαλάτωση και ετήσια μεταβολή (Eke, Yusuf, Giwa, & Sodiq, 2020)**

Παρά την εξέλιξη της τεχνολογίας, και ενώ η αθροιστική εγκατεστημένη χωρητικότητα παραγωγής νερού από αφαλάτωση ακολουθεί εκθετική πορεία κατά τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες τουλάχιστον, σημειώνεται επιβράδυνση της ετήσιας αύξησης της χωρητικότητας από το 2020.

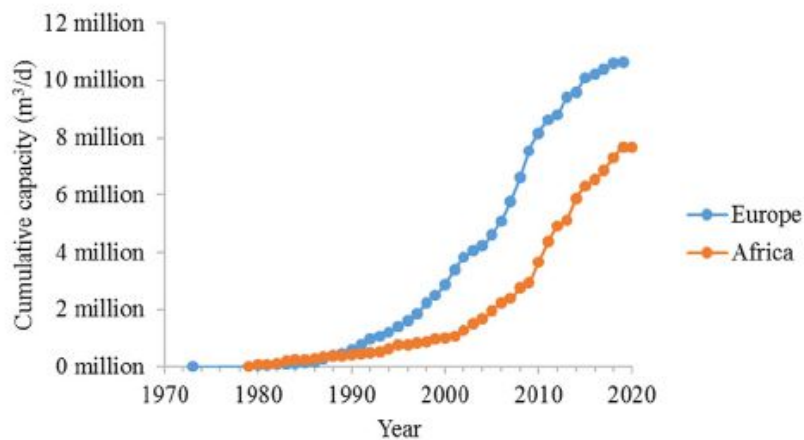


**Εικόνα 8: Κατανομή εγκατεστημένης χωρητικότητας παραγωγής πόσιμου νερού από αφαλάτωση (Eke, Yusuf, Giwa, & Sodiq, 2020)**

Η μερίδα του λέοντος της εγκατεστημένης δυναμικότητας παραγωγής πόσιμου νερού από αφαλάτωση εντοπίζεται στις χώρες της Μέσης Ανατολής, ακολουθούμενες από την Ασία και την Αμερική. Οι λόγοι στους οποίους οφείλεται η πρωτιά αυτή των χωρών της Μέσης Ανατολής είναι η μεγάλη συχνότητα

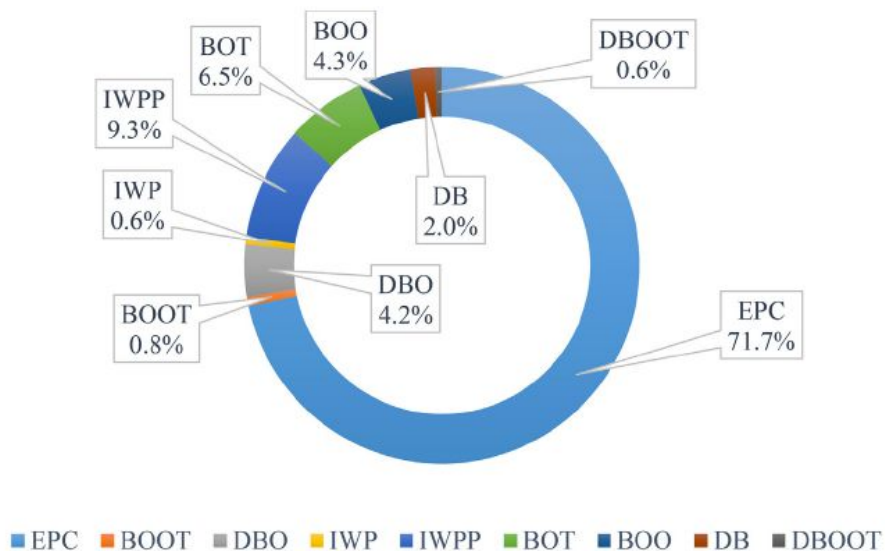


φαινομένων λειψυδρίας σε συνδυασμό με την ταχεία οικονομική ανάπτυξη και την διαρκή αύξηση του πληθυσμού.



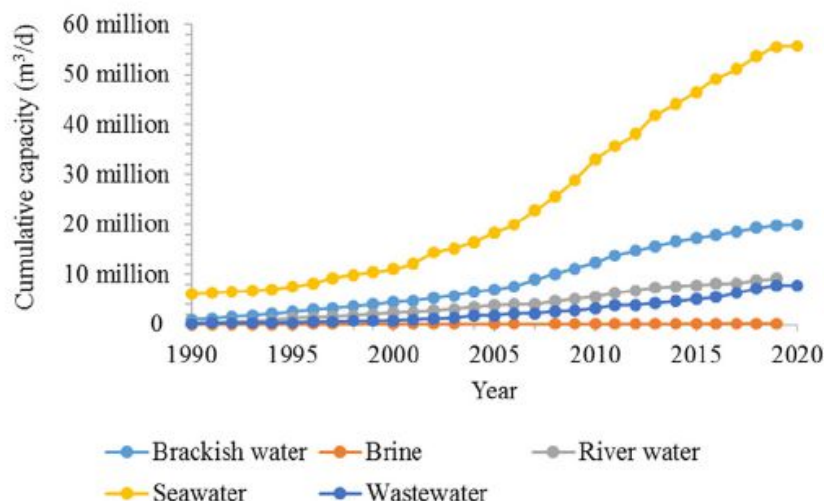
**Εικόνα 9: Αθροιστική δυναμικότητα παραγωγής πόσιμου νερού από εγκατεστημένες μονάδες αφαλάτωσης στην Ευρώπη και την Αφρική (Eke, Yusuf, Giwa, & Sodiq, 2020)**

Ειδικά σε ό,τι αφορά στις διαφορετικές εφαρμοζόμενες τεχνολογίες αφαλάτωσης, αλλά και στις στρατηγικές εγκατάστασης μονάδων αφαλάτωσης παρατίθενται στατιστικά στοιχεία στις παρακάτω εικόνες:



**Εικόνα 10: Κατανομή στρατηγικών και τεχνολογιών κατασκευής μονάδων αφαλάτωσης (Eke, Yusuf, Giwa, & Sodiq, 2020)**

Σε ό,τι αφορά στην πηγή των υδάτων τα οποία υπόκεινται σε διαδικασίες αφαλάτωσης για την παραγωγή πόσιμου νερού παρατίθενται σχετικά στατιστικά στοιχεία στην παρακάτω εικόνα:



**Εικόνα 11: Εξέλιξη της κατανομής των πηγών υδάτινων πόρων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πόσιμου νερού μέσα από διαδικασίες αφαλάτωσης (Eke, Yusuf, Giwa, & Sodiq, 2020)**

Το θαλασσινό νερό αντιπροσωπεύει το είδος νερού το οποίο υπόκειται σε διαδικασίες αφαλάτωσης κατά το μεγαλύτερο βαθμό, ενώ παράλληλα σημειώνεται η μεγαλύτερη ετήσια αύξηση της χρήσης θαλασσινού νερού για παραγωγή πόσιμου νερού μέσα από διαδικασίες αφαλάτωσης (Eke, Yusuf, Giwa, & Sodiq, 2020). Σημαντική αύξηση σημειώνεται και στην επεξεργασία λυμάτων τα οποία υπόκεινται σε ένα συνολικό πλαίσιο διαχείρισης συμπεριλαμβανομένης και της αφαλάτωσης για την παραγωγή πόσιμου νερού (Eke, Yusuf, Giwa, & Sodiq, 2020).

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται συνοπτικά οι διαθέσιμες τεχνολογίες και μέθοδοι αφαλάτωσης, ενώ περαιτέρω ανάλυση γίνεται στα επόμενα κεφάλαια για τις επικρατέστερες μεθόδους αφαλάτωσης. Επιπλέον, στις παρακάτω παραγράφους αξιολογούνται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Όπως προαναφέρεται υπάρχουν δύο κατηγορίες μεθόδων και τεχνολογιών αφαλάτωσης, οι θερμικές μέθοδοι και οι μέθοδοι που βασίζονται σε μεμβράνες. Πιο αναλυτικά, αυτές οι κατηγορίες τεχνολογιών αφαλάτωσης προκύπτουν από και περιλαμβάνουν τις παρακάτω επιμέρους μεθόδους και διεργασίες:

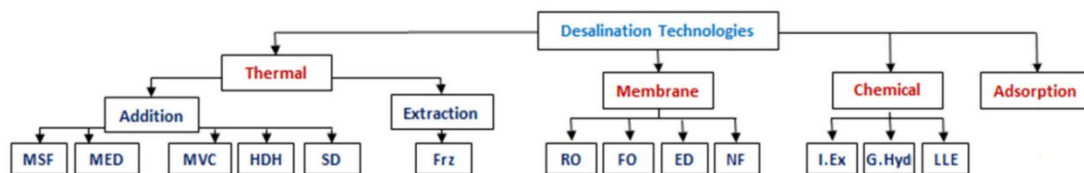
- Διεργασίες όπου η αφαλάτωση γίνεται μέσω αλλαγής φάσης του θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού. Σε αυτές περιλαμβάνονται οι διεργασίες της απόσταξης και της κρυστάλλωσης. Η μεν πρώτη είναι

μία από τις δύο πλέον διαδεδομένες τεχνολογίες, ενώ η δε δεύτερη δεν βρίσκει ιδιαίτερα ευρεία εφαρμογή. Σε ό,τι αφορά ειδικά στη διεργασία της απόστασης, διακρίνεται η διεργασία της πολυβάθμιας εκτόνωσης, η διεργασία της πολυβάθμιας εξάτμισης, η διεργασία της εξάτμισης μέσω συμπίεσης ατμών και η ηλιακή απόσταξη.

- Διεργασίες όπου η αφαλάτωση λαμβάνει χώρα χωρίς αλλαγή φάσης, όπου δηλαδή το θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό παραμένει στην υγρή του φάση καθ' όλη τη διάρκεια της επεξεργασίας. Σε αυτές περιλαμβάνονται οι διεργασίες της αντίστροφης ώσμωσης και της ηλεκτροδιάλυσης, όπου εφαρμόζονται ειδικές μεμβράνες για την απομάκρυνση των αλάτων από το νερό.

Επιπλέον, διακρίνονται χημικές μέθοδοι όπως και η τεχνολογία της προσρόφησης. Οι μέθοδοι και τεχνολογίες αυτές βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο και δεν προσφέρουν επί του παρόντος τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε μεγάλη κλίμακα.

Παρακάτω, στην Εικόνα 12 παρατίθεται ένα δενδροδιάγραμμα στο οποίο παρουσιάζονται οι διάφορες διαθέσιμες τεχνολογίες και μέθοδοι αφαλάτωσης:



**Εικόνα 12: Κατηγοριοποίηση μεθόδων και τεχνολογιών αφαλάτωσης (Youssef, AL-Dadah, & Mahmoud, 2014)**

Από τις παραπάνω κατηγορίες μεθόδων αφαλάτωσης παρουσιάζονται εκτενώς οι δύο επικρατέστερες μέθοδοι οι οποίες βρίσκουν πιο ευρεία εφαρμογή από τις χημικές μεθόδους και τη μέθοδο της προσρόφησης.

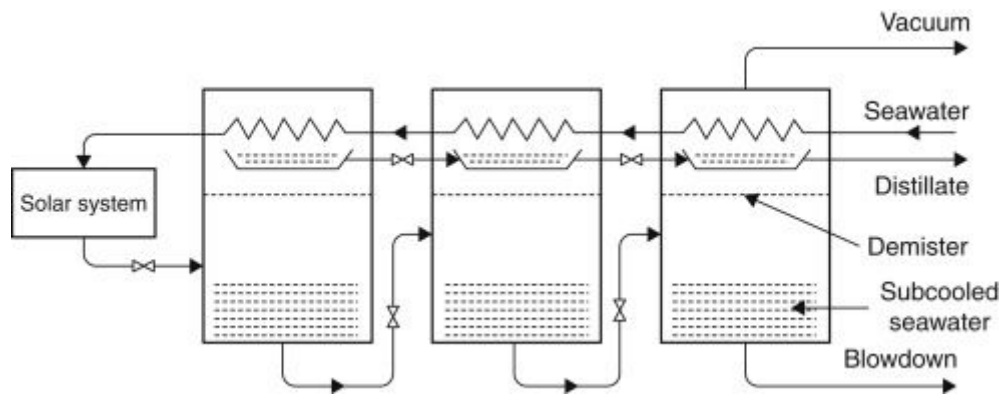
## 2.3 Θερμικές μέθοδοι

### 2.3.1 Πολυβάθμια εκτόνωση

Η μία από τις δύο πιο διαδεδομένες μεθόδους αφαλάτωσης είναι η διαδικασία πολυβάθμιας εκτόνωσης, η οποία αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως multistage flash distillation. Στην μέθοδο αυτή, θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό θερμαίνεται σε σημείο λίγο χαμηλότερο από το σημείο βρασμού στην πρώτη φάση επεξεργασίας. Ακολούθως θερμαίνεται σε θερμοκρασία περίπου 90°C έως 120°C ενώ σε κάθε φάση, η πίεση είναι χαμηλότερη από την πίεση κορεσμού προκειμένου να ατμοποιείται το ζεστό νερό. Ακολούθως, καθώς τα δοχεία όπου συγκεντρώνονται οι υδρατμοί έρχονται σε επαφή με σωλήνες οι οποίοι μεταφέρουν κρύο θαλασσινό νερό και λαμβάνεται καθαρό νερό μέσα από την υγροποίηση των συμπυκνωμάτων νερού.

Η θερμοκρασία και η πίεση του νερού αυξάνονται όταν θερμαίνονται σε ένα δοχείο, με το θερμό νερό να διοχετεύεται σε ένα επόμενο δοχείο, υπό χαμηλότερη πίεση προκειμένου να διευκολυνθεί η διαδικασία της εξάτμισης. Ο ατμός που παράγεται στο πρώτο αυτό στάδιο διοχετεύεται σε ένα επόμενο δοχείο για την συλλογή καθαρού νερού, ενώ παράλληλα, το σύστημα συνεχίζει να τροφοδοτείται με θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό το οποίο διοχετεύεται το πρώτο στάδιο της διαδικασίας, ενώ σε κάθε επόμενο βαθμό επεξεργασίας η πίεση των δοχείων μειώνεται, με το τελευταίο δοχείο της διεργασίας να βρίσκεται υπό ατμοσφαιρική πίεση (Kalogirou, 2014).

Παρακάτω, στην Εικόνα 13 παρατίθεται ένα σχηματικό διάγραμμα της διεργασίας πολυβάθμιας εκτόνωσης:



**Εικόνα 13: Σχηματικό διάγραμμα διεργασίας πολυβάθμιας εκτόνωσης (Kalogirou, 2014)**

Συχνά, οι μονάδες αφαλάτωσης που βασίζονται στη διεργασία της πολυβάθμιας εκτόνωσης μπορούν να λειτουργούν κοντά σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας προκειμένου να αξιοποιείται η ενέργεια που φέρει ο ατμός.

Καθώς το καθαρό νερό παράγεται από τη διαδικασία της πολυβάθμιας εκτόνωσης μέσω αλλαγής φάσης, με τη διεργασία αυτή μπορεί να γίνει επεξεργασία υδάτων τα οποία φέρουν συγκεντρώσεις ρύπων, βαρέων μετάλλων, ελαίων, αιωρούμενων στερεών και ύδατα με μεγάλες συγκεντρώσεις οργανικών υλών. Επιπλέον, από τη διεργασία της πολυβάθμιας εκτόνωσης μπορεί να παράγεται υψηλής ποιότητας καθαρό και πόσιμο νερό (με το συνδυασμό περαιτέρω σταδίων επεξεργασίας προκειμένου να καταστεί πόσιμο), και ως εκ τούτου η διεργασία αυτή βρίσκει ιδιαίτερη εφαρμογή για την κάλυψη των αναγκών σε νερό υψηλής καθαρότητας.

Αναφορικά με τα πλεονεκτήματα της μεθόδου διακρίνονται τα παρακάτω (Burek, και συν., 2016), (El-Dessouky & Ettouney, 2002), (Kalogirou, 2014):

- είναι απλή στη λειτουργία
- δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις προεπεξεργασίας του νερού
- παράγεται υψηλής ποιότητας και καθαρότητας νερό
- μπορεί να γίνει επεξεργασία νερού με μεγάλες συγκεντρώσεις οργανικών υλών και ρύπων

- εμφανίζει χαμηλό κόστος λειτουργίας και επεξεργασίας
- μπορεί να εξακολουθεί να λειτουργεί ακόμη και αν κάποιο από τα στάδια τεθεί εκτός λειτουργίας για λόγους συντήρησης ή κατόπιν βλάβης
- δεν παράγει υγρά ή στερεά απόβλητα, απόρροια της απουσίας ιδιαίτερων απαιτήσεων προεπεξεργασίας

Στον αντίποδα και αναφορικά με τα μειονεκτήματα της πολυβάθμιας εκτόνωσης διακρίνονται τα παρακάτω (Burek, και συν., 2016), (El-Dessouky & Ettouney, 2002), (Kalogirou, 2014):

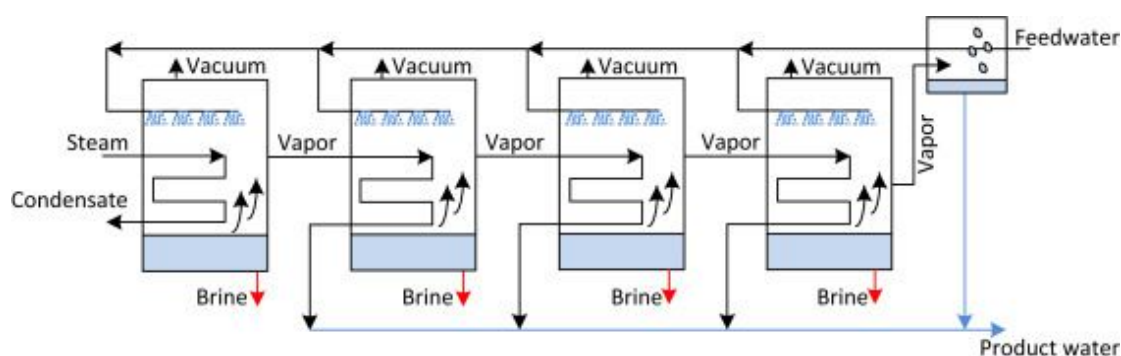
- απαιτείται περισσότερη ενέργεια από ό,τι στην εναλλακτική πλέον διαδεδομένη μέθοδο αφαλάτωσης, την αντίστροφη ώσμωση
- εκλύονται περισσότεροι αέριοι ρύποι απόρροια της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας
- δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε έντονα μεταβαλλόμενη ζήτηση νερού καθώς έχει σχετικά σταθερό ρυθμό παραγωγής πόσιμου νερού
- για την βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης απαιτείται μεγάλος αριθμός βαθμίδων – σταδίων εκτόνωσης

### 2.3.2 Πολυβάθμια εξάτμιση

Η διεργασία της πολυβάθμιας εξάτμισης ομοιάζει σημαντικά στη διεργασία της πολυβάθμιας εκτόνωσης, ενώ εντοπίζονται μικρές διαφορές. Λόγω τεχνικών δυσκολιών δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη με αποτέλεσμα, στη διεργασία της πολυβάθμιας εξάτμισης το θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό θερμαίνεται προκειμένου να εξατμιστεί και ο παραγόμενος ατμός διοχετεύεται σε σωλήνες, ενώ το κρύο θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό ψεκάζεται πάνω σε αυτούς σχηματίζοντας ένα λεπτό στρώμα νερού το οποίο εξατμίζεται αμέσως. Με τον τρόπο αυτό, ένας μέρος του παραγόμενου ατμού συμπυκνώνεται και από αυτό συλλέγεται καθαρό νερό και το υπόλοιπο μέρος συνεχίζει στην επόμενη βαθμίδα μαζί με το υπολειπόμενο θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό.

Για την παραγωγή ατμού ελέγχεται η πίεση στις βαθμίδες επεξεργασίας μέσω αντλίας κενού, με την πίεση να φτάνει σε σημείο κάτω από το σημείο κορεσμού και με την πίεση να βαίνει μειούμενη σε κάθε επόμενη βαθμίδα επεξεργασίας και να φτάνει να ισούται με την ατμοσφαιρική πίεση στην τελευταία βαθμίδα επεξεργασίας. Καθώς η πίεση στα δοχεία επεξεργασίας ρυθμίζεται επιτυγχάνεται η παραγωγή ατμού ακόμη και σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, κάτω από τους 60 °C, με αποτέλεσμα να επιμηκύνεται η διάρκεια ζωής του εξοπλισμού και να περιορίζεται η απόρριψη θερμότητας στο περιβάλλον, περιορισμός ο οποίος οδηγεί σε υψηλούς βαθμούς απόδοσης. Επιπλέον, ανάλογα με το σημείο εγκατάστασης της μονάδας αφαλάτωσης, εντοπίζονται κάθετες και οριζόντιες διατάξεις για τη συλλογή θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού.

Παρακάτω, στην Εικόνα 14 παρατίθεται το σχηματικό διάγραμμα μιας διεργασίας πολυβάθμιας εξάτμισης:



**Εικόνα 14: Σχηματικό διάγραμμα διεργασίας πολυβάθμιας εξάτμισης (Khan, Maraqa, & Mohamed, 2021)**

Αναφορικά με τα πλεονεκτήματα της διεργασίας της πολυβάθμιας εξάτμισης διακρίνονται τα παρακάτω (Khan, Danielsen, Johansen, Lorenz, Nelson, & Camper, 2014):

Τα κύρια πλεονεκτήματα της MED περιλαμβάνουν τα εξής:

- παράγεται υψηλής ποιότητας και καθαρότητας νερό
- μπορεί να γίνει επεξεργασία νερού με μεγάλες συγκεντρώσεις οργανικών υλών και ρύπων

- εκλύονται λιγότεροι ρύποι σε σχέση με την πολυβάθμια εκτόνωση καθώς η θερμοκρασία ατμοποίησης είναι χαμηλότερη
- εμφανίζει μικρότερο κόστος από την πολυβάθμια εκτόνωση χάρη στην χαμηλότερη θερμοκρασία επεξεργασίας

Στον αντίποδα, σε ό,τι αφορά στα μειονεκτήματα της διεργασίας της πολυβάθμιας εξάτμισης διακρίνονται τα παρακάτω (Khan, Danielsen, Johansen, Lorenz, Nelson, & Camper, 2014):

- εξακολουθεί να απαιτεί περισσότερη ενέργεια από τη διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης
- δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε έντονα μεταβαλλόμενη ζήτηση νερού καθώς έχει σχετικά σταθερό ρυθμό παραγωγής πόσιμου νερού
- έχει μικρότερη δυναμικότητα παραγωγής καθαρού νερού από τη διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης

### 2.3.3 Εξάτμιση μέσω συμπίεσης ατμών

Πρόκειται για μία απλούστερη μέθοδο αφαλάτωσης, συγκριτικά με τις μεθόδους πολυβάθμιας εκτόνωσης και πολυβάθμιας εξάτμισης, η οποία είναι επιπλέον πιο αποτελεσματική από τις προαναφερθείσες μεθόδους.

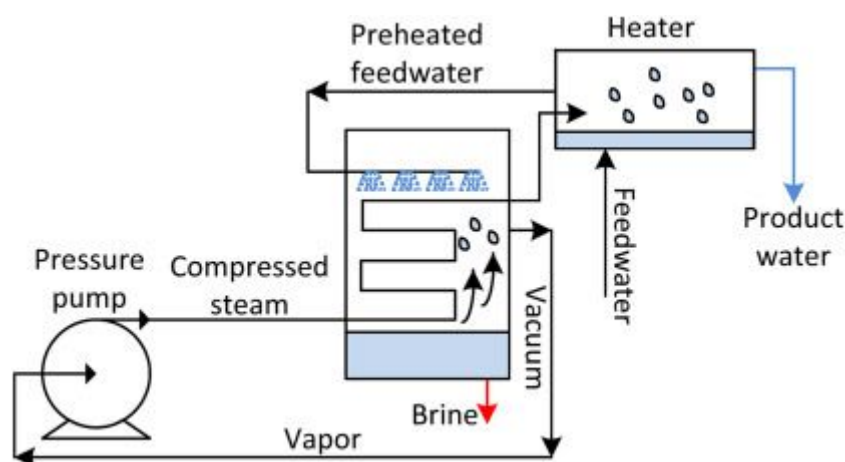
Θαλασσινό νερό ή υφάλμυρο νερό ψεκάζεται επάνω σε σωλήνες στους οποίους κυκλοφορεί ατμός. Το νερό το οποίο ψεκάζεται στην επιφάνεια των σωλήνων ζεσταίνεται και φτάνει να εξατμιστεί καθώς ο θάλαμος στον οποίο γίνεται ο ψεκασμός βρίσκεται υπό πίεση. Ακολουθώντας τη φιλοσοφία της πολυβάθμιας εξάτμισης, η αποτελεσματικότητα της διεργασίας εξάτμισης μέσω συμπίεσης ατμών βελτιώνεται όσο λεπτότερο είναι το στρώμα νερού το οποίο δημιουργείται στην επιφάνεια των σωληνώσεων ατμού. Για την παραγωγή του καθαρού νερού γίνεται συλλογή των συμπυκνωμάτων και των υδρατμών.

Δεδομένου ότι το νερό ψεκάζεται σε ένα κλειστό κύκλωμα σωληνώσεων ατμού, δεν απαιτείται μεγάλη ποσότητα ενέργειας και ειδικά δεν απαιτείται



θέρμανση του θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού, παρά μόνον ο ατμός που πληρώνει το κλειστό κύκλωμα στο οποίο ψεκάζεται το θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό. Ως εκ τούτου, η διεργασία αυτή προσφέρει μεγαλύτερη χωρητικότητα από τις δύο προηγούμενες. Επιπλέον, καθώς δεν απαιτείται μεγάλη ποσότητα ενέργειας, η εξάτμιση των υδρατμών λαμβάνει χώρα υπό χαμηλή πίεση η οποία δημιουργείται στον θάλαμο ψεκασμού και συλλογής των υδρατμών.

Παρακάτω, στην Εικόνα 15 παρατίθεται το σχηματικό διάγραμμα της διεργασίας εξάτμισης μέσω συμπίεσης ατμών (Khan, Maraqa, & Mohamed, 2021).



**Εικόνα 15: Σχηματικό διάγραμμα διεργασίας εξάτμισης μέσω συμπίεσης ατμών (Khan, Maraqa, & Mohamed, 2021)**

Λόγω του τρόπου λειτουργίας της διεργασίας εξάτμισης μέσω συμπίεσης ατμών, η διεργασία αυτή συχνά μπορεί να συνδυάζεται μαζί με τη διεργασία της πολυβάθμιας εξάτμισης, προκειμένου να εκμεταλλευτεί καλύτερα ο ατμός που κυκλοφορεί στο κύκλωμα, αλλά και με θερμοηλεκτρικές μονάδες παραγωγής ενέργειας προκειμένου να διαμοιράζεται ο ατμός.

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι για τη δημιουργία της απαραίτητης υποπίεσης απαιτούνται συμπιεστές μικρής ισχύος. Για τον λόγο αυτό, συχνά εγκαταστάσεις αφαλάτωσης βασισμένες σε αυτή τη διεργασία συναντώνται συχνά για την εξυπηρέτηση των αναγκών οικισμών ή ξενοδοχείων σε περιοχές με έντονη έλλειψη γλυκού νερού (Khan, Maraqa, & Mohamed, 2021).

Σε ό,τι αφορά στα πλεονεκτήματα της διεργασίας αφαλάτωσης μέσω συμπίεσης ατμών διακρίνονται τα παρακάτω (Khan, Maraqa, & Mohamed, 2021):

- είναι απλή
- μπορεί να συνδυάζεται με άλλες μεθόδους για τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης και την αύξηση της χωρητικότητας παραγωγής καθαρού νερού

Στον αντίποδα, σε ό,τι αφορά στα μειονεκτήματα της διεργασίας αφαλάτωσης μέσω συμπίεσης ατμών διακρίνονται τα παρακάτω (Khan, Maraqa, & Mohamed, 2021):

- δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε έντονα μεταβαλλόμενη ζήτηση νερού καθώς έχει σχετικά σταθερό ρυθμό παραγωγής πόσιμου νερού
- έχει μικρότερη δυναμικότητα παραγωγής καθαρού νερού από τη διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης

#### **2.3.4 Αφαλάτωση με χρήση απορριπτέας θερμότητας**

Η μέθοδος αυτή αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως Low Temperature Evaporation Desalination Using Waste Heat. Πρόκειται για μία μέθοδο η οποία βασίζεται στην εκμετάλλευση της απορριπτέας θερμότητας από παρακείμενες εγκαταστάσεις, όπως βιομηχανίες, θερμοηλεκτρικούς σταθμούς ή ακόμη και πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η διεργασία αυτή αποτελείται από τρία βασικά στάδια:

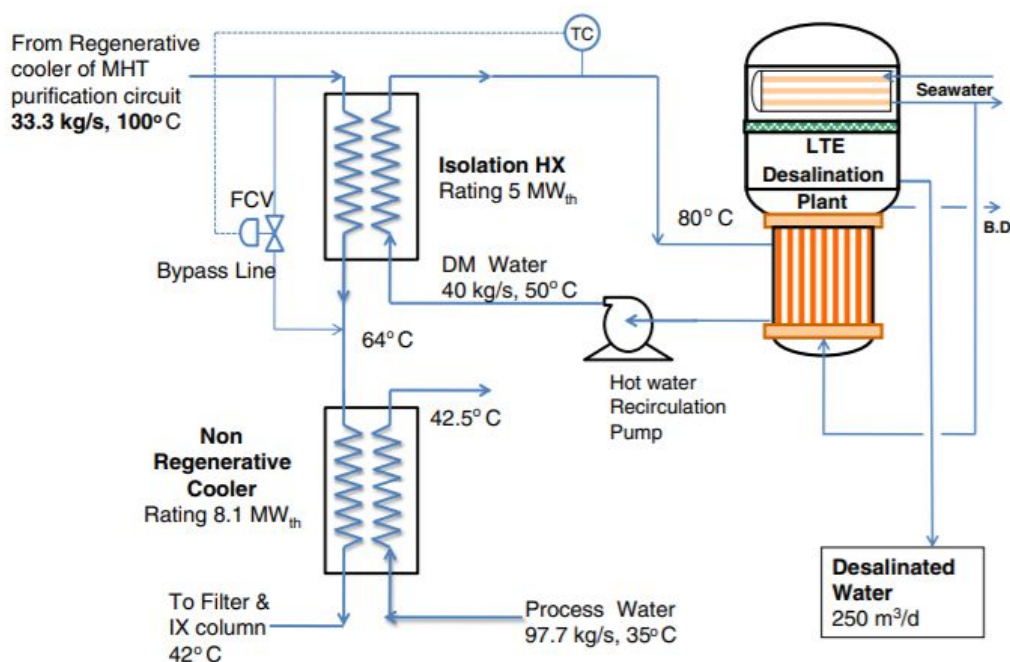
- θέρμανση
- διαχωρισμός
- συμπύκνωση

Το θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό εισέρχεται στη μονάδα αφαλάτωσης από το χαμηλότερο μέρος κάθετων σωληνώσεων και καθώς δημιουργείται εξαναγκασμένη ροή στις σωληνώσεις εξατμίζεται μέχρι να φτάσει στην κορυφή των σωληνώσεων. Ο ατμός ο οποίος δημιουργείται στα ανώτερα σημεία των κάθετων σωληνώσεων διοχετεύεται στη συνέχεια σε οριζόντιες σωληνώσεις – συλλεκτήρια συστήματα και συμπυκνώνεται καθώς οι οριζόντιες αυτές σωληνώσεις ψύχονται από το περιβάλλον κρύο θαλασσινό νερό και συλλέγεται καθαρό νερό.

Ειδικά καθώς η διεργασία αφαλάτωσης αυτή δεν απαιτεί καθόλου θερμική ενέργεια, αλλά βασίζεται στην εκμετάλλευση της θερμότητας από παρακείμενες εγκαταστάσεις, θερμότητα η οποία διαφορετικά θα απορριπτόταν στη θάλασσα, η διεργασία αυτή είναι ιδιαίτερα φιλική προς το περιβάλλον. Επιπλέον, δεν απαιτείται η προεπεξεργασία των εισερχόμενων υδάτων και ως εκ τούτου δεν προκαλείται παραγωγή λυμάτων και ρύπων.

Τελευταία, σημειώνεται ενδιαφέρον τόσο για την κατασκευή μονάδων αφαλάτωσης βασισμένων σε αυτή την τεχνολογία για την εκμετάλλευση της απορριπτόμενης θερμότητας πυρηνικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή ακόμη και για την εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας των ωκεανών (Adak & Tewari, 2014), (Tewari&Rao, 2002).

Παρακάτω, στην εικόνα παρατίθεται το σχηματικό διάγραμμα της διεργασίας αφαλάτωσης με χρήση απορριπτόμενης θερμότητας.



**Εικόνα 16: Σχηματικό διάγραμμα διεργασίας αφαλάτωσης με χρήση απορριπτέας θερμότητας (Adak & Tewari, 2014)**

Σε ό,τι αφορά στα πλεονεκτήματα της διεργασίας αφαλάτωσης με χρήση απορριπτέας θερμότητας διακρίνονται τα παρακάτω (Khan, Maraga, & Mohamed, 2021):

- πολύ φιλική προς το περιβάλλον μέθοδος αφαλάτωσης
  - δεν απαιτείται παραγωγή ενέργειας
  - μειώνεται η ποσότητα απορριπτέας θερμότητας στο φυσικό περιβάλλον, η οποία έχει αρνητικές επιπτώσεις στη χλωρίδα και την πανίδα
- το νερό που υπόκειται σε αφαλάτωση μπορεί να έχει μεγάλες συγκεντρώσεις σε οργανικές ύλες και ρύπους
- μπορεί να συνδυαστεί με άλλες υφιστάμενες εγκαταστάσεις οι οποίες απορρίπτουν θερμότητα στο περιβάλλον

Στον αντίποδα, σε ό,τι αφορά στα μειονεκτήματα της διεργασίας αφαλάτωσης με χρήση απορριπτέας θερμότητας διακρίνονται τα παρακάτω (Khan, Maraqa, & Mohamed, 2021):

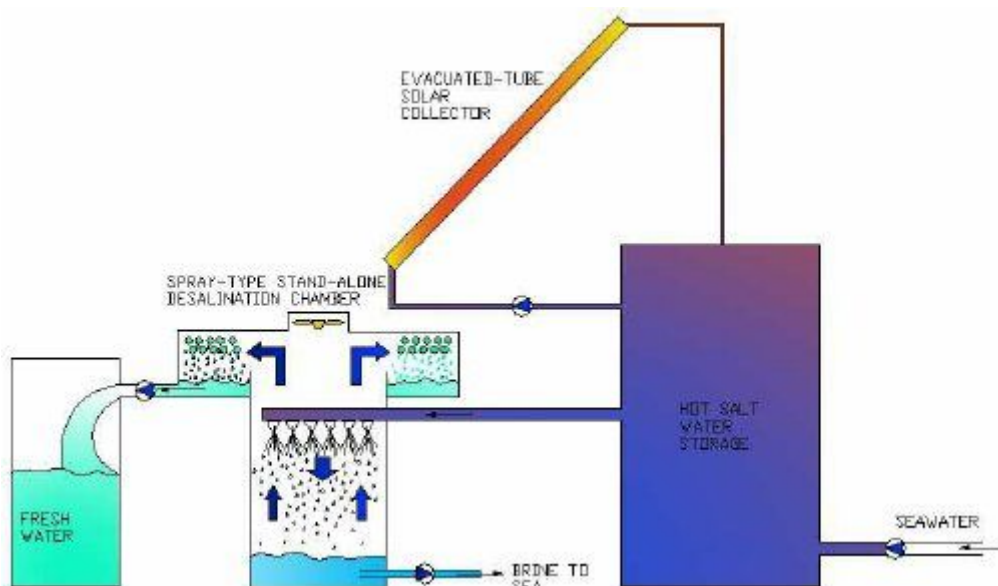
- δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε έντονα μεταβαλλόμενη ζήτηση νερού καθώς έχει σχετικά σταθερό ρυθμό παραγωγής πόσιμου νερού
- έχει μικρότερη δυναμικότητα παραγωγής καθαρού νερού από τη διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης

### **2.3.5 Ηλιακή απόσταξη**

Οι μέθοδοι ηλιακής απόσταξης ή αφαλάτωσης έχουν αρχίσει να συγκεντρώνουν ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια τόσο γιατί μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες σε καθαρό νερό τοπικών μικρών κοινωνιών όσο και στο ευρύτερο πλαίσιο βιώσιμης ανάπτυξης και βιώσιμης διαχείρισης των υδάτινων πόρων. Η ηλιακή αφαλάτωση είναι μία απλή διαδικασία, στην οποία αξιοποιείται η θερμότητα από την ηλιακή ακτινοβολία και η οποία χρησιμοποιείται για τη θέρμανση θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού το οποίο βρίσκεται σε μία γυάλινη δεξαμενή. Οι υδρατμοί που δημιουργούνται συγκεντρώνονται στην οροφή της δεξαμενής και συλλέγονται για την παραγωγή γλυκού νερού.

Η κυριότερη εφαρμογή αυτής της διεργασίας αφαλάτωσης εντοπίζεται για την κάλυψη της ζήτησης πόσιμου νερού σε σημεία όπου δεν είναι διαθέσιμο εκτεταμένο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς για την παραγωγή καθαρού νερού μέσω ηλιακής αφαλάτωσης δεν απαιτείται καθόλου ενέργεια (θερμική ή ηλεκτρική). Αν και πρόκειται για μία σαφώς απόλυτα φιλική προς το περιβάλλον μέθοδο αφαλάτωσης, εντούτοις δεν προσφέρεται για την κατασκευή μονάδων αφαλάτωσης μεγάλης κλίμακας.

Επιπλέον, δημιουργείται η ανάγκη για ερμητικό σφράγισμα του άνω μέρους της δεξαμενής προκειμένου οι παραγόμενοι υδρατμοί να εγκλωβίζονται, καθώς και συχνός καθαρισμός της δεξαμενής για την αποφυγή συγκέντρωσης φυκιών και άλγης. Παρακάτω, στην παρατίθεται το σχηματικό διάγραμμα της διεργασίας ηλιακής αφαλάτωσης:



*Εικόνα 17: Σχηματικό διάγραμμα ηλιακής αφαλάτωσης (Piccininni, et al., 2007)*

## 2.4 Μέθοδοι βασισμένες σε μεμβράνες

Οι μέθοδοι αφαλάτωσης που βασίζονται σε μεμβράνες διαχωρίζονται σε δύο μικρότερες κατηγορίες:

- διαδικασίες ηλεκτροδιάλυσης
- διαδικασίες αντίστροφης ώσμωσης

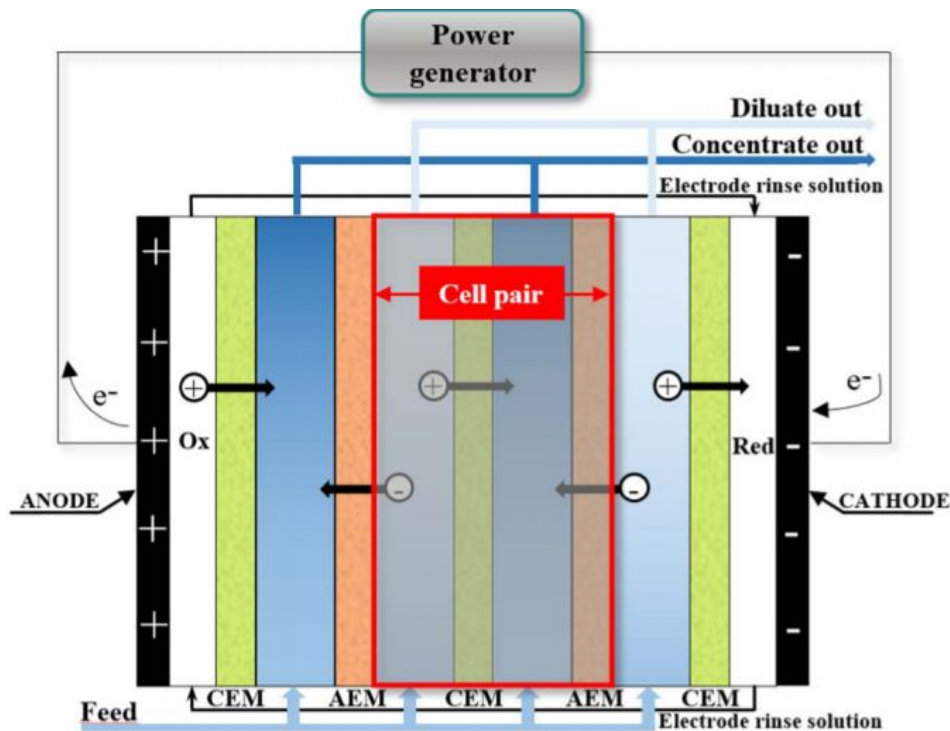
### 2.4.1 Ηλεκτρόλυση και αντίστροφη ηλεκτρόλυση

Η ηλεκτροδιάλυση ή ηλεκτρόλυση και η αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση ή αντίστροφη ηλεκτρόλυση είναι δύο διαδικασίες στις οποίες διαχωρίζεται ηλεκτροχημικά το νερό με χρήση διαπερατών ιονισμένων μεμβρανών. Οι χρησιμοποιούμενες μεμβράνες ενεργοποιούν την ανταλλαγή ιόντων μεταξύ των στοιχείων του νερού και έχουν την ικανότητα να μεταφέρουν επιλεκτικά ιόντα με θετικό ή αρνητικό φορτίο και να απορρίπτουν τα ιόντα του αντίθετου φορτίου.

Στις διαδικασίες αυτές χρησιμοποιείται ένα δοχείο στο οποίο εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση για την απομάκρυνση των αλάτων με χρήση μίας μεμβράνης, με αποτέλεσμα το προς αφαλάτωση νερό να μετατρέπεται σε καθαρό, γλυκό νερό. Οι διαδικασίες αυτές βρίσκουν ως επί το πλείστο εφαρμογή για την αφαλάτωση υφάλμυρου νερού.

Η διεργασία αυτές βασίζονται στο φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης. Με την εφαρμογή της παραπάνω αναφερόμενης ηλεκτρικής τάσης φορτίζονται οι μεμβράνες ώστε να καταφέρουν να διαχωρίσουν τα ιόντα των διαλυμένων αλάτων τα οποία βρίσκονται στο προς αφαλάτωση νερό. Καθώς οι μεμβράνες είναι φορτισμένες, έλκουν τα ιόντα του νερού τα οποία έχουν την αντίστροφη πολικότητα και παραμένει στη δεξαμενή νερό χωρίς άλατα (Campione, et al., 2018).

Οι μεμβράνες αυτές τοποθετούνται στα άκρα της δεξαμενής ηλεκτρόλυσης και σε αυτές προσκολλώνται τα ιόντα, με αποτέλεσμα στο κέντρο της δεξαμενής να απομένει νερό ελεύθερο ιόντων.



**Εικόνα 18: Σχηματικό διάγραμμα διαδικασίας ηλεκτρόλυσης (Campione, etal., 2018)**

Στην πραγματικότητα, όπως φαίνεται και παραπάνω, στην Εικόνα 18, μεμβράνες τοποθετούνται πολλές φορές επαναλαμβανόμενα μέσα στη δεξαμενή ηλεκτρόλυσης, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μία διάταξη όπου η δεξαμενή χωρίζεται σε επιμέρους κελιά εντός των οποίων συγκεντρώνεται το νερό το οποίο είναι ελεύθερο ιόντων.

Ο λόγος για τον οποίο οι μέθοδοι της ηλεκτρόλυσης και της αντίστροφης ηλεκτρόλυσης βρίσκουν ως επί το πλείστο εφαρμογή σε υφάλμυρα ύδατα είναι το γεγονός ότι η απαιτούμενη ενέργεια είναι ανάλογη της συγκέντρωσης αλάτων στο νερό, ενώ παράλληλα όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση αλάτων τόσο συχνότερα απαιτείται η αντικατάσταση των μεμβρανών.

Εναλλακτικά, για τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης της διεργασίας αυτής, είθισται να αντιστρέφεται η πολικότητα των μεμβρανών προκειμένου να αποκολληθούν από αυτές τα συγκεντρωμένα άλατα καθώς περνά φρέσκο θαλασσινό νερό από τη δεξαμενή ηλεκτρόλυσης. Στην περίπτωση αυτή αναφέρεται η διαδικασία της αντίστροφης ηλεκτρόλυσης (Campione, etal., 2018).

Και οι δύο διαδικασίες βασίζονται στις παρακάτω κοινές αρχές και παραδοχές:

- Η πλειονότητα των αλάτων τα οποία βρίσκονται διαλυμένα στο θαλασσινό και στο υφάλμυρο νερό είναι ηλεκτρικά φορτισμένα, δηλαδή είναι είτε ιόντα είτε ανιόντα
- Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του προς αφαλάτωση νερού μπορούν να κατασκευαστούν κατάλληλες μεμβράνες για την βελτίωση της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας

Σε ό,τι αφορά στα πλεονεκτήματα των διαδικασιών της ηλεκτρόλυσης και της αντίστροφης ηλεκτρόλυσης, διακρίνονται τα παρακάτω:

- Δεν υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις προεπεξεργασίας
- Η διαδικασία είναι τεχνικά απλή

Τέλος, σε ό,τι αφορά στα μειονεκτήματα των διαδικασιών της ηλεκτρόλυσης και της αντίστροφης ηλεκτρόλυσης, διακρίνονται τα παρακάτω:

- Δεν μπορούν να βρουν εφαρμογή για κατασκευή μονάδων μεγάλης κλίμακας
- Βρίσκουν εφαρμογή κυρίως για αφαλάτωση υφάλμυρου νερού
- Απαιτείται ο εκ των προτέρων προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του νερού (συγκέντρωση και είδος αλάτων)
- Η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια αυξάνει ανάλογα με τη συγκέντρωση των υδάτων σε άλατα

#### **2.4.2 Ώσμωση και αντίστροφη ώσμωση**

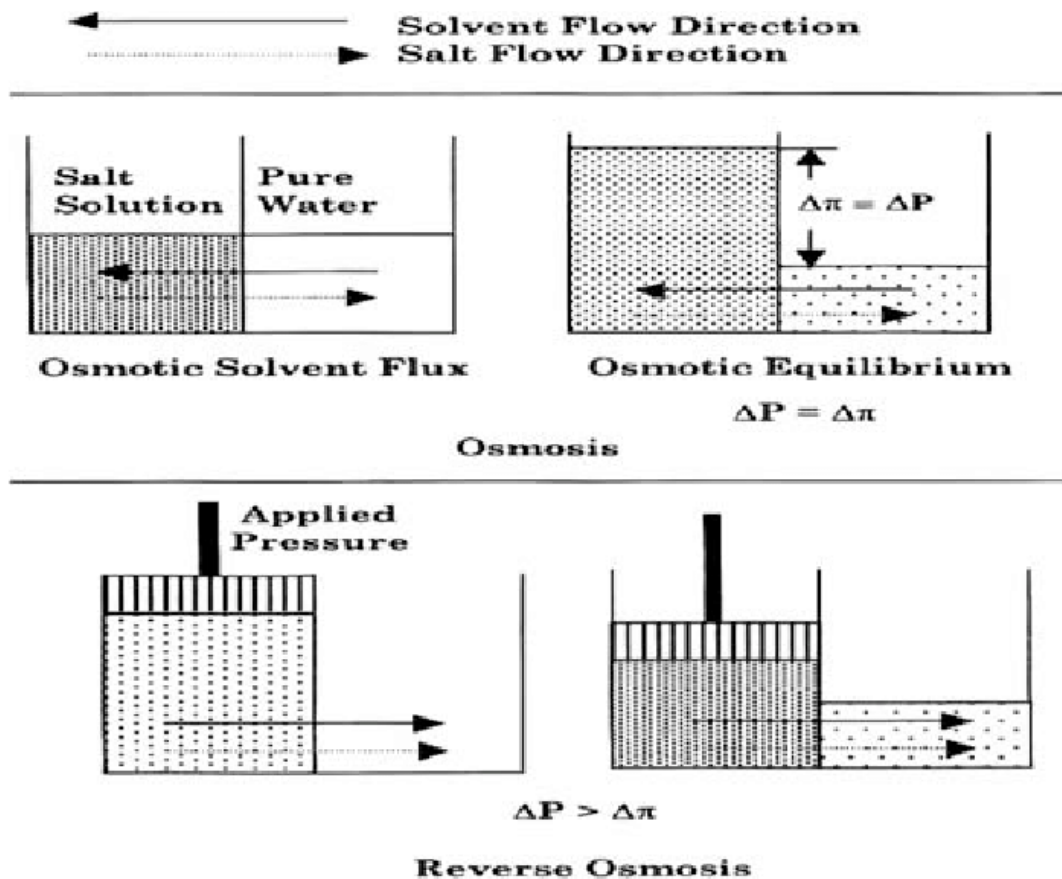
Οι διαδικασίες ώσμωσης και αντίστροφης ώσμωσης βρίσκουν ευρεία εφαρμογή, μαζί με τη διεργασία πολυβάθμιας εκτόνωσης, καθώς συγκεντρώνουν ένα σύνολο σημαντικών πλεονεκτημάτων.

Οι διαδικασίες αυτές αναπτύσσονται εκτενώς σε επόμενα κεφάλαια, ωστόσο στα πλαίσια ανασκόπησης των τεχνολογιών αφαλάτωσης αξίζει να σημειωθεί πως



βασίζονται στο φυσικό φαινόμενο της ώσμωσης. Σύμφωνα με το φαινόμενο της ώσμωσης, αν δύο δοχεία τα οποία χωρίζονται από μία πορώδη μεμβράνη έχουν ίδιο όγκο νερού, γλυκού στο ένα και αλατούχου στο άλλο, τότε μέσω του φαινομένου της ώσμωσης μετά από κάποιο χρονικό διάστημα το γλυκό νερό μετακινείται στο δοχείο με το αλατούχο νερό και αντίστροφα μέχρι να εξισωθεί η συγκέντρωση άλατος και στα δύο δοχεία. Μέσα από την εφαρμογή κατάλληλης πίεσης, το φαινόμενο αυτό μπορεί να ελεγχθεί οδηγώντας στην παραγωγή καθαρού νερού από θαλασσινό ή και υφάλμυρο νερό.

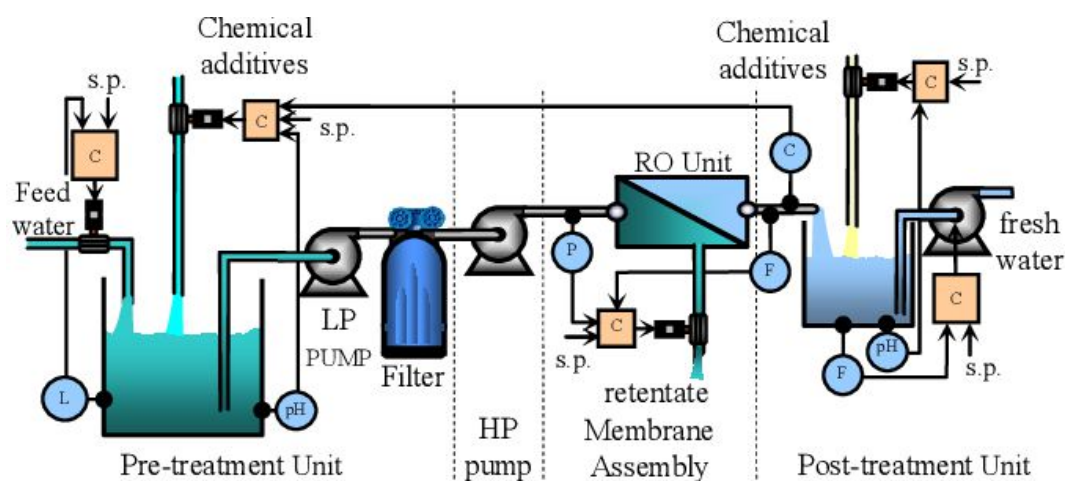
Παρακάτω, στην Εικόνα 19 παρατίθενται τα σχηματικά διαγράμματα για το φαινόμενο της ώσμωσης και για το φαινόμενο της αντίστροφης ώσμωσης, ενώ σε μεγαλύτερο βάθος οι δύο μέθοδοι εξετάζονται σε επόμενο κεφάλαιο.



**Εικόνα 19: Φαινόμενο ώσμωσης και αντίστροφης ώσμωσης (Ashraf, Maah, Qureshi, Gharibreza, & Yusoff, 2013)**

Ειδικά σε ό,τι αφορά στη διαδικασία της ώσμωσης ή forward osmosis, πρόκειται για μία σχετικά καινούρια διαδικασία, η οποία βασίζεται στο ακριβώς αντίστροφο φαινόμενο.

Παρακάτω, παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα της αφαλάτωσης μέσω αντίστροφης όσμωσης.



**Εικόνα 20: Σχηματικό διάγραμμα αφαλάτωσης μέσω αντίστροφης ώσμωσης (Gambier & Badreddin, 2009)**

Αναφορικά δε με τα πλεονεκτήματα της μεθόδου της αντίστροφης ώσμωσης διακρίνονται τα παρακάτω:

- Η καταναλισκόμενη ενέργεια είναι περιορισμένη
- Η επίδραση στο φυσικό περιβάλλον από την απόρριψη των υπολειμμάτων είναι μικρή
- Δεν σημειώνονται προβλήματα διάβρωσης αντίστοιχα με αυτά στις διαδικασίες ηλεκτροδιάλυσης και αντίστροφης ηλεκτροδιάλυσης
- Επιτυγχάνονται υψηλοί βαθμοί απόδοσης, περί το 50% για αφαλάτωση θαλασσινού νερού
- Είναι κατάλληλη για την κάλυψη ζήτησης νερού με συχνές και μεγάλες διακυμάνσεις

Αναφορικά με τα μειονεκτήματα της μεθόδου της αντίστροφης ώσμωσης διακρίνονται τα παρακάτω:

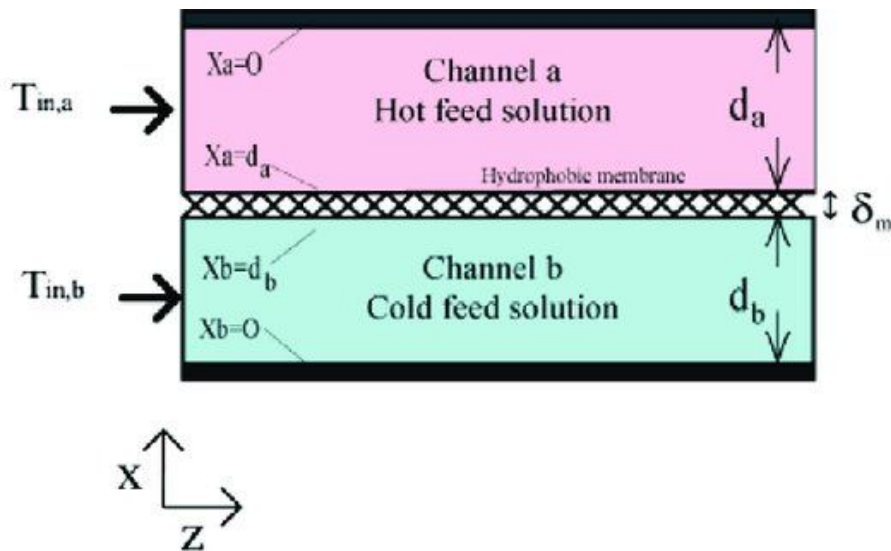
- Πρέπει να προηγείται ανάλυση του νερού προς αφαλάτωση προκειμένου το σύστημα να σχεδιάζεται κατάλληλα
- Εντοπίζεται ανάγκη για την προεπεξεργασία του νερού προκειμένου να μπορεί να εκτελείται η διαδικασία απρόσκοπτα και με υψηλούς βαθμούς απόδοσης
- Οι χρησιμοποιούμενες μεμβράνες απαιτούν συχνό καθαρισμό και συντήρηση προκειμένου να διατηρούνται υψηλοί βαθμοί απόδοσης
- Πρόκειται για μία πολύπλοκη τεχνικά διαδικασία
- Το παραγόμενο νερό δεν είναι εξίσου καθαρό σε σχέση με άλλες μεθόδους και ως εκ τούτου σημειώνονται απαιτήσεις μετά – επεξεργασίας του
- Δεν είναι δυνατή η αφαλάτωση νερού με μεγάλες συγκεντρώσεις οργανικής ύλης και άλλων ρύπων ή βαρέων μετάλλων κ.ο.κ.

#### **2.4.3 Απόσταξη μέσω μεμβρανών**

Πρόκειται για μία διαδικασία η οποία βασίζεται στον διαχωρισμό των αλάτων από το νερό με εφαρμογή μίας μεμβράνης και εκμετάλλευση της διαφοράς θερμοκρασίας του διαλύματος πριν και μετά την μεμβράνη απόσταξης. Η μέθοδος αυτή προτάθηκε αρχικά τη δεκαετία του 60' αλλά δεν βρήκε ευρεία εφαρμογή λόγω περιορισμών που αφορούν στην τεχνολογία μεμβρανών.

Βασίζεται στην ικανότητα των μεμβρανών να μην επιτρέπουν τη διέλευση των ιόντων τα οποία είναι διαλυμένα στο νερό, κατόπιν θέρμανσης του νερού μέσα από την οποία το θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό αλλάζει φάση και εξατμίζεται.

Η κίνηση του νερού μέσα από την μεμβράνη απόσταξης λαμβάνει χώρα σε τρεις ξεχωριστές φάσεις: αρχικά δημιουργείται ένα κενό στην πλευρά όπου βρίσκεται το ζεστό νερό εισόδου, έπειτα ο ατμός διέρχεται μέσα από την μεμβράνη απόσταξης και τέλος ο ατμός συμπυκνώνεται και συλλέγεται το καθαρό νερό στην έξοδο της διαδικασίας.



**Εικόνα 21:** Σχηματικό διάγραμμα διαδικασίας απόσταξης μέσω μεμβράνης (Khoukhi, Tadjine, & Boucherit, 2015)

## 2.5 Σύγκριση μεθόδων αφαλάτωσης

Τρεις καίριες παράμετροι στη βάση των οποίων αξιολογούνται οι διάφορες τεχνολογίες αφαλάτωσης είναι η χρησιμοποιούμενη ενέργεια, το κόστος, τόσο αυτό της επένδυσης όσο και αυτό της λειτουργίας, και η καθαρότητα του παραγόμενου νερού, η οποία αξιολογείται στη βάση των χρήσεων στις οποίες πρόκειται να χρησιμοποιηθεί το παραγόμενο νερό.

Πιο αναλυτικά, οι παρακάτω παράμετροι αξιολογούνται προκειμένου να επιλεγεί η πιο αποδοτική, ανά περίπτωση, μέθοδος αφαλάτωσης:

- χαρακτηριστικά νερού
- είδος νερού προς αφαλάτωση (θαλασσινό, υφάλμυρο ή λύματα)
- κόστος επένδυσης
- κόστος παραγωγής – κόστος λειτουργίας
- ενεργειακές απαιτήσεις λειτουργίας
- διαθεσιμότητα ενέργειας
- ζητούμενη ποσότητα και καθαρότητα παραγόμενου νερού

Καθώς για τις περισσότερες από τις παραπάνω μεθόδους αφαλάτωσης απαιτείται η κατανάλωση θερμικής ενέργειας, οι ενεργειακές απαιτήσεις των

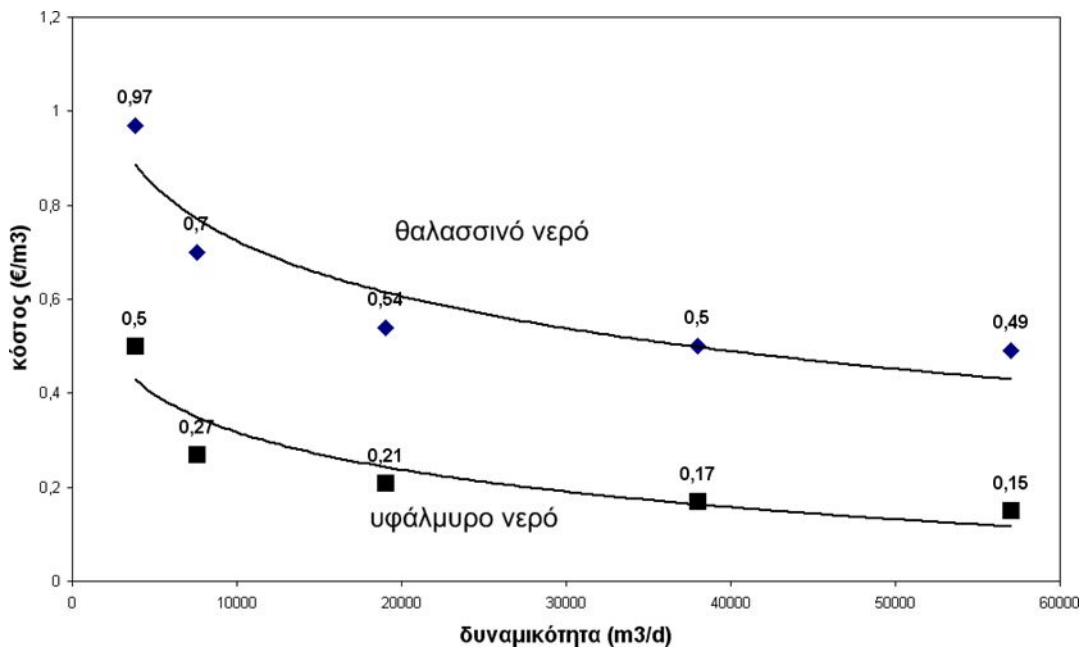
μονάδων αφαλάτωσης είναι ιδιαίτερα υψηλές και μπορούν να ξεπερνούν ακόμη και τις 20kWh ανά παραγόμενο κυβικό καθαρού νερού.

Από τις παραπάνω μεθόδους ξεχωρίζει η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης, η οποία μαζί με την μέθοδο της πολυβάθμιας εκτόνωσης αντιπροσωπεύει την πλειοψηφία του παραγόμενου από μονάδες αφαλάτωσης νερού. Μάλιστα, η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης έχει σημαντικά χαμηλό κόστος παραγωγής νερού, καθώς οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι μικρότερες από τις 10kWh ανά παραγόμενο κυβικό νερού, απαιτήσεις οι οποίες μπορούν να μειώνονται σε επίπεδα χαμηλότερα των 5kWh ανά παραγόμενο κυβικό νερού αν οι μονάδες αντίστροφης ώσμωσης συνδυάζονται με συστήματα ανάκτησης ενέργειας, τα οποία είναι ευρέως διαδεδομένα σε μονάδες αφαλάτωσης μεγάλης κλίμακας.

Επιπλέον, η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης δεν απαιτεί πολύπλοκες κατασκευές και ως εκ τούτου εμφανίζει μικρότερο κόστος επένδυσης σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες αφαλάτωσης.

Συνδυαστικά, το παραγόμενο καθαρό νερό από μονάδες αφαλάτωσης βασισμένες στην τεχνολογία της αντίστροφης ώσμωσης έχει το μικρότερο κόστος σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία αφαλάτωσης.

Επιπλέον, καθώς σημειώνονται εξελίξεις στην τεχνολογία των μεμβρανών, τόσο μειώνεται το κόστος του παραγόμενου νερού από μονάδες αντίστροφης ώσμωσης. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση το κόστος του παραγόμενου νερού εξαρτάται από το μέγεθος των μονάδων αφαλάτωσης, καθώς βρίσκουν εφαρμογή οι οικονομίες κλίμακας, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα:



**Εικόνα 22: Κόστος παραγόμενο νερού σε σχέση με τη δυναμικότητα (Μουτάφης, 2008)**

Έπειτα, όπως σχολιάζεται παρακάτω στο δέκατο κεφάλαιο, ο συνδυασμός των μονάδων αφαλάτωσης με μονάδες παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ ή με άλλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις οδηγεί σε περαιτέρω περιορισμό του κόστους του παραγόμενου νερού. Ομοίως, όπως σχολιάζεται στο ίδιο κεφάλαιο, το κόστος παραγωγής καθαρού νερού περιορίζεται όσο μειώνεται η απόσταση της μονάδας αφαλάτωσης από την πηγή παραγωγής της ενέργειας η οποία καταναλώνεται και όσο μειώνεται η απόσταση στην οποία χρησιμοποιείται το παραγόμενο καθαρό νερό.

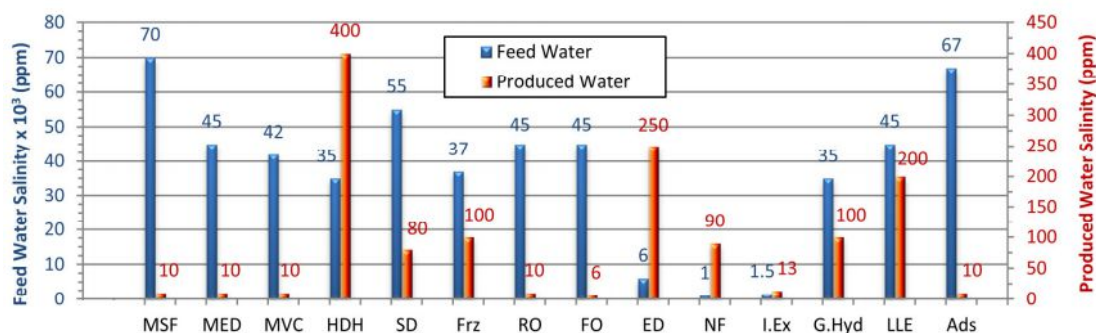
Έπειτα, αξίζει να σημειωθεί πως στα πλαίσια της αξιολόγησης των διαφόρων τεχνολογιών αφαλάτωσης εξετάζονται και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της εγκατάστασης και λειτουργίας των μονάδων αφαλάτωσης. Πιο συγκεκριμένα, οι διαφορετικές τεχνολογίες αφαλάτωσης έχουν διαφορετικής έντασης επιπτώσεις στα απορριπτόμενα ύδατα στο περιβάλλον. Ιδίως στην κατεύθυνση απομείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων απαιτείται η κατασκευή έργων τα οποία προσθέτουν σημαντικό κόστος στις μονάδες αφαλάτωσης.

Στον παρακάτω πίνακα πραγματοποιείται μία συνοπτική σύγκριση των διαφόρων μεθόδων αφαλάτωσης στη βάση των παραπάνω αναφερόμενων κριτηρίων:

**Πίνακας 1: Σύγκριση μεθόδων αφαλάτωσης (Youssef, AL-Dadah, & Mahmoud, 2014)**

Μέθοδος αφαλάτωσης	Νερό προς αφαλάτωση	Δυναμικότητα παραγωγής (m <sup>3</sup> /ημέρα)	Καταναλισκόμενη ενέργεια	Κατανάλωση ενέργειας (kWh/m <sup>3</sup> )	Κόστος λειτουργίας (€/m <sup>3</sup> /ημέρα)
Πολυβάθμια εκτόνωση	θαλασσινό	έως 60.000	θερμική και ηλεκτρική	έως 6KWh/m <sup>3</sup>	έως 2.000
Πολυβάθμια εξάτμιση	θαλασσινό	έως 20.000	θερμική και ηλεκτρική	έως 3KWh/m <sup>3</sup>	έως 1.750
Εξάτμιση μέσω συμπίεσης ατμών	θαλασσινό	έως 2.500	ηλεκτρική	έως 15KWh/m <sup>3</sup>	έως 2.350
Αντίστροφη ώσμωση θαλασσινού νερού	θαλασσινό	έως 70.000	ηλεκτρική	έως 10KWh/m <sup>3</sup> και έως 5 KWh/m <sup>31</sup>	έως 4.400
Αντίστροφη ώσμωση υφάλμυρου νερού	υφάλμυρο	έως 50.000	ηλεκτρική	έως 3KWh/m <sup>3</sup>	έως 2.000
Ηλεκτρόλυση	υφάλμυρο	έως 50.000	ηλεκτρική	έως 4KWh/m <sup>3</sup>	έως 5.000

Επιπλέον, σε ό,τι αφορά στην αλατότητα του νερού τροφοδοσίας και του παραγόμενου νερού, παρατίθεται σχετικό γράφημα παρακάτω:



**Εικόνα 23: Αλατότητα νερού τροφοδοσίας και παραγόμενου νερού από διαφορετικές τεχνολογίες αφαλάτωσης (Youssef, AL-Dadah, & Mahmoud, 2014)**

Από το παραπάνω γράφημα σημειώνεται πως η μέθοδος της πολυβάθμιας εκτόνωσης είναι αυτή με την οποία μπορεί να υποστεί επεξεργασία νερό με την μεγαλύτερη αλατότητα, ενώ το παραγόμενο νερό έχει χαμηλή αλατότητα. Επιπλέον,

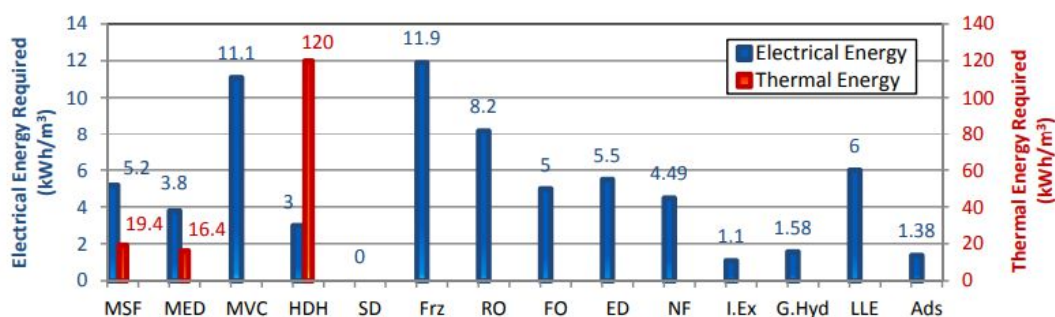
<sup>1</sup> με συνδυασμό συστημάτων ανάκτησης ενέργειας

από το παραπάνω γράφημα σημειώνεται πως η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης προσφέρεται για την αφαλάτωση νερού χαμηλότερης αλατότητας από ό,τι η μέθοδος της πολυβάθμιας εκτόνωσης, αλλά παράγει νερό χαμηλότερης αλατότητας κατά 40%.

Επιπρόσθετα, με την εγκατάσταση σταδίων προεπεξεργασίας μπορεί να αυξηθεί η αλατότητα του νερού τροφοδοσίας, προκειμένου να καταστεί εφικτή η αφαλάτωση νερού το οποίο είναι δυνατόν να υποστεί αφαλάτωση μόνον με την μέθοδο της πολυβάθμιας εκτόνωσης.

Σημειώνεται δε πως άλλες, χημικές μέθοδοι παράγουν νερό ακόμη χαμηλότερης αλατότητας, ωστόσο βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο και ως εκ τούτου δεν δύνανται να επικρατήσουν των μεθόδων της αντίστροφης ώσμωσης και της πολυβάθμιας εκτόνωσης.

Περαιτέρω, σε ό,τι αφορά στην καταναλισκόμενη ενέργεια ανά κυβικό μέτρο παραγόμενου νερού, παρατίθεται παρακάτω σχετικό γράφημα:



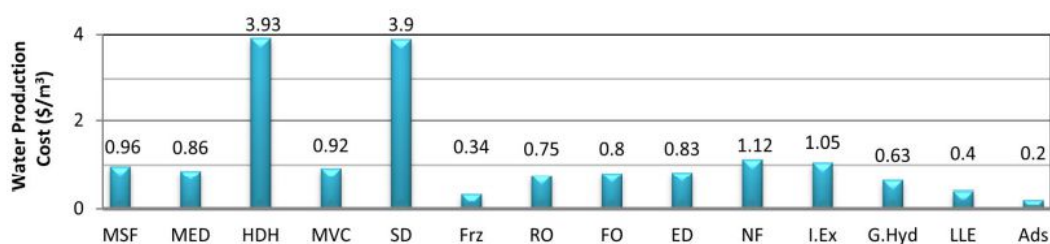
**Εικόνα 24: Καταναλισκόμενη ηλεκτρική και θερμική ενέργεια ανά κυβικό μέτρο παραγόμενου καθαρού νερού από διαφορετικές τεχνολογίες αφαλάτωσης (Youssef, AL-Dadah, & Mahmoud, 2014)**

Τα αριθμητικά δεδομένα τα οποία παρατέθηκαν στον προηγούμενο πίνακα επιβεβαιώνονται από το παραπάνω γράφημα. Η μέθοδος της πολυβάθμιας εκτόνωσης απαιτεί περί τις  $5,2\text{kWh/m}^3$  ηλεκτρική ενέργεια και περί τις  $19,4\text{kWh/m}^3$  θερμική ενέργεια. Συνολικά απαιτούνται περί τις  $25\text{kWh/m}^3$  ενέργεια συνολικά, χωρίς να γίνεται αναγωγή της θερμικής σε ηλεκτρική ενέργεια.



Αντίστοιχα, η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης απαιτεί μόλις περί τις 8,2kWh/m<sup>3</sup> ηλεκτρική ενέργειας και η μέθοδος της ώσμωσης απαιτεί περί τις 5kWh/m<sup>3</sup> ηλεκτρική ενέργεια.

Έπειτα, σε ό,τι αφορά στο κόστος ανά μονάδα παραγόμενου καθαρού νερού, παρατίθεται παρακάτω σχετικό γράφημα:



**Εικόνα 25: Κόστος παραγωγής καθαρού νερού από διαφορετικές τεχνολογίες αφαλάτωσης (Youssef, AL-Dadah, & Mahmoud, 2014)**

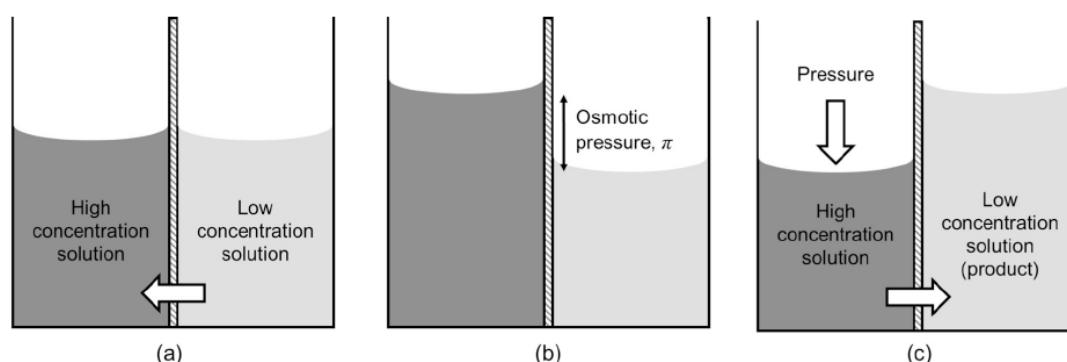
Το μέσο κόστος του παραγόμενου νερού από μονάδες βασισμένες στην τεχνολογία της αντίστροφης ώσμωσης είναι το χαμηλότερο μεταξύ των διαδομένων και ώριμων τεχνολογιών αφαλάτωσης και κυμαίνεται περί τα 0,75€ ανά παραγόμενο κυβικό μέτρο καθαρού νερού, ενώ αντίστοιχα το κόστος του νερού που παράγεται από μονάδες βασισμένες στην τεχνολογία της πολυβάθμιας εκτόνωσης κυμαίνεται περί τα 0,96 € ανά παραγόμενο κυβικό μέτρο καθαρού νερού. Το κόστος άλλων, πειραματικών τεχνολογιών όπως της προσρόφησης είναι σημαντικά χαμηλότερο, ωστόσο οι τεχνολογίες αυτές δεν είναι ακόμη αρκετά ώριμες για την ευρεία και εμπορική εφαρμογή τους.

### 3 Αντίστροφη ώσμωση – θεωρητικό υπόβαθρο και ορισμοί

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα ευρήματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης στο πεδίο της αντίστροφης ώσμωσης, η οποία εξετάζεται αναλυτικά, στο ευρύτερο πλαίσιο των τεχνολογιών αφαλάτωσης.

#### 3.1 Ώσμωση και αντίστροφη ώσμωση

Ώσμωση είναι η φυσική διαδικασία κατά την οποία τα διαλυμένα μόρια του νερού κινούνται από ένα διάλυμα χαμηλής διαλυμένης συγκέντρωσης (χαμηλή ωσμωτική πίεση) προς ένα διάλυμα υψηλής διαλυμένης συγκέντρωσης (υψηλή ωσμωτική πίεση) σε μία ημιπερατή μεμβράνη. Η ημιπερατή μεμβράνη απορρίπτει τις διαλυτές ουσίες και επιτρέπει μόνο στα μόρια του νερού να περάσουν. Η διαδικασία της ώσμωσης συνεχίζεται έως ότου επιτευχθεί μία κατάσταση ωσμωτικής ισορροπίας όπου τα χημικά δυναμικά σε όλη την μεμβράνη γίνονται ίσα. Η ροή των μορίων μπορεί να σταματήσει ή να αναστραφεί με την εφαρμογή εξωτερικής πίεσης στο διάλυμα υψηλότερης συγκέντρωσης. Στην περίπτωση που η εφαρμοζόμενη διαφορά πίεσης είναι μεγαλύτερη σε μέγεθος από τη διαφορά ωσμωτικής πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης, τα μόρια του νερού εξαναγκάζονται να ρέουν προς την αντίθετη κατεύθυνση του φυσικού φαινομένου της ώσμωσης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αντίστροφη ώσμωση (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019).



**Εικόνα 26:** Απεικόνιση ώσμωσης (a), ωσμωτικής ισορροπίας (b) και αντίστροφης ώσμωσης (c) (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019)

Η ωσμωτική πίεση συνδέεται με ιδιότητες όπως η κατάθλιψη του σημείου πήξης και η ανύψωση του σημείου βρασμού. Για ιδανικά αραιωμένα διαλύματα η ωσμωτική πίεση ( $\pi$ ) μετρημένη σε  $\text{rsia}$  μπορεί να εκτιμηθεί με την εξίσωση του VanHoff (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019):

$$\pi = C * R * T$$

Όπου: C η μοριακή συγκέντρωση μίας διαλυμένης ουσίας ( $\text{mol/L}$ ),

R η σταθερά αερίων ( $0,08206 \text{ L} * \text{atm/mol/K}$ )

T η απόλυτη θερμοκρασία (K)

Για μη ιδανικά διαλύματα ισχύει η παρακάτω λογαριθμική εξίσωση για τον υπολογισμό της ωσμωτικής πίεσης (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019):

$$\pi = - \frac{R * T}{V_1^0} * \ln (a_1)$$

Όπου:  $a_1$  η δραστικότητα του διαλύτη

$V_1^0$  είναι ο γραμμομοριακός όγκος του καθαρού διαλύτη ( $\text{L/mol}$ )

R η σταθερά αερίων ( $0,08206 \text{ L} * \text{atm/mol/K}$ )

T η απόλυτη θερμοκρασία (K)

Στην περίπτωση της αντίστροφης ώσμωσης με τροφοδοσία θαλασσινού νερού χρησιμοποιείται η ακόλουθη προσεγγιστική εξίσωση (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019):

$$\pi = 1,12 * T * \sum mi$$

Όπου:  $\pi$  ωσμωτική πίεση μετρημένη psia,

T η απόλυτη θερμοκρασία (K), και

ο όρος  $mi$  αναφέρεται στην συγκέντρωση όλων των διαλυμένων ουσιών ιονικών και μη.

Η ωσμωτική πίεση θαλασσινού νερού με αιωρούμενα στερεά 35000ppm, είναι γύρω στα 350 psi. Λόγω της μεγάλης αντίστασης της μεμβράνης η πίεση που πρέπει να ασκηθεί κατά την αντίστροφη ώσμωση είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την ωσμωτική πίεση του θαλασσινού νερού. Έτσι μπορεί να χρειαστούν ακόμη και 1500 psi πίεση για την διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019).

### 3.2 Ανάκτηση νερού κατά τη διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης

Στην συνεχή διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης το νερό τροφοδοσίας διαχωρίζεται σε 2 ρεύματα. Το πρώτο ρεύμα αποτελείται από μόρια νερού τα οποία έχουν περάσει μέσα από την ημιπερατή μεμβράνη και αποτελούν το καθαρό νερό και το προϊόν της διεργασίας. Το δεύτερο ρεύμα αποτελεί την άλμη ή το

συμπύκνωμα με αυξημένη συγκέντρωση διαλυμένων ουσιών και αποτελεί το παραπροϊόν της διεργασίας (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019).

Ανάκτηση ή μετατροπή μιας διεργασίας αντίστροφης ώσμωσης ονομάζεται το πηλίκο του κλάσματος του καθαρού νερού που παράγεται με την διεργασία, προς το κλάσμα του νερού τροφοδοσίας (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019):

$$r = \frac{Q_p}{Q_f}$$

Όπου:  $Q_p$  η παροχή καθαρού προϊόντος και

$Q_f$  η παροχή νερού τροφοδοσίας

Στα περισσότερα συστήματα η ανάκτηση κυμαίνεται από 50 ως 85% και εξαρτάται από την αλατότητα και τα χαρακτηριστικά του νερού τροφοδοσίας, τη διαμόρφωση του σχεδιασμού και την δυνατότητα απόρριψης άλμης.

Γενικότερα υψηλότερη ανάκτηση οδηγεί σε χαμηλότερο ποσότητα συμπυκνώματος που πρέπει να απορριφθεί, ωστόσο η μεγάλη ανάκτηση συνήθως συνεπάγεται χαμηλότερη ποιότητα καθαρού νερού (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019). Για τον παραπάνω λόγο η ανάκτηση αποτελεί κρίσιμη παράμετρο στον σχεδιασμό ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης.

### **3.3 Απόρριψη αλατιού και πέρασμα αλατιού**

Η διάλυση ή η απόρριψη του αλατιού (SR: SaltRejection) ορίζεται ως το ποσοστό της εισερχόμενης διαλυμένης ουσία που απορρίπτεται από τη μεμβράνη αντίστροφης ώσμωσης (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019).

$$SR = \left(1 - \frac{Cp}{Cf}\right) * 100\%$$

Όπου: Cp η συγκέντρωση του αλατιού στο προϊόν – καθαρό νερό

Cf η συγκέντρωση του αλατιού στο νερό τροφοδοσίας

Το πέρασμα αλατιού (SP: SaltPassage) είναι το ποσοστό της εισερχόμενης ουσίας η οποία διαπερνά την μεμβράνη αντίστροφης ώσμωσης και βρίσκεται στο προϊόν. Είναι δηλαδή το αντίθετο της απόρριψης αλατιού και δίνεται από τον τύπο (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019):

$$SP = 1 - SR = \left(\frac{Cp}{Cf}\right) * 100\%$$

Όπου: Cp η συγκέντρωση του αλατιού στο προϊόν – καθαρό νερό

Cf η συγκέντρωση του αλατιού στο νερό τροφοδοσίας

Η απόρριψη εξαρτάται από τον τύπο των συστατικών του νερού τροφοδοσίας, τα χαρακτηριστικά του και τον τύπο της μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης. Σε γενικές γραμμές, διαλυτά στερεά με υψηλό βαθμό διαχωρισμού και ενυδάτωσης, υψηλού μοριακού βάρους και χαμηλής πολικότητας εμφανίζουν υψηλή απόρριψη (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019).

### 3.4 Διήθημα ή ροή αλατιού (salt flux)

Το διήθημα ή η ροή νερού ( $J_w$ ) είναι ο ογκομετρικός ρυθμός ροής του διηθήματος ανά μονάδα επιφάνειας της μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης. Είναι συνήθως ανάλογη με την καθαρή κινητήρια δύναμη πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019).

Η ροή αλατιού ( $J_s$ ) είναι η ποσότητα αλατιού που διέρχεται από την επιφάνεια της μεμβράνης ανά μονάδα χρόνου και είναι ανάλογη της διαφοράς συγκέντρωσης άλατος κατά μήκος της μεμβράνης (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019).

### 3.5 Πόλωση συγκέντρωσης

Κατά τη διάρκεια της αντίστροφης ώσμωσης, υπάρχει ροή διαλυτών στερεών από το νερό τροφοδοσίας προς τη μεμβράνη. Αυτό μεγιστοποιεί τη συγκέντρωση των διαλυμένων στερεών στην επιφάνεια της μεμβράνης και κατά συνέπεια, δημιουργεί οριακό στρώμα εντός του οποίου η συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας είναι υψηλότερη από την συγκέντρωση διαλυμένης μάζας του νερού τροφοδοσίας. Η υψηλότερη συγκέντρωση διαλυμένων στερεών του οριακού στρώματος προκαλεί αντίθετη κίνηση των μορίων νερού τροφοδοσίας και τα απομακρύνει από την μεμβράνη (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019).

Η διάχυση συσσωρεύει τις διαλυμένες ουσίες στο οριακό στρώμα και στην επιφάνεια μεμβράνης. Ως αποτέλεσμα, η συγκέντρωση στερεών στην επιφάνεια της μεμβράνης ( $C_m$ ) είναι πάντα υψηλότερη από τη συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας στο νερό τροφοδοσίας ( $C_F$ ). Αυτό το φαινόμενο αποτελεί την πόλωση συγκέντρωσης (CP: Concentration Polarization).

Το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης έχει ιδιαίτερα δυσμενείς επιπτώσεις για την διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης.

Η κύρια ανεπιθύμητη ενέργεια του CP είναι η μείωση της ροής διηθήματος λόγω της αύξησης της υδραυλικής αντίστασης για τη ροή του νερού. Η ωσμωτική πίεση εντός του οριακού στρώματος αυξάνεται. Επομένως το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης συνδέεται με το γέμισμα της μεμβράνης (membrane fouling) (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019).

Επιπλέον το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης συνδέεται με την αύξηση της πιθανότητας κατακρήμνισης δισθενών ιόντων και διαλυμένων αλάτων (scaling). Ακόμη σε περίπτωση παρουσίας κολλοειδών σωματιδίων στο νερό τροφοδοσίας, σχηματίζεται στρώμα «κέικ» (cake layer) στην επιφάνεια της μεμβράνης, το οποίο ενισχύει το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης (CP).

Τα προβλήματα που επιφέρει το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης καθώς και τα υπόλοιπα προβλήματα της αντίστροφης ώσμωσης, θα αναλυθούν εκτενώς στην ενότητα επτά της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



## 4 Συστήματα μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης

Οι μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης διατίθενται στο εμπόριο στις εξής διαμορφώσεις (Spellman, 2015):

- Πλάκα και πλαίσιο (Plate and frame modules)
- Σπειροειδούς τυλίγματος (Spiral wound modules)
- Κοίλων ινών (Hollow fiber modules)
- Σωληνοειδούς διαμόρφωσης (Tubular Modules)

Κάθε διαφορετική διαμόρφωση μπορεί να βρει εφαρμογή κατά περίπτωση καθώς συγκεντρώνει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που αναλύονται εκτενώς παρακάτω. Στις παρακάτω παραγράφους πραγματοποιείται μία συνοπτική ανασκόπηση των παραπάνω διαφορετικών τύπων μεμβρανών οι οποίες βρίσκουν εφαρμογή κατά την αφαλάτωση μέσω αντίστροφης ώσμωσης.

### 4.1 Συστήματα μεμβρανών πλάκας και πλαισίου (Plate and frame modules)

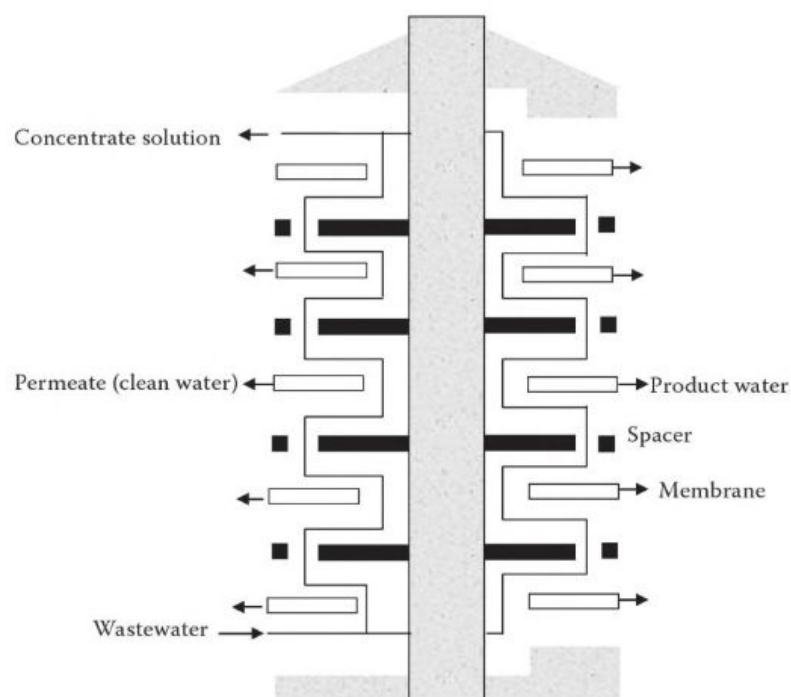
Η διαμόρφωση πλάκας και πλαισίου είναι μία από τις πρώτες τεχνολογίες αντίστροφης ώσμωσης. Χρησιμοποιούνται πλατιά φύλλα μεμβράνης τα οποία έχουν τοποθετηθεί ανάμεσα σε διαχωριστικά και υποστηρικτικά φύλλα. Τα υποστηρικτικά φύλλα διαμορφώνουν ένα κανάλι για το διερχόμενο νερό (Spellman, 2015).

Καθώς το νερό τροφοδοσίας εισέρχεται στη μονάδα από το ένα ακρομόρια νερού διαπερνούν τη μεμβράνη και συλλέγονται ως διαπεράσματα διάλυμα σε μια κεντρική πολλαπλή συλλογής διηθήματος. Η άλμη ή αλλιώς διάλυμα συμπύκνωσης αφήνει τη μονάδα από το άλλο άκρο (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019).

Λόγω της πολύ χαμηλής απαιτούμενης επιφάνειας προς όγκο η διαμόρφωση πλάκας και πλαισίου θεωρείται αναποτελεσματική και χρησιμοποιείται σπάνια σε εφαρμογές πόσιμου νερού (Spellman, 2015). Η αποδοτικότητα των μονάδων

επιηρεάζονται από τη ρύπανση λόγω της παρουσίας νεκρών ζωνών εντός των ενοτήτων (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019).

Παρόλα αυτά η τεχνολογία έχει προοπτικές ανάπτυξης λόγω της σχετικής ευκολίας καθαρισμού τους. Τα πλαίσια αφαιρούνται και πλένονται. Το γεγονός αυτό καθιστά την διαμόρφωση πλάκας πλαισίου ιδανική για νερό τροφοδοσίας με υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών. Συγκεκριμένα στην Γερμανία έχουν τεθεί σε λειτουργία προηγμένα σχέδια πλακών και πλαισίων ικανών να λειτουργούν με έως 25% αιωρούμενα στερεά και πιέσεις λειτουργίας 4500 psia (λίβρες ανά τετράγωνο) (Spellman, 2015).



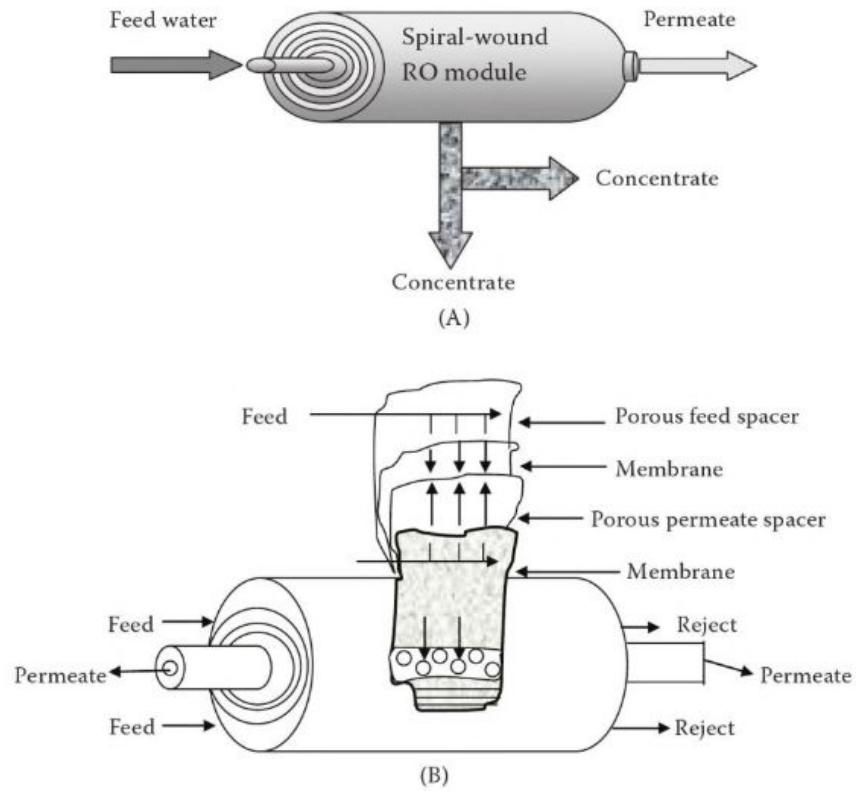
**Εικόνα 27:** Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας πλάκας και πλαισίου (Spellman, 2015)

## 4.2 Συστήματα μεμβρανών σπειροειδούς τυλίγματος (Spiral wound modules)

Οι μεμβράνες σπειροειδούς τυλίγματος αποτελούν μία αποτελεσματική διαμόρφωση ημιπερατών μεμβρανών για την απομάκρυνση διαλυμένων στερεών. Αποτελεί την πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνολογία αντίστροφης ώσμωσης

Σύμφωνα με τον Spellman, η βασική μονάδα μίας μεμβράνης σπειροειδούς τυλίγματος είναι μία διάταξη τυλιγμένων φύλλων επίπεδης μεμβράνης, που ονομάζεται φύλλο. Το φύλλο είναι τυλιγμένο γύρω από έναν κεντρικό διάτρητο σωλήνα. Ο κεντρικός διάτρητος σωλήνας μπορεί να είναι κατασκευασμένος από κεραμικό υλικό, άνθρακα, χαρτί, πλαστικό ή υαλοβάμβακα (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019).

Ένα φύλλο αποτελείται από δύο ημιπερατές μεμβράνες τοποθετημένες «πλάτη με πλάτη» και χωρίζονται μεταξύ τους με ένα διαχωριστικό ύφασμα. Μία μεμβράνη σπειροειδούς τυλίγματος 8 ιντσών αποτελείται από περίπου 20 φύλλα. Κάθε φύλλο διαχωρίζεται από τα άλλα με ένα πλέγμα, μέσω του οποίου κυκλοφορεί το νερό. Το νερό τροφοδοσίας εισέρχεται στους διαχωριστικούς διαύλους στο άκρο του σπειροειδούς σε μία διαδρομή παράλληλη προς τον κεντρικό σωλήνα. Καθώς το νερό τροφοδοσίας υπό πίεση εισέρχεται στο σωλήνα από το ένα άκρο, τα μόρια νερού διεισδύουν ακτινικά μέσω της μεμβράνης για να παράγουν το νερό του προϊόντος. Το διάλυμα συμπύκνωσης, από την άλλη πλευρά, φεύγει από το άλλο άκρο του σωλήνα (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019).



**Εικόνα 28: Α) Τομή μεμβράνης σπειροειδούς τολίγματος Β) Λεπτομερής τομή μεμβράνης σπειροειδούς τολίγματος (Spellman, 2015)**

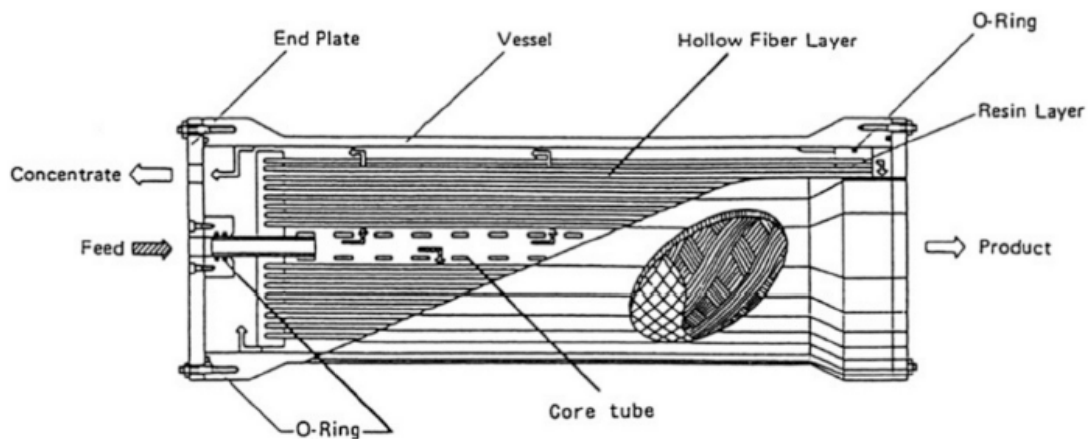
### 4.3 Συστήματα μεμβρανών κοίλων ινών (Hollow fiber modules)

Οι μεμβράνες κοίλων ινών χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές επεξεργασίας πόσιμου νερού. Ο σχηματισμός του συστήματος αποτελείται από μεμβράνες κοίλων ινών οι οποίες είναι μακριοί πολύ στενοί σωλήνες. Οι μεμβράνες κοίλων ινών περικλείονται από ένα δοχείο πίεσης και πακτώνονται στην μία άκρη.

Στην άλλη άκρη οι μεμβράνες σχηματίζουν έναν κόμβο, ο οποίος αποτρέπει την παράκαμψη της τροφοδοσίας προς την έξοδο του συμπυκνώματος. Η ενότητα περιέχει επίσης έναν πορώδη διανομέα τροφοδοσίας που τρέχει σε ολόκληρο το συνολικό μήκος της μονάδας της μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019).

Καθώς το νερό τροφοδοσίας εισέρχεται υπό πίεση στη μονάδα, διηθείται μέσω των μεμβρανών κοίλων ινών. Το καθαρό νερό εξέρχεται από την άλλη πλευρά του σωλήνα. Το συμπύκνωμα εξέρχεται από την ίδια πλευρά με αυτή του νερού τροφοδοσίας.

Οι μεμβράνες κοίλων ινών είναι φθηνές και παρουσιάζουν μεγάλη πυκνότητα και ανάκτηση. Είναι όμως επιρρεπείς στο γέμισμα (fouling) και καθαρίζονται πολύ δύσκολα (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019).



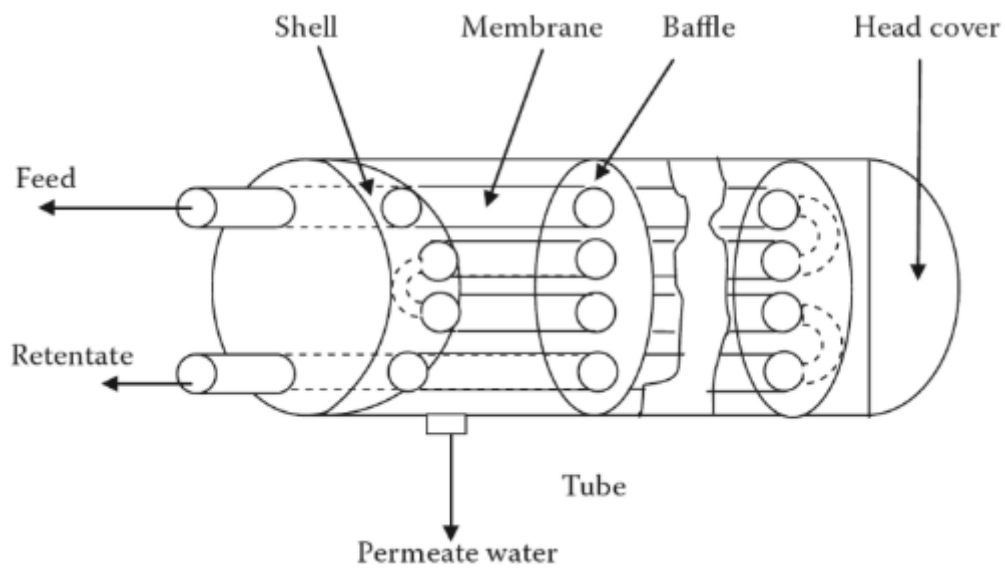
**Εικόνα 29: Τομή τυπικής μεμβράνης κοίλων ινών (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019)**

#### 4.4 Συστήματα μεμβρανών σωληνοειδούς διαμόρφωσης

Οι σωληνοειδείς μονάδες είναι μια μεγαλύτερη και πιο άκαμπτη μορφή μεμβρανών κοίλων ινών (Spellman, 2015). Μία τυπική μεμβράνη σωληνοειδούς διαμόρφωσης, αποτελείται από έναν πορώδη σωλήνα ο οποίος επικαλύπτεται από μεμβράνη αντίστροφης ώσμωσης. Οι σωλήνες είναι κατασκευασμένοι από κεραμικό, άνθρακα, χαρτί, πλαστικό ή υαλοβάμβακα. Το νερό τροφοδοσίας εισέρχεται υπό πίεση στο σωλήνα από το ένα άκρο. Τα μόρια του νερού διηθούνται και εξέρχονται από τον διάτρητο σωλήνα. Το συμπύκνωμα εξέρχεται από την ίδια πλευρά του σωλήνα από την οποία εισέρχεται το νερό τροφοδοσίας, όμοια με τις μεμβράνες κοίλων ινών.

Στο εσωτερικό της μεμβράνης βρίσκεται η ενεργή στοιβάδα χάρη στην οποία καθίσταται εφικτή η διήθηση του νερού τροφοδοσίας, ενώ σημειώνεται πως λόγω της σωληνοειδούς διαμόρφωσης, ο λόγος της επιφάνειας προς τον όγκο της διάταξης είναι μικρός. Ως εκ τούτου, ομοίως με τις μεμβράνες διάταξης πλάκας – πλαισίου, οι μεμβράνες σωληνοειδούς διαμόρφωσης δεν βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλης κλίμακας μονάδες καθώς δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές (Spellman, 2015).

Τα μειονεκτήματα του συστήματος είναι το υψηλό κόστος ενέργειας για την μεταφορά μεγάλου όγκου νερού υπό πίεση προς τις μεμβράνες για επεξεργασία, υψηλό κόστος αγοράς καθώς και η χαμηλή ικανότητα διήθησης ανά μονάδα (Spellman, 2015).



**Εικόνα 30: Τομή μεμβράνης σωληνοειδούς διαμόρφωσης (Spellman, 2015)**

## 4.5 Χαρακτηρισμός των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης

Ο χαρακτηρισμός των μεμβρανών RO είναι σημαντικός στην κατανόηση της δομής της μεμβράνης, τη μορφολογία, τη χημική σύνθεση και τις φυσικοχημικές ιδιότητες.

Ο χαρακτηρισμός των μεμβρανών παίζει κρίσιμο ρόλο στην επιλογή μεμβράνης, την κατασκευή μεμβρανών και τον σχεδιασμό νέων υλικών μεμβρανών.

### 4.5.1 Μέγεθος πόρων

Ο κλασικός τρόπος χαρακτηρισμού μιας μεμβράνης είναι να προσδιοριστεί μέγεθος πόρων και κατανομή μεγέθους πόρων (PSD). Οι μεμβράνες RO έχουν εγγενώς μικρό μέσο ακτινών πόρων (0,2-1 nm). Συνήθως, για RO μεμβράνη, το μέγεθος των πόρων και το PSD προσδιορίζονται έμμεσα μέσω μεθόδου μεταφοράς διαλυμένης ουσίας χρησιμοποιώντας δεδομένα διαχωρισμού των διαλυμένων ουσιών αναφοράς. Επίσης, η εξάρτηση της ροής της μεμβράνης από την πίεση μπορεί να είναι χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό χαρακτηριστικών παραμέτρων που μπορεί να σχετίζονται με το PSD. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μικροσκόπιο ατομικής δύναμης (AFM) για να ληφθούν πληροφορίες σχετικά με τους πόρους στην επιφάνεια της μεμβράνης. Ο ελεύθερος όγκος ή οι ανοιχτές κοιλότητες στη μεμβράνη μπορεί να χαρακτηρίζεται από σκέδαση ακτινών X μικρής γωνίας (SAXS) και μικροσκοπικό τεχνικές σκέδασης νετρονίων (SANS) (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019).

### 4.5.2 Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές για τη μελέτη των φυσικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας της μεμβράνης. Η σάρωση ηλεκτρικής μικροσκοπίας (SEM) είναι ευρέως χρησιμοποιείται για την απεικόνιση και τη μελέτη της μορφολογίας της μεμβράνης εξετάζοντας και μεγεθύνοντας τα ανώτερα στρώματα και τις διατομές χρησιμοποιώντας υψηλής ποιότητας και εικόνες υψηλής ανάλυση.



Η ηλεκτρονική μικροσκοπία μετάδοσης(TEM) μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να χαρακτηρίσει τη μορφολογία, κρυσταλλική δομή και στοιχειακές πληροφορίες της μεμβράνης και λήψη 3Dεικόνες της δομής της μεμβράνης. Το AFM αντιπροσωπεύει ένα άλλο σημαντική μικροσκοπική τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση ποσοτικών ανοκλίμακες μετρήσεις της πλευρικής και κάθετης μορφολογίας και τρισδιάστατες εικόνες υψηλής ανάλυσης της τοπογραφικής επιφάνειας της μεμβράνης (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019).

## 5 Προβλήματα της τεχνολογίας αντίστροφης ώσμωσης

Μολονότι η αντίστροφη ώσμωση αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για την αντιμετώπιση του προβλήματος της έλλειψης υδάτινων πόρων, το κόστος εφαρμογής της αποτελεί τροχοπέδη στην εξάπλωσή της. Το κόστος συνδέεται κυρίως με την απαίτηση προσφοράς ενέργειας που απαιτείται και δευτερευόντως με το πρόβλημα της πλήρωσης των πόρων των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης (fouling). Η πλήρωση των πόρων των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης είναι ένα σύνθετο πρόβλημα, το οποίο συνίσταται από τη συσσώρευση σωματιδίων και οργανικών ουσιών από το θαλασσινό νερό, καθώς και την ανάπτυξη βιομάζας στους πόρους της μεμβράνης.'

Η πλήρωση των πόρων των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης (fouling), μπορεί να διαχωριστεί σε πλήρωση της επιφανείας των μεμβρανών (surface fouling) και εσωτερική πλήρωση (internal fouling). Η επιφανειακή πλήρωση είναι συχνότερη αλλά είναι ευκολότερα αντιμετωπίσιμη, μέσω της βελτίωσης του νερού τροφοδοσίας και του χημικού καθαρισμού.

Η πλήρωση των πόρων των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης μπορεί να ταξινομηθεί και ανάλογα με το αίτιο δημιουργίας του φαινομένου σε βιο-πλήρωση (bio-fouling), οργανική πλήρωση (organic fouling), ανόργανη πλήρωση (inorganic fouling) και κολλοειδής πλήρωση (colloidal fouling).

### 5.1 Βιο-πλήρωση (bio-fouling)

Η βιοπλήρωση αναγνωρίζεται ως υπεύθυνη για το πρόβλημα της ρύπανσης των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης σε ποσοστό μεγαλύτερο του 45% του συνόλου των δράσεων ρύπανσής τους. Η βιοπλήρωση (Biofouling) είναι η διαδικασία προσκόλλησης και πολλαπλασιασμού μικροοργανισμών στην επιφάνεια της μεμβράνης. Με άλλα λόγια, είναι ο σχηματισμός του βιοφίλμ, σε τέτοιο βαθμό που θα μπορούσε να προκαλέσει τεράστιο λειτουργικό κόστος. Ο σχηματισμός βιοφίλμ είναι αναπόφευκτος στην διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης (Creber, etal., 2010).

Η βιοσύνδεση είναι πιο περίπλοκη από άλλους τύπους ρύπανσης. Υπάρχουν δύο κύρια συστατικά των βιοφίλμ, τα βακτήρια και οι πολυμερείς εξωκυτταρικές ουσίες (EPS) που εκκρίνονται από βακτήρια κατά τη διάρκεια του μεταβολισμού τους (Yu, et al., 2016)

Στο θαλάσσιο περιβάλλον, η βακτηριακή κοινότητα είναι πολύ διαφορετική και διακριτή, με πρωτεοβακτήρια, βακτηριοειδέτες, στερεοποιητικά και κυανοβακτήρια να είναι οι κύριοι τύποι βακτηρίων (Belila, et al., 2016), (Khan, Danielsen, Johansen, Lorenz, Nelson, & Camper, 2014). Ανάλογα με το διαφορετικό περιβάλλον των υδάτων και κοινότητα βακτηρίων, οι πολυμερείς εξωκυτταρικές ουσίες (EPS) θα μπορούσαν να έχει διάφορες ουσίες, αλλά αποτελούνται κυρίως από πολυσακχαρίτες, πρωτεΐνες, γλυκοπρωτεΐνες, λιποπρωτεΐνες ή λιπίδια και νουκλεϊκά οξέα (Drews, 2010), (Matin, et al., 2011), (She, et al., 2012).

Η ανάπτυξη βιοφίλμ θα μπορούσε σύντομα να διαιρεθεί σε τρεις φάσεις όσον αφορά τη δραστηριότητα και την κινητικότητα των βακτηρίων. Οι τρεις φάσεις είναι προσκόλληση βακτηρίων, αναπαραγωγή και αποκόλληση.

Η προσκόλληση βακτηρίων είναι μια δυναμική διαδικασία που αποτελείται από βακτήρια τα οποία πλησιάζουν και στη συνέχεια προσκολλώνται στην επιφάνεια της μεμβράνης. Η προσκόλληση βακτηρίων είναι το πιο σημαντικό στάδιο στο σχηματισμό βιοφίλμ. Η ύπαρξη της ζώνης νεκρής ή χαμηλής ροής στο σύστημα σωλήνων θα μπορούσε να έχει σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη βακτηρίων. Πολλοί άλλοι παράγοντες θα μπορούσαν επίσης να επηρεάσουν αυτή η διαδικασία, και αυτοί οι παράγοντες θα μπορούσαν να ταξινομηθούν σε μικροβιακές ιδιότητες (Camesano & Logan, 1998), (Tang, Hu, Sun,, Sun, Shi, & Crittenden, 2016), χαρακτηριστικά επιφανείας μεμβράνης (Nguyen, et al., 2016), και αλληλεπιδράσεις επιφανειακών βακτηρίων (Kang, Subramani, Hoek, Deshusses, & Matsumoto, 2004), (Walker, et al., 2007) καθώς και λειτουργικές συνθήκες (Habimana, et al., 2014).

Οι ιδιότητες περιλαμβάνουν την υδροφοβικότητα, το επιφανειακό φορτίο, την επιφανειακή δομή κ.λπ. Τα χαρακτηριστικά της μεμβράνης περιλαμβάνουν την υδροφοβία της επιφάνειας, επιφανειακό φορτίο, χημικές συνθέσεις, τραχύτητα,

επιφανειακή μορφολογία κ.λπ. Οι συνθήκες λειτουργίας περιλαμβάνουν ροή διαπέρασης, ταχύτητα εγκάρσιας ροής, θερμοκρασία, πίεση, pH, συγκέντρωση άλατος, παρουσία ορισμένων μορίων, feedspacer κ.λπ.

Το επόμενο στάδιο είναι η αναπαραγωγή βακτηρίων. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, οι προσκολλημένοι μικροοργανισμοί καταναλώνουν θρεπτικά συστατικά στο νερό και πολλαπλασιάζονται. Κατά τον μεταβολισμό των βακτηρίων εκκρίνονται EPS (Matin, Khan, Zaidi, & Boyce, 2011). Το EPS κάνει τη δομή του βιοφίλμ ισχυρότερη, καθιστώντας πιο δύσκολο τον καθαρισμό του βιοφίλμ (Ben-Dov, et al., 2015), (Leterme, Le Lan, Hemraj, & Ellis, 2016). Επίσης, το EPS λειτουργεί ως φράγμα για την προστασία των βακτηρίων από βακτηριοκτόνα (Belila, και συν., 2016). Το τελικό στάδιο είναι η αποκόλληση των βακτηρίων και κατά τη διάρκεια αυτή την περίοδο τα βακτήρια αφήνουν το βιοφίλμ λόγω της έλλειψης θρεπτικών ουσιών και η αύξησης της πυκνότητας του πληθυσμού τοπικά καθώς και λόγω των τυρβωδών δυνάμεων της ροής. Τα βακτήρια βρίσκουν νέες θέσεις για να αναπτυχθούν και η διαδικασία επαναλαμβάνεται και νέες μορφές βιοφίλμ. Το βιολογικό πέπλο είναι πιο δύσκολο να ελεγχθεί σε σύγκριση με το προηγούμενο στάδιο (Creber, Pintelon, von der Schulenburg, Vrouwenvelde, van Loosdrecht, & Johns, 2010).

Η βιοπλήρωση των μεμβρανών θεωρείται η μεγαλύτερη απειλή για την διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης καθώς είναι δύσκολο να εξαλειφθεί με την προ επεξεργασία. Ακόμη και αν η προ επεξεργασία εξουδετερώνει το μεγαλύτερο μέρος των μικροοργανισμών, οι υπόλοιποι θα μπορούν σταδιακά να πολλαπλασιαστούν και να σχηματίσουν το βιοφίλμ, παρουσία θρεπτικών ουσιών. Επομένως η προσπάθεια κατά την προ επεξεργασία επικεντρώνεται στην εξάλειψη θρεπτικών ουσιών (Jiang, et al., 2017).

Οι Weinrich et al. (2016) διερεύνησαν τη σχέση μεταξύ του ρυθμού ρύπανσης της μεμβράνης και το περιεχόμενο του αφομοιώσιμου οργανικού άνθρακα (θρεπτικά συστατικά βακτηρίων). Σταθμίζοντας διάφορους παράγοντες όπως διαφορετικές πιέσεις λειτουργίας και ροής διηθήματος κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η βιοπλήρωση της μεμβράνης είναι σημαντικά υψηλότερη όταν το επίπεδο θρεπτικών ουσιών ήταν υψηλότερο (Weinrich, LeChevallier, & Haas, 2016).

## 5.2 Οργανική πλήρωση (organic fouling)

Η οργανική ρύπανση είναι συνέπεια της οργανικής ύλης (OM) που υπάρχει στο νερό τροφοδοσίας. Συνήθως, το OM μπορεί να ταξινομηθεί ως: (i) αλλοθόνη φυσική οργανική ύλη (NOM) που αποτελείται από χουμικές ουσίες (χουμικά οξέα, φουλβικά οξέα και χουμίνη) οι οποίες προέρχονται από φυτικά και ζωικά υπολείμματα, (ii) αυτόχθονες ή οργανικές ύλες φυκών (AOM) που αποτελούνται από εξωκυτταρικά και ενδοκυτταρικά μακρομόρια και κυτταρικά συντρίμια, και (iii) οργανική ύλη λυμάτων λυμάτων (EfOM) (πολυσακχαρίτες, πρωτεΐνες, ένζυμα, νουκλεϊκά οξέα, αντιβιοτικά και στεροειδή) που αποτελούνται από αλλόθονη φυσική οργανική ύλη NOM στην οποία προστίθεται διαλυτά μικροβιακά προϊόντα (SMPs), τα οποία προέρχονται από βιολογική επεξεργασία λυμάτων. Η οργανική ρύπανση είναι δύσκολα αντιμετωπίσιμη στην αφαλάτωση RO, καθώς η συμβατική προεπεξεργασία δεν μπορεί να διασφαλίσει την πλήρη κατάργηση του NOM στη ροή. Σαν αποτέλεσμα, η οργανική ρύπανση OM είναι πανταχού παρούσα στο νερό τροφοδοσίας των μεμβρανών RO (Qasim, et al., 2019).

Η οργανική ρύπανση επηρεάζεται από τη χημεία του νερού τροφοδοσίας, τις ιδιότητες της μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης, αλληλεπιδράσεις foulant-membrane, αλληλεπιδράσεις foulant- foulant, υδροδυναμικές συνθήκες λειτουργίας και χαρακτηριστικά NOM όπως μοριακό μέγεθος των παραγώγων του μεταβολισμού των μικροοργανισμών και υδροφιλία.

Το οργανικό δυναμικό ρύπανσης του νερού τροφοδοσίας RO μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τυπικές διαδικτυακές τεχνικές, όπως οργανικά και διαλυμένα οργανικά άνθρακα (TOC και DOC) και υπεριώδης ακτινοβολία στα 254 nm (UV254) και άλλες εξελιγμένες τεχνικές όπως υγρή χρωματογραφία-οργανική ανίχνευση άνθρακα (LC-OCD) και εκπομπές διέγερσης φθορισμού μήτρα (F-EEM)

## 5.3 Ανόργανη πλήρωση - κλιμάκωση (inorganic fouling)

Η ανόργανη κλιμάκωση είναι η εναπόθεση ανόργανων ουσιών στην επιφάνεια της μεμβράνης ή μέσα στους πόρους της μεμβράνης

(Henthorne&Boysen, 2015), (Sanmartino, Khayet, & García-Payo, 2016). Καθώς η συγκέντρωση ορισμένων ιόντων στο νερό είναι αρκετά υψηλή, όταν υπερβαίνουν το προϊόν διαλυτότητας ισορροπίας και γίνονται υπερκορεσμένα, εναποτίθενται στην επιφάνεια ή στους πόρους της μεμβράνης, με αποτέλεσμα την κλιμάκωση (Jiang, Li, & Ladewig, 2017).

Η ανόργανη ρύπανση - κλιμάκωση προκαλείται από ανόργανες ενώσεις όπως το θειικό ασβέστιο, ανθρακικό ασβέστιο, φωσφορικό ασβέστιο, θειικό βάριο, και διοξείδιο του πυριτίου τα οποία περιέχονται στο νερό τροφοδοσίας. Είναι ένα περίπλοκο φαινόμενο αποτελούμενο από μηχανισμούς κρυστάλλωσης και μεταφοράς. Η κρυστάλλωση συμβαίνει όταν η δραστηριότητα ιόντων υπερβαίνει το όριο κορεσμού με αποτέλεσμα να σχηματίζεται ένα υπερκορεσμένο διάλυμα τροφοδοσίας. Ανόργανη ρύπανση λόγω κρυστάλλωσης μπορεί να συμβεί με δύο τρόπους: χύδην (ομογενής) κρυστάλλωση και επιφανειακή (ετερογενής) κρυστάλλωση.

Η επιφανειακή κρυστάλλωση αναφέρεται στην πλευρική ανάπτυξη κρυστάλλων στην επιφάνεια της μεμβράνης. Η μαζική κρυστάλλωση, από την άλλη πλευρά, περιλαμβάνει εναπόθεση κρυστάλλων στην επιφάνεια της μεμβράνης, αφού σχηματιστούν τα κρυσταλλικά σωματίδια στο μαζική φάση μέσω ομοιογενούς κρυστάλλωσης. Το υπερκορεσμένο διάλυμα προκαλεί συσσωμάτωση ιόντων σχηματισμού κλίμακας, λόγω τυχαίων συγκρούσεων μεταξύ των ιόντων σε κίνηση. Το σύμπλεγμα ιόντων συνδυάζεται για να σχηματιστεί ένα κρύσταλλο και μόλις μεγαλώσει πάνω από ένα κρίσιμο μέγεθος, συμβαίνει καθίζηση.

Η ανόργανη ρύπανση επηρεάζεται από έναν αριθμό φυσικών και χημικών παραμέτρων όπως η τραχύτητα της επιφάνειας της μεμβράνης και η υδροφιλία, η διάτμηση ή το σύρσιμο στην επιφάνεια της μεμβράνης, η ενδομεμβρανική πίεση, επιφανειακές και χύδην θερμοκρασίες, η χημική σύσταση του διαλύματος τροφοδοσίας και μέγεθος και συγκέντρωση σωματιδίων (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019).

## 5.4 Κολλοειδής πλήρωση (colloidal fouling)

Τα κολλοειδή (σωματίδια) είναι λεπτά αιωρούμενα σωματίδια με μέγεθος που κυμαίνεται από λίγα νανόμετρα έως μικρόμετρα. Συνήθως, τα κολλοειδή μπορούν να ταξινομηθούν σε: (1) στερεά ( $> 100 \mu\text{m}$ ), (2) υπερ-κολλοειδή στερεά ( $1 \mu\text{m}$  έως  $100 \mu\text{m}$ ), (3) κολλοειδή στερεά ( $10 \text{ \AA}$  έως  $1 \mu\text{m}$ ) και (4) διαλυμένα στερεά ( $<10 \text{ \AA}$ ). Ο. Εναλλακτικά, τα κολλοειδή μπορούν να ταξινομηθούν ως ανόργανα ή οργανικά κολλοειδή. Τα ανόργανα κολλοειδή στο νερό τροφοδοσίας περιλαμβάνουν αργιλικά πυριτικά μέταλλα, λάσπη, κολλοειδές διοξείδιο του πυριτίου, θείο, καταβυθισμένο προϊόντα σιδήρου και διάβρωσης [145,147]. Τα οργανικά κολλοειδή, από την άλλη πλευρά, περιλαμβάνουν πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, βιο-κολλοειδή, λίπη, έλαια, επιφανειοδραστικά και λιπαντικά. Κατά τη διάρκεια της κολλοειδούς ρύπανσης, τα κολλοειδή που υπάρχουν στην τροφοδοσία, οδηγούνται στην επιφάνεια της μεμβράνης ως αποτέλεσμα της ροής διηθήματος με αποτέλεσμα σχηματισμό ενός κέικ στρώματος. Το στρώμα κέικ εμποδίζει την οπίσθια διάχυση των αλάτων και, κατά συνέπεια, αυξάνει τη συγκέντρωση άλατος κοντά στην επιφάνεια της μεμβράνης. Αυτό το φαινόμενο CEOP σε συνδυασμό με τον σχηματισμό στρώματος κέικ προκαλεί σημαντική μείωση της ροής του διηθήματος. Η κολλοειδής ρύπανση επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά κολλοειδούς όπως το μέγεθος, το σχήμα και το φορτίο ως καθώς και τη χημεία του διαλύματος τροφοδοσίας (pH, ιονική ισχύς και ιονικές αλληλεπιδράσεις) [151]. Γενικά, τα μικρά κολλοειδή είναι πιο προβληματικά από τα μεγάλα κολλοειδή, καθώς μπορούν εύκολα να αφαιρεθούν με αντίστροφη έκπλυση. Η κολλοειδής ρύπανση εξαρτάται επίσης από τις ιδιότητες της μεμβράνης. Μεμβράνες με λεία, πιο υδρόφιλη και χαμηλής φόρτισης επιφάνεια είναι λιγότερο ευαίσθητες σε κολλοειδή ρύπανση. Επιπλέον, κολλοειδής ρύπανση πραγματοποιείται από τις υδροδυναμικές συνθήκες όπως ως ταχύτητα ροής και διασταυρούμενης ροής. Υψηλή ροή και χαμηλή ταχύτητα εγκάρσιας ροής τείνουν να αυξάνουν τη σοβαρότητα της κολλοειδούς ρύπανσης

Η πλήρωση των πόρων οδηγεί στην ανάγκη για αύξηση της εφαρμοζόμενης πίεσης για την εφαρμογή της μεθόδου, άρα και αύξηση της απαιτούμενης

ενέργειας. Επιπροσθέτως, συνδέεται με την κατανάλωση χημικών για την προεπεξεργασία και τον καθαρισμό των μεμβρανών.



## **6 Τεχνολογίες προ επεξεργασίας του νερού τροφοδοσίας για τις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης**

Η προ επεξεργασία του νερού τροφοδοσίας των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική προστασία των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης από το φαινόμενο της πλήρωσης των πόρων των μεμβρανών. Η προ επεξεργασία συνήθως περιλαμβάνει μια μορφή διήθησης και άλλες φυσικό-χημικές διεργασίες για την αφαίρεση των αιωρούμενων στερεών (σωματίδια, λάσπη, φύκια, οργανικά κ.λπ.), λάδι και γράσο από το νερό τροφοδοσίας. Η προ επεξεργασία γενικά κατηγοριοποιείται ως πρωτογενής προ επεξεργασία, που αποτελείται από κροκίδωση σε συνδυασμό με μια διαδικασία απομάκρυνσης αιωρούμενων στερεών όπως καθίζηση ή επίπλωση διαλυμένου αέρα (DAF). Και δευτερεύουσα προ επεξεργασία, που αποτελείται από μια διαδικασία διήθησης. Η δευτερεύουσα προ επεξεργασία ταξινομείται ως συμβατική όταν εφαρμόζονται κοκκώδη φίλτρα (GMF) και προχωρημένη όταν εφαρμόζονται μεμβράνες μικροδιήθησης MF και υπερδιήθησης UF (Villacorte, 2014).

### **6.1 Συστήματα πρόσληψης νερού τροφοδοσίας**

Το σύστημα πρόσληψης θα έχει σημαντική επίδραση στην ποιότητα θαλασσινού νερού που εισέρχεται στη μονάδα αφαλάτωσης SWRO και επομένως υπαγορεύει τον σχεδιασμό του συστήματος προ επεξεργασίας. Οι περισσότερες από τις υφιστάμενες μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού λαμβάνουν νερό τροφοδοσίας από την επιφάνειά της θάλασσας. Αυτό σημαίνει ότι η προ επεξεργασία του νερού της εγκατάστασης να είναι αντιμέτωπη με διάφορες μορφές νερού τροφοδοσίας, το οποίο καλείται να μετατρέψει σε νερό κατάλληλο για αντίστροφη ώσμωση. Τα τελευταία χρόνια πολλές μονάδες χρησιμοποιούν συστήματα πρόσληψης νερού υποστρώματος. Ο σχεδιασμός αυτός έχει σαν αποτέλεσμα την βελτίωση της ποιότητας του εισερχόμενου θαλασσινού νερού και την μείωση της πολυπλοκότητας των συστημάτων προ επεξεργασίας (Villacorte, 2014).

Τα συστήματα πρόσληψης υποστρώματος είναι «πηγάδια» τα οποία είναι εγκατεστημένα στην ακτή ή στον βυθό και εκμεταλλεύονται τις φυσικές γεωλογικές ιδιότητες του εδάφους για το φιλτράρισμα του νερού πρόσληψης. Το θαλασσινό νερό ταξιδεύει αργά μέσω στρώσεων ιζημάτων, άμμου και πετρωμάτων, παρέχοντας διήθηση και πιθανώς βιολογική επεξεργασία πριν εισέλθουν στο εργοστάσιο αντίστροφης ώσμωσης. Με αυτόν τον τρόπο απομακρύνονται πολλά από τα αιωρούμενα στερεά, άλγη, βακτήρια, διαλυμένος οργανικός άνθρακας πριν εισέλθουν στην εγκατάσταση (Villacorte, 2014).

## 6.2 Απολύμανση

Η απολύμανση είναι μια σημαντικό στάδιο της προ επεξεργασίας, επειδή καταστρέφει μικροοργανισμούς που μπορούν όχι μόνο να προκαλέσουν ασθένειες αλλά και να σχηματίσουν βιοφίλμ στις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης. Η απολύμανση συνήθως επιτυγχάνεται με την προσθήκη διαλύματος χλωρίου ή όζοντος στο νερό τροφοδοσίας. Είναι σημαντικό να απομακρύνονται τα υπολείμματα της απολύμανσης στα επόμενα στάδια (πχ υπολειμματικό χλώριο).

## 6.3 Κροκίδωση - καθίζηση

Η κροκίδωση εφαρμόζεται σε συμβατικά συστήματα προ επεξεργασίας δηλαδή κροκίδωση, καθίζηση, επίπλευση. Η κροκίδωση είναι η διαδικασία αποσταθεροποίησης των αιωρούμενων στερεών και τον σχηματισμό κροκίδων. Η κροκίδωση επιτυγχάνεται μέσω της προσθήκης κροκιδωτικών στο νερό τροφοδοσίας. Το κύριο κροκιδωτικό που χρησιμοποιείται για την προ επεξεργασία θαλασσινού νερού είναι ο χλωριούχος σίδηρος. Ακολούθως το νερό και το μείγμα αναμειγνύονται. Η ταχύτητα και ο χρόνος ανάμιξης είναι βασικές παράμετροι σχεδιασμού (Villacorte, 2014).

Αμέσως επόμενο στάδιο μετά την κροκίδωση είναι η καθίζηση. Το νερό τροφοδοσίας μετά την ανάμιξή του με τα κροκιδωτικά εισέρχεται στις λεκάνες καθίζησης, προκειμένου να καθιζάνουν οι κροκίδες που σχηματίστηκαν και να απομακρυνθούν. Η μέση ημερήσια θολότητα του νερού τροφοδοσίας φτάνει τα 30

NTU. Ο σχεδιασμός των λεκανών καθίζησης γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε το νερό που εξέρχεται από την καθίζηση να φτάσει τα 2 NTU (Villacorte, 2014).

Η καθίζηση – κροκίδωση μπορεί να γίνει εναλλακτικά με σύστημα διαλυμένης επίπλευσης αέρα (DAF). Βασικό πλεονέκτημα της εναλλακτικής αυτής μεθόδου είναι η μείωση της απαιτούμενης ποσότητας κροκιδωτικών, για την επίτευξη της απαιτούμενης θολότητας στο νερό τροφοδοσίας (Jiang, 2017).

#### **6.4 Κοκκώδης διήθηση**

Η κοκκώδης διήθηση μέσων είναι η διαδικασία αφαίρεσης αιωρούμενων στερεών, μικροοργανισμών και άλλων μολυσματικών παραγόντων όταν το νερό διέρχεται από πορώδη κοκκώδη μέσα. Τα πορώδη κοκκώδη μέσα μπορούν να είναι η άμμος, ο ανθρακίτης, ο ενεργός άνθρακας (Jiang, 2017). Η άμμος και ο ανθρακίτης (μερικές φορές χρησιμοποιείται γρανάτης) εφαρμόζεται σε συμβατικά συστήματα προ επεξεργασίας, σε βαρύτητα ή υπό πίεση. Κλίνες φίλτρου άμμου και ανθρακίτη (0,8–1,2 mm / 2–3 mm) είναι ανώτερες από τη διήθηση μεμονωμένων μέσων (όπως ο ενεργός άνθρακας) διότι παρέχουν υψηλότερους ρυθμούς διήθησης, μεγαλύτερες διαδρομές και απαιτούν λιγότερο νερό απόπλυσης (Villacorte, 2015).

#### **6.5 Μembrάνες μικροδιήθησης MF και υπερδιήθησης UF**

Οι μεμβράνες μικροδιήθησης MF και υπερδιήθησης UF χρησιμοποιούνται για το φιλτράρισμα του νερού τροφοδοσίας πριν μπει στις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης. Συγκρατούν μεγάλο μέρος των σωματιδίων που περιέχονται στο νερό της τροφοδοσίας, πολλές φορές μάλιστα φτάνουν το 100% (Jiang, 2017), μειώνοντας το φορτίο προς τις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης. Οφέλη προκύπτουν και ως προς την παρεμπόδιση σχηματισμού βιοφίλμ στις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης. Με την μείωση του φορτίου στις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης, η αφαλάτωση γίνεται οικονομικά ελκυστικότερη.

## 7 Οικονομική ανάλυση αφαλάτωσης μέσω αντίστροφης ώσμωσης

Το βασικό μειονέκτημα των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης, ως μεθόδου παροχής πόσιμου νερού είναι το κόστος. Το κόστος μάλιστα συνδέεται και με την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων, γεγονός το οποίο αυξάνει την έκλυση αερίων του θερμοκηπίου (GHG- green house gases) στην ατμόσφαιρα.

Με την πάροδο του χρόνου το κόστος παραγωγής πόσιμου νερού μέσω μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης μειώνεται. Ενδεικτικά το κόστος παραγωγής νερού μέσω αντίστροφης ώσμωσης το 1998 ήταν 2€/m<sup>3</sup>, ενώ το 2004 ήταν 0,5€/m<sup>3</sup> (Qasim, Badrelzaman, Darwish, Darwish, & Hilal, 2019).

Η ραγδαία μείωση του κόστους οφείλεται σε βελτιώσεις στην διαδικασία της αφαλάτωσης καθώς και σε νέες τεχνολογίες μεμβρανών. Αναλυτικότερα βελτιώθηκε η απόδοση της ανάκτησης ενέργειας, αυξήθηκε η ροή, αναπτύχθηκαν μεμβράνες με τεχνολογία μειωμένου γεμίματος και υψηλής απόρριψης βορίου. Το κόστος παραγωγής νερού μέσω αντίστροφης ώσμωσης σε μικρή κλίμακα παραμένει υψηλό φτάνοντας τα 16€/m<sup>3</sup> παραγόμενου πόσιμου νερού (Quasim, 2019).

Το μεγαλύτερο μέρος του κόστους μίας εγκατάστασης αντίστροφης ώσμωσης, αφορά την κατανάλωση ενέργειας. Σύμφωνα με τον Quasim, η κατανάλωση ενέργειας αφορά κατά περίπου 71% στην διαδικασία διήθησης από μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης, 10,8% προ επεξεργασία, 5% παροχή επεξεργασμένου νερού, 5,3% για την άντληση νερού τροφοδοσίας και 7,6% για λοιπές εγκαταστάσεις.

Το κόστος ενέργειας για την διήθηση μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης ανέρχεται σε 2,5 με 4kWh/m<sup>3</sup>, ανάλογα με την εφαρμοζόμενη τεχνολογία της εγκατάστασης. Παρότι το κόστος βαίνει μειούμενο με τα χρόνια, δεν μπορεί να ξεπεράσει το 1,1 kWh/ m<sup>3</sup>, λόγω της ωσμωτικής πίεσης του νερού. Το γεγονός αυτό καθιστά απαραίτητη την χρήση υβριδικών συστημάτων, τα οποία χρησιμοποιώντας τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθιστούν βιώσιμη την αφαλάτωση μέσω αντίστροφης ώσμωσης.

Σύμφωνα με τους Ebrahim και Abdel-Jawad (1994) και με τους Sarai Atab et al. (2016) το κόστος της παραγωγής καθαρού νερού μέσω αντίστροφης ώσμωσης παραμένει χαμηλότερο από αυτό της παραγωγής καθαρού νερού μέσω πολυβάθμιας εκτόνωσης για διάφορους λόγους, αλλά ως επί το πλείστον χάρη στις οικονομίες κλίμακας, καθώς όπως προαναφέρεται οι μονάδες αντίστροφης ώσμωσης είναι κατά κανόνα μεγαλύτερης κλίμακας (Ebrahim & Abdel-Jawad, 1994), (Atab, Smallbone, & Roskilly, 2016).

Το κόστος των μονάδων αφαλάτωσης και επαγόμενα το κόστος της παραγωγής καθαρού νερού, τόσο αυτών που βασίζονται στην αντίστροφη ώσμωση όσο και σε άλλες τεχνολογίες, αποτελείται από το κόστος επένδυσης όσο και από το κόστος λειτουργίας (Jaber & Ahmed, 2004). Επιπλέον, σημειώνεται ότι το κόστος των μονάδων αφαλάτωσης διαφοροποιείται σημαντικά ανά χώρα και περιοχή, τόσο εξαιτίας της διαφορετικής τεχνογνωσίας όσο και των διαφορετικών χαρακτηριστικών του νερού τροφοδοσίας, τα οποία αλλάζουν ανά περιοχή (Loutatidou, Chalermthai, Marpu, & Arafat, 2014).

Παρακάτω αναφέρονται οι κύριοι παράγοντες οι οποίοι εξετάζονται κατά την οικονομική μελέτη και κατά την οικονομική ανάλυση των μονάδων αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης και οι οποίοι συνθέτουν το αρχικό κόστος επένδυσης και το κόστος λειτουργίας, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Karagiannis & Soldatos, 2008):

**Πίνακας 2: Συνιστώσες κόστους αρχικής επένδυσης και λειτουργίας για μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης (Ebrahim & Abdel-Jawad, 1994), (Karagiannis & Soldatos, 2008)**

<b>Αρχικό κόστος επένδυσης</b>	<b>Κόστος λειτουργίας</b>
Κατασκευές και διαμορφώσεις χώρου εγκατάστασης	Ενέργεια
Κατασκευές κτηρίων επεξεργασίας και βοηθητικών κτηρίων	Προσωπικό
Κατασκευές για την είσοδο του νερού τροφοδοσίας	Φίλτρα
Σωληνώσεις	Μεμβράνες
Κατασκευές σταδίων προεπεξεργασίας	Λοιπά αναλώσιμα
Προμήθεια και εγκατάσταση αντλιών και αντλιών υψηλής πίεσης	Αποσβέσεις
Προμήθεια και εγκατάσταση δοχείων, σταδίων αντίστροφης ώσμωσης, φίλτρων και μεμβρανών	
Κατασκευές για την απόρριψη αποβλήτων (άλμης)	
Κατασκευή δικτύου αποθήκευσης και διασύνδεσης της εξόδου της μονάδας με το δίκτυο στο οποίο διοχετεύεται το παραγόμενο νερό	

Το κόστος κεφαλαίου όπως προαναφέρεται ποικίλει ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης, τη δυναμικότητα της μονάδας και άλλους παράγοντες. Η ενέργεια αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος του λειτουργικού κόστους των μονάδων, ενώ όπως έχει αναφερθεί σε διάφορα σημεία της παρούσης, ο συνδυασμός των μονάδων αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης με συστήματα ανάκτησης ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας, η οποία μπορεί μάλιστα να περιοριστεί στο ένα τρίτο της αντίστοιχης απαίτησης ενέργειας μίας μονάδας αφαλάτωσης βασισμένης στην τεχνολογία της πολυβάθμιας εκτόνωσης (Ebrahim & Abdel-Jawad, 1994).

Μάλιστα, όσο αυξάνεται η δυναμικότητα της μελετώμενης μονάδας, τόσο μειώνεται τόσο το λειτουργικό κόστος, όσο και επιμέρους η ζήτηση ενέργειας και αντίστοιχα αυξάνεται το όφελος από την εγκατάσταση συστημάτων ανάκτησης ενέργειας. Επιπλέον, η εγκατάσταση αντλιών με υψηλότερους βαθμούς απόδοσης μπορεί ομοίως να οδηγήσει σε μείωση της απαιτούμενης ενέργειας σε μονάδες αντίστροφης ώσμωσης.

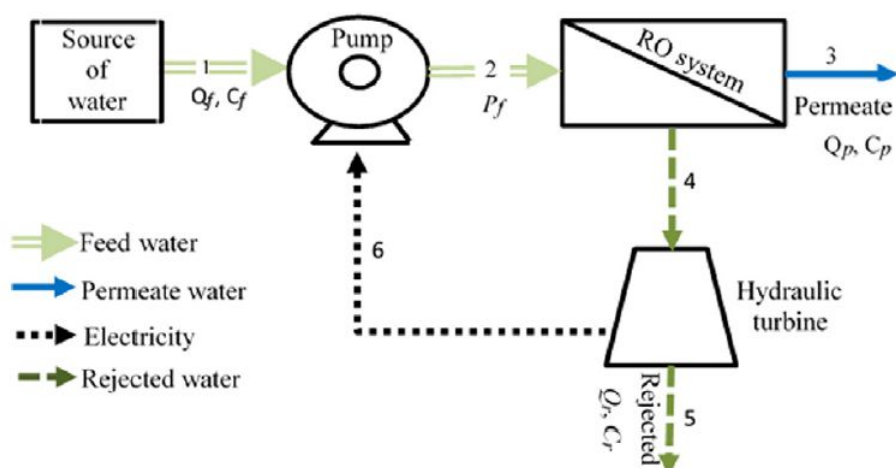
Έπειτα, αξίζει να σημειωθεί πως ένα σημαντικό μέρος του λειτουργικού κόστους προέρχεται όχι μόνον από την ανάγκη αρχικής τοποθέτησης, αλλά και από την ανάγκη περιοδική αναπλήρωσης ή αντικατάστασης χημικών ουσιών, δοχείων, φίλτρων και άλλων διαφόρων αναλωσίμων, ανάλογα με τα στάδια προεπεξεργασίας τα οποία διαθέτει η μελετώμενη μονάδα καθώς και ανάλογα με τη δυναμικότητα της μελετώμενης μονάδας και ανάλογα με το είδος και με τα χαρακτηριστικά του νερού τροφοδοσίας.

Στα παραπάνω πλαίσια, το θαλασσινό νερό δεν απαιτεί συνήθως πολύπλοκα και δαπανηρά συστήματα προεπεξεργασίας, ενώ ειδικά στην περίπτωση όπου το νερό τροφοδοσίας προέρχεται από επιφανειακά ύδατα, υφάλμυρο νερό ή λύματα, τότε το παραπάνω κόστος αυξάνεται σημαντικά, καθώς αυξάνονται σημαντικά οι απαιτούμενες χημικές ουσίες, τα φίλτρα κ.ο.κ..

Έπειτα, σημαντική συνιστώσα του λειτουργικού κόστους μονάδων αντίστροφης ώσμωσης αποτελούν οι μεμβράνες, οι οποίες πρέπει να αντικαθίστανται σε τακτά χρονικά διαστήματα προκειμένου να διατηρείται υψηλός

ο βαθμός απόδοσης της μονάδας αντίστροφης ώσμωσης. Η περιοδικότητα αντικατάστασης των μεμβρανών εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι κατασκευαστικοί παράγοντες που αφορούν στις ίδιες τις μεμβράνες, τα χαρακτηριστικά του νερού τροφοδοσίας, τα χαρακτηριστικά του νερού μετά τα στάδια προεπεξεργασίας, ο τρόπος λειτουργίας της μονάδας, η δυναμικότητα της μονάδας κ.ο.κ.. Σημειώνεται πως η αντικατάσταση των μεμβρανών δεν οδηγεί σε παύση της λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης, καθώς οι μονάδες αντίστροφης ώσμωσης αποτελούνται από ένα πλήθος δοχείων και σταδίων αφαλάτωσης.

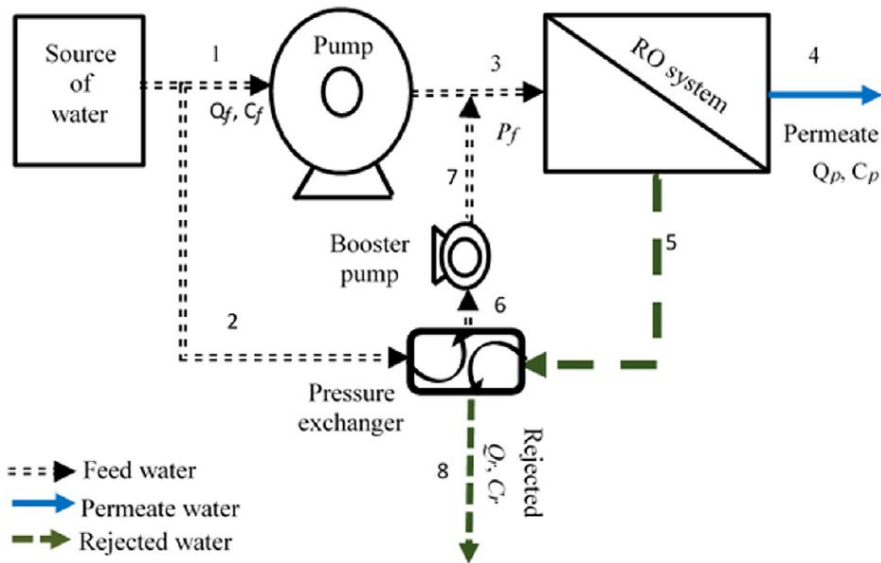
Παρακάτω παρατίθενται δύο εποπτικά διαγράμματα όπου απεικονίζεται μία μονάδα αφαλάτωσης, μέσω αντίστροφης ώσμωσης, σε συνδυασμό με διαφορετικά συστήματα ανάκτησης ενέργειας, τα οποία όπως προαναφέρεται είναι κομβικά για τον σημαντικό περιορισμό της απαιτούμενης ενέργειας και συνεπώς για τον περιορισμό του λειτουργικού κόστους:



**Εικόνα 31: Εποπτικό διάγραμμα μονάδας αντίστροφης ώσμωσης με σύστημα ανάκτησης ενέργειας μέσω υδροστροβίλου**

Στο παραπάνω μοντέλο, το σύστημα ανάκτησης ενέργειας αποτελείται από υδροστρόβιλο, τεχνολογία η οποία είναι ευρέως διαδεδομένη στις μονάδες αφαλάτωσης στην Ελλάδα, π.χ. στη Σύρο (Kartalidis, Tzen, Kampragkou, & Assimacopoulos, 2016).

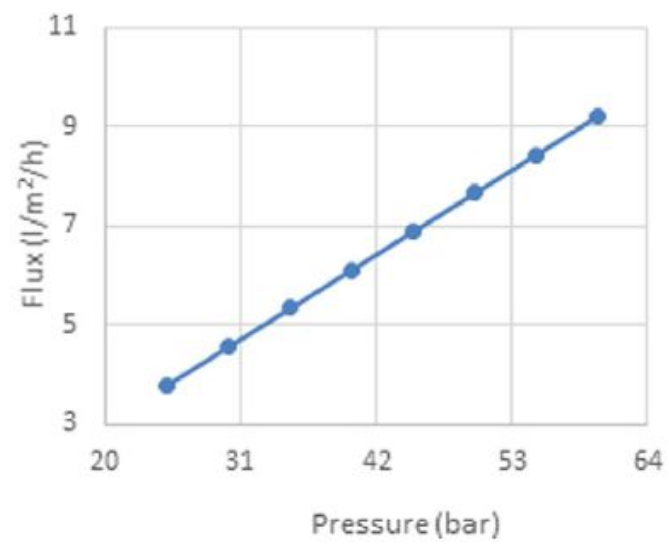




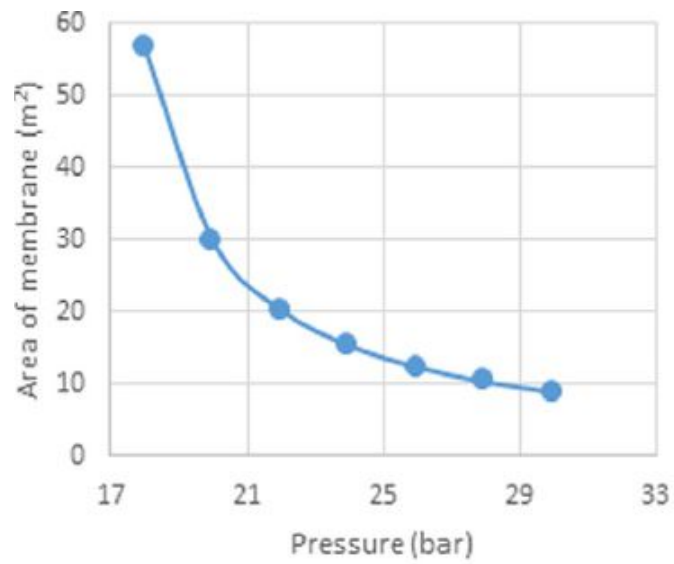
**Εικόνα 32: Εποπτικό διάγραμμα μονάδας αντίστροφης ώσμωσης με σύστημα ανάκτησης ενέργειας εναλλάκτη πίεσης**

Στο παραπάνω μοντέλο, το σύστημα ανάκτησης ενέργειας αποτελείται από εναλλάκτη πίεσης, τεχνολογία η οποία έχει ξεκινήσει να εφαρμόζεται σταδιακά και στην Ελλάδα, όπου εντοπίζεται μία αντίστοιχη μονάδα στη Σύρο (Kartalidis, Tzen, Kampragkou, & Assimacopoulos, 2016).

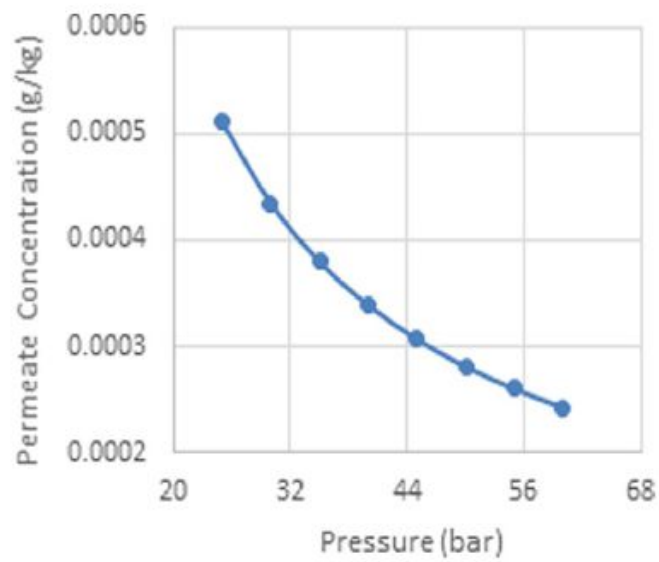
Παρακάτω παρατίθενται και συζητούνται τα αποτελέσματα προσομοίωσης και μελέτης για μία μονάδα αφαλάτωσης, αντίστροφης ώσμωσης (Atab, Smallbone, & Roskilly, 2016):



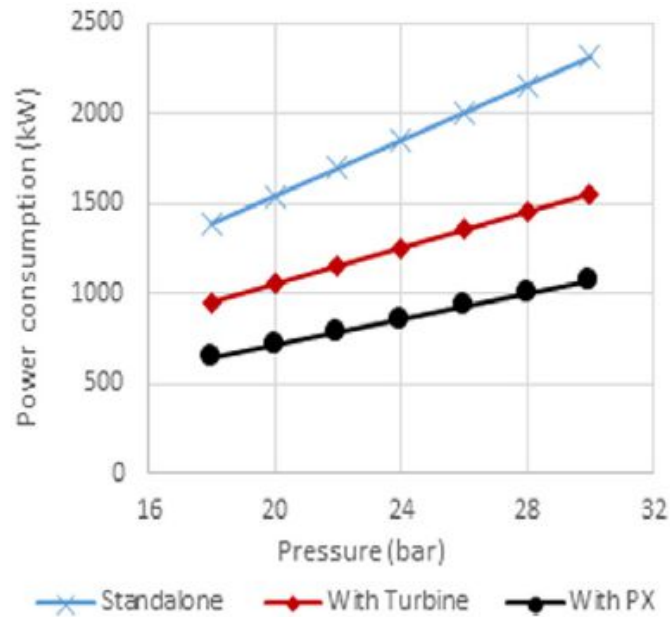
**Εικόνα 33: Διάγραμμα ροής – πίεσης (Atab, Smallbone, & Roskilly, 2016)**



**Εικόνα 34: Διάγραμμα επιφάνειας μεμβρανών – πίεσης(Atab, Smallbone, & Roskilly, 2016)**



**Εικόνα 35: Διάγραμμα διαπερατότητας – πίεσης(Atab, Smallbone, & Roskilly, 2016)**



**Εικόνα 36: Διάγραμμα κατανάλωσης ενέργειας και τεχνολογίας ανάκτησης ενέργειας(Atab, Smallbone, & Roskilly, 2016)**

Σύμφωνα με τους Atab et al. (2016), για την οικονομική ανάλυση συλλέγονται στοιχεία τα οποία αφορούν στα χαρακτηριστικά του νερού τροφοδοσίας, του νερού χρήσης καθώς και στοιχεία τα οποία αφορούν στο κόστος των χρησιμοποιούμενων συστημάτων(Atab, Smallbone, & Roskilly, 2016).

Η απόδοση δείχνει να αυξάνει όσο αυξάνει η ροή του νερού τροφοδοσίας, ενώ η επιλογή εξελιγμένου συστήματος ανάκτησης ενέργειας, όπως είναι τα συστήματα που βασίζονται σε εναλλάκτες πίεσης, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του λειτουργικού κόστους.

Οι παραπάνω ερευνητές προτείνουν τον παρακάτω πίνακα ώστε να προσεγγιστεί η οικονομική ανάλυση μίας μονάδας αντίστροφης ώσμωσης, με σύστημα ανάκτησης ενέργειας μέσω εναλλάκτη πίεσης:

**Πίνακας 3: Οικονομική ανάλυση μονάδων αντίστροφης ώσμωσης με σύστημα ανάκτησης ενέργειας μέσω εναλλάκτη πίεσης (Atab, Smallbone, & Roskilly, 2016)**

Νερό τροφοδοσίας & αλατότητα (ppm)	Ημερήσια δυναμικότητα (m <sup>3</sup> /ημέρα)	Αρχικό κόστος εγκατάστασης (εκ. €)	Λειτουργικό κόστος (€/m <sup>3</sup> )
Θαλασσινό	20.000	9,5	0,3
Υφάλμυρο (1380μS/cm)	28.400	11,7	0,1
Θαλασσινό	34.000	36,5	0,2
Θαλασσινό	45.000	33,2	0,3
Υφάλμυρο (2550 μS/cm)	55.670	41,2	0,2

### **7.1 Δείκτης συσχέτισης ποσότητας παραγόμενου νερού μέσω της διαδικασίας της αφαλάτωσης και κόστους παραγωγής (Energy – Water Nexus Assessment)**

Στην ΕΕ, λαμβάνεται ένα μικρό κλάσμα γλυκού νερού, μέσω αφαλάτωσης θαλασσινού νερού. Οι εγκαταστάσεις της ΕΕ μπορούν να προμηθεύσουν έως 2,89 δισεκατομμύρια m<sup>3</sup> αφαλατωμένου νερού το χρόνο (ενεργός χωρητικότητα). Το 71 % του παραγόμενου νερού χρησιμοποιείται για δημόσια παροχή νερού (2 δισεκατομμύρια m<sup>3</sup>, 4,2 % του συνόλου νερού που χρησιμοποιείται για δημόσια παροχή). 17 % του παραγόμενου νερού χρησιμοποιείται για βιομηχανικές εφαρμογές, 4 % σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και 8 % για άρδευση.

Οι απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας των τεχνολογιών αφαλάτωσης ποικίλλουν ανάλογα με την τεχνολογία αφαλάτωσης, την αλατότητα του νερού προέλευσης και το επίπεδο καθαρότητας του αφαλατωμένου νερού στο τέλος της επεξεργασίας. Γενικότερα, τεχνολογίες αφαλάτωσης μεμβρανών όπως η αντίστροφη όσμωση (RO) έχει χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις από τις θερμικές τεχνολογίες όπως η πολυβάθμια αφαλάτωση. Τα συστήματα πολυβάθμιας αφαλάτωσης απαιτούν περίπου 83-84 kWh/m<sup>3</sup> ενέργειας ενώ μεγάλης κλίμακας συστήματα RO απαιτούν 3-5 kWh/ m<sup>3</sup> για αλατούχο νερό και 0,5-2,6 kWh/m<sup>3</sup> για υφάλμυρο νερό [Olsson 2012], με την διαφορά ότι τα πολυβάθμια συστήματα χρησιμοποιούν απορριπτόμενη ενέργεια εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, βιομηχανιών κλπ. Στην Ευρώπη, το 91 % των μονάδων αφαλάτωσης χρησιμοποιούν τεχνολογία μεμβράνης [GWI 2018].

Η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται από τις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης για δημόσια παροχή είναι 21 TWh (0,67 % του συνολικού ηλεκτρικού ρεύματος που καταναλώνεται στην ΕΕ και 25,7 % της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται για την παροχή νερού (WATER ENERGY NEXUS IN EUROPE, 2019).

Υπάρχουν 1200 λειτουργικές εγκαταστάσεις οι οποίες βρίσκονται σε Κράτη Μέλη της ΕΕ στη Μεσόγειο Θάλασσα (όπου βρίσκονται οι περισσότερες εγκαταστάσεις αφαλάτωσης και όπου θα βρίσκονται κυρίως στο μέλλον), χωρητικότητας 2,37 δισ. m<sup>3</sup>(82 % της συνολικής ικανότητας αφαλάτωσης της ΕΕ). Στη Μεσογειακή περιοχή, η αφαλάτωση είναι μια βασική τεχνολογία για την παροχή δημόσιας ύδρευσης. Οι εγκαταστάσεις της Μεσογείου αντιπροσωπεύουν το 95 % της ικανότητας που χρησιμοποιείται για δήμους και τουριστικές εγκαταστάσεις(1,88 δισεκατομμύρια m<sup>3</sup>/έτος) για συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από 20 TWh. Η δυναμικότητα της αφαλάτωσης στην Ευρωπαϊκή Ένωση μπορεί να φτάσει και τα 28 δισ m<sup>3</sup> ανά έτος (WATER ENERGY NEXUS IN EUROPE, 2019).

Η εξέλιξη της τεχνολογίας αντίστροφης όσμωσης και τα μέτρα ενεργειακής απόδοσης υποδηλώνουν ότι η κατανάλωση ενέργειας των συστημάτων RO μειώθηκε στα 1,5 kWh/m<sup>3</sup>, μειώνοντας έτσι την ενεργειακή ζήτηση του τομέα

αφαλάτωσης κατά 55 %περίπου, χωρίς να ληφθεί υπόψη η προεπεξεργασία και η μετεπεξεργασία αφαλατωμένου νερού[Olsson 2012].

Η διερεύνηση της σχέσης ανάμεσα στην ενέργεια και τους υδάτινους πόρους παίζει ουσιαστικό ρόλο στη διατήρηση των πόρων. Ο υπολογισμός της κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα παραγωγής νερού με αφαλάτωση μπορεί να προωθήσει την κατανόηση της σχέσης μεταξύ ενεργειακών και υδάτινων πόρων. Η ενέργεια που παράγεται από θερμικούς σταθμούς μετατρέπεται αρχικά σε μηχανική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια με απόδοση μετατροπής για τη μέτρηση της απώλειας ενέργειας (Liu et al., 2019). Αναφερόμενος στον δείκτη μετατροπής μεταξύ ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας η σχέση μπορεί να παρουσιαστεί ως:

$$Q = \frac{E'}{S * P}$$

όπου το E 'αντιπροσωπεύει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, το S αντιπροσωπεύει την ισοδύναμη τιμή της θερμικής ισχύος και το P αντιπροσωπεύει τα joules της θερμικής ισχύος για την πλήρως μετασχηματισμένη παραγωγή 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας. Γενικά, η τιμή του Q συνήθως είναι περίπου 30%(Liu et al., 2019)..

Ο δείκτης σύνδεσης ενέργειας – νερού στην αφαλάτωση (energy–water nexus assessment) μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$R = \frac{E * Q}{W * T * P}$$

Όπου Το E αντιπροσωπεύει την ενσωματωμένη κατανάλωση ενέργειας του έργου, W αντιπροσωπεύει την ποσότητα των υδάτινων πόρων που παράγονται από το έργο εντός του κύκλου λειτουργίας, το T αντιπροσωπεύει τον χρόνο ζωής του έργου, R αντιπροσωπεύει τον δείκτη σύνδεσης ενέργειας – νερού.

## 8 Υβριδικά συστήματα

Οι μεγάλης κλίμακας μονάδες αφαλάτωσης συνήθως χρησιμοποιούν ενέργεια παραγόμενη από συμβατικές πηγές ενέργειας, το κόστος της οποίας παρουσιάζει ωστόσο σημαντικές διακυμάνσεις οι οποίες αναγκαστικά μεταφέρονται στο κόστος παραγωγής αφαλατωμένου νερού. Επιπλέον, προκειμένου να διατηρείται το κόστος των μονάδων αφαλάτωσης κατά το δυνατόν χαμηλότερο, συνήθως το νερό το οποίο παράγεται από αφαλάτωση διατίθεται σε κοντινές περιοχές προκειμένου οι αποστάσεις κατά τις οποίες μεταφέρεται να είναι κατά το δυνατόν μικρότερες. Τόσο κατά τη μεταφορά θερμικής όσο και κατά τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σημειώνονται απώλειες, οι οποίες ωστόσο είναι μεγαλύτερες κατά τη μεταφορά θερμικής ενέργειας. Επιπλέον, όσο αυξάνει η απόσταση κατά την οποία μεταφέρεται η θερμική ενέργεια τόσο αυξάνει το κόστος των υποδομών.

Συνολικά, εντοπίζεται όφελος τόσο από την κατανάλωση ενέργειας με σταθερά χαμηλό κόστος, όσο και από τη διάθεση του παραγόμενου νερού σε όμορες περιοχές.

Παράλληλα, ένα μεγάλο εύρος των σύγχρονων βιομηχανιών απορρίπτει σημαντικές ποσότητες θερμικής ενέργειας στο περιβάλλον της θάλασσας κυρίως υπό διάφορες μορφές. Αν και η απορριπτόμενη θερμότητα είναι μικρή σε συγκέντρωση, η διαρκής λειτουργία των βιομηχανιών οδηγεί σε απόρριψη σημαντικών ποσοτήτων θερμότητας καθώς τα απορριπτόμενα ύδατα ή ο απορριπτόμενος αέρας έχει σημαντικό όγκο. Στο τρίτο κεφάλαιο όπου πραγματοποιήθηκε η ανασκόπηση των τεχνολογιών αφαλάτωσης αναφέρθηκε μεταξύ άλλων η τεχνολογία αφαλάτωσης όπου γίνεται εκμετάλλευση της απορριπτόμενης θερμότητας από παρακείμενες βιομηχανίες ή μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ως εκ τούτου, τα υβριδικά συστήματα αφαλάτωσης δεν περιορίζονται αποκλειστικά στην εκμετάλλευση μονάδων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αλλά επεκτείνονται στην εγκατάσταση μονάδων αφαλάτωσης οι

οποίες χρησιμοποιούν την απορριπτέα θερμότητα βιομηχανιών και άλλων εγκαταστάσεων.

Ειδικά σε ό,τι αφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η παραγόμενη ενέργεια εμφανίζει σημαντικές διακυμάνσεις και έχει μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα

Ωστόσο, διακρίνονται δύο κύριοι λόγοι οι οποίοι δεν καθιστούν την κατασκευή υβριδικών μονάδων ασφαλή σε συνδυασμό με μονάδες ΑΠΕ ως πανάκεια:

- η αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας δεν είναι εύκολη τεχνικά και βιώσιμη οικονομικά, προκειμένου να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία μονάδων ασφαλή
- δεν εντοπίζονται σημαντικά έργα υβριδικών μονάδων ασφαλή ανά τον κόσμο

Τα υβριδικά συστήματα χρησιμοποιούν ως κύρια πηγή ενέργειας, ενέργεια μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική και η ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας. Ακόμη χρησιμοποιούν εναλλακτικές μορφές ασφαλή όπως η εμπρόσθια ώσμωση την μείωση της αναγκαίας ποσότητας ενέργειας και κατά συνέπεια την μείωση του κόστους παραγωγής ενέργειας.

Τα συστήματα που λειτουργούν υποβοηθούμενα από ηλιακή ενέργεια, μέσω φωτοβολταϊκών πάνελ χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα μικρής κλίμακας, μειώνοντας αποτελεσματικά το κόστος λειτουργίας τους και τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Τα συστήματα που λειτουργούν με την βοήθεια ανεμογεννήτριας εφαρμόζονται κυρίως σε παράκτιες περιοχές, με υψηλά φορτία ανέμου. Τόσο στα συστήματα με πάνελ, όσο και στα συστήματα με ανεμογεννήτρια προκειμένου να αντιμετωπιστεί το ζήτημα της ανομοιόμορφης παροχής ενέργειας χρησιμοποιείται μπαταρία για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας. Στην συνέχεια τροφοδοτείται η αντλία μέσω της οποίας παρέχεται η απαιτούμενη πίεση για την διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης.



Η εμπρόσθια ώσμωση μπορεί να συνδυαστεί με RO, όπου η άλμη της αντίστροφης ώσμωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αραιώση του θαλασσινού νερού, μειώνοντας έτσι την απαιτούμενη ειδική ενέργεια από 2,5-4 kWh / m<sup>3</sup> έως 1,5 kWh / m<sup>3</sup> (Quasim, 2019).

Η κινητική ενέργεια των κυμάτων γίνεται διαθέσιμη είτε μέσω στηλών ταλαντώσεων νερού είναι μέσω συστημάτων υπερχειλίσσης νερού. Το νερό και στις 2 περιπτώσεις συγκεντρώνεται σε μία δεξαμενή και μία τουρμπίνα στο κάτω μέρος της δεξαμενής χρησιμοποιεί την υδροστατική πίεση που δημιουργείται για να λειτουργήσει.

Στην επόμενη παράγραφο εξετάζεται η δυναμική συνδυασμού μονάδων αφαλάτωσης με διαφορετικές μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

## **8.1 Αιολική ενέργεια και ηλιακή**

Η αιολική ενέργεια, η οποία αξιοποιείται μέσω αιολικών πάρκων, βρίσκεται, μαζί με την υδροηλεκτρική και την ηλιακή ενέργεια, στο προσκήνιο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τόσο στην Ελλάδα όσο και στον κόσμο.

Η σύζευξη των αιολικών πάρκων με μονάδες αφαλάτωσης θεωρείται τεχνικά εφικτή και οικονομικά ελκυστική όταν πρόκειται για μονάδες αντίστροφης ώσμωσης ή ηλεκτρόλυσης. Στην περίπτωση μονάδων πολυβάθμιας εκτόνωσης, όπου η απαίτηση ενέργειας είναι σημαντικά υψηλότερη, δεν κρίνεται οικονομικά βιώσιμος ο συνδυασμός με αιολικά πάρκα. Επιπλέον, σημαντικός περιορισμός προκύπτει από την ανάγκη αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να είναι διαρκώς διαθέσιμη η ζητούμενη από την μονάδα αφαλάτωσης ενέργεια, ιδίως καθώς η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα αιολικά πάρκα έχει μεγάλη αμφισβήτηση.

Στην Ελλάδα εντοπίζονται αξιόλογες προσπάθειες για την εγκατάσταση και σύζευξη ανεμογεννητριών με μονάδες αφαλάτωσης (Kartalidis, Tzen, Kampragkou, & Assimacopoulos, 2016).

Αντίστοιχα, ο συνδυασμός φωτοβολταϊκών πάρκων με συστήματα αφαλάτωσης δείχνει να βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε μονάδες αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού, όπου οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι μικρότερες, καθώς σε αντίθεση με τα αιολικά πάρκα, τα φωτοβολταϊκά πάρκα απαιτούν μεγάλες εκτάσεις προκειμένου να αποδώσουν σημαντική ενέργεια.

## 9. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις άλμης

Η άλμη αφαλάτωσης αποτελεί το υποπροϊόν / απόβλητο της διαδικασίας αφαλάτωσης. Οι κύριες περιβαλλοντικές ανησυχίες που σχετίζονται με τη διάθεση άλμης είναι: αυξημένη αλατότητα των υδάτινων σωμάτων και του εδάφους που δέχονται, περιφερειακές επιπτώσεις της άλμης υψηλής TDS σε θαλάσσιες κοινότητες κοντά στο σημείο απόρριψης, αισθητικά προβλήματα, απόρριψη χημικών ουσιών προεπεξεργασίας και καθαρισμού μεμβρανών, διάθεση μετάλλων διάβρωσης όπως χαλκός (Cu), σιδηρούχος (Fe), νικέλιο (Ni), μολυβδαίνιο (Mo) και χρώμιο (Cr).

### 9.1 Ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της άλμης

Η άλμη μπορεί να είναι επιβλαβής για το περιβάλλον λόγω της αλατότητας, της θερμοκρασίας και των χημικών ουσιών της. Τόσο η αλατότητα άλμης όσο και η θερμοκρασία εξαρτώνται από τη διαδικασία παραγωγής. Η αλατότητα άλμης είναι 1,6-2 φορές υψηλότερη από την αλατότητα θαλασσινού νερού (35g / L). Όσον αφορά τη θερμοκρασία, η άλμη που παράγεται με τεχνολογίες μεμβράνης είναι σε θερμοκρασία θαλασσινού νερού (22 ° C), ενώ η άλμη που παράγεται από θερμικές τεχνολογίες είναι 1,37-1,82 φορές υψηλότερη από τους 22 ° C. Όπως παρουσιάζεται στον πίνακα, διάφοροι τύποι χημικών χρησιμοποιούνται για την διαδικασία της αφαλάτωσης.

**Πίνακας 4: Περιεχόμενα επιβλαβή συστατικά της παραγόμενης άλμης από την αφαλάτωσηPanagoroulosetal., 2019**

Κατηγορία	Χημικές ενώσεις	Περιεκτικότητα	Ρόλος στην διαδικασία της αφαλάτωσης
Αντικατασταλτικά	Πολυμερείς ουσίες όπως πολυφωσφορικά, φωσφονικά και πολυκαρβονικά οξέα	2-5mg/l	Αύξηση της διαλυτότητας των αραιά διαλυτών αλάτων όπως CaSO <sub>4</sub> και MgSO <sub>4</sub> .
Πηκτικά	Χλωριούχος σίδηρος (FeCl <sub>3</sub> ), θειικός σίδηρος [Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ]και πολυηλεκτρολύτες	5-15 mg/l	Για τη βελτίωση της απομάκρυνσης των αιωρούμενων στερεών
Κροκιδωτικά, ισχυρά οξέα ή βάσεις,	Κατιοντικό πολυμερές ισχυρή όξινη βάση θειικό οξύ (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) και υδροχλωρικό οξύ (HCL)	1-5mg/l	Για τη βελτίωση της απομάκρυνσης των αιωρούμενων στερεών
Οξειδωτικοί παράγοντες	Κοινώς, μια μορφή χλωρίου όπως το νάτριουποχλωριώδες (NaOCl) και	1-5mg/l	Για την αποτροπή δημιουργίας βιομάζα στην εγκατάσταση

	υποχλωριώδες ασβέστιο [Ca (ClO) 2]		αφαλάτωσης
Αναγωγικοί παράγοντες	Διθειώδες (HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	1-5 mg/l	Για την εξάλειψη της επίδρασης των οξειδωτικών παραγόντων στις τεχνολογίες που βασίζονται στη μεμβράνη

Η άλμη από ένα μόνο εργοστάσιο αφαλάτωσης δεν θα επηρεάσει αρνητικά το θαλάσσιο περιβάλλον, αλλά άλμη από πολλά εργοστάσια που λειτουργούν στην ίδια περιοχή για μεγάλο χρονικό διάστημα θα μπορούσαν να δημιουργήσουν αρνητικές επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον. Πολυάριθμες μελέτες (Matsumoto και Martin, 2008; Gacia et al., 2006; Cooley et al., 2013; Brika et al., 2015; de-la-Ossa-Carretero et al., 2016; Al-Shammari and Ali, 2018) έχουν δείξει ότι ακόμη και μια μικρή αύξηση της αλατότητας μπορεί να είναι επιβλαβής για τη θαλάσσια ζωή καθώς διαταράσσει την ωσμωτική ισορροπία των θαλάσσιων ειδών με το περιβάλλον τους. Αυτή η διαταραχή οδηγεί σε αφυδάτωση των κυττάρων, μείωση του στροβιλισμού μπορεί να οδηγήσει σε εξαφάνιση των ειδών μακροπρόθεσμα (Einav et al., 2003; Belkin et al., 2017). Στη μελέτη των Jenkins et al. (2012), διαπιστώθηκε ότι σε ορισμένα θαλάσσια είδη θα μπορούσαν να έχουν δυσμενείς επιπτώσεις από την αλλαγή της αλατότητας μόνο 2-3 μέρη ανά χίλια, ενώ άλλα είδη είναι πιο ανεκτικά στις αλλαγές της αλατότητας. Πιο πρόσφατα, οι Petersen et al. (2018) παρατήρησε ότι η αυξημένη αλατότητα (10% πάνω από το περιβάλλον) σημαντικά άλλαξε αρνητικά τη φυσιολογία και την οπτική εμφάνιση των

οργανισμών. Ταυτόχρονα, η αυξημένη αλατότητα σε συνδυασμό με την προσθήκη αντισαρκάνων με βάση τα πολυφωσφορικά είχε μεγαλύτερη επίδραση σε όλα τα είδη κοραλλιών που δοκιμάστηκαν.

Ωστόσο, υπήρξαν παραδείγματα, όπου υπήρξε διοχέτευση της άλμης σε ωκεανούς, καθώς έχουν διαστασιολογηθεί κατάλληλα σε περιοχές με άφθονα ρεύματα (π.χ. Αυστραλία) και επομένως έχουν παρατηρηθεί αμελητέες επιπτώσεις σε θαλάσσια είδη γλωρίδας και πανίδας (Sydney Water, 2005; Chevron Αυστραλία, 2015). Επιπλέον, πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι θα μπορούσε να μετριαστεί ο μακροπρόθεσμος αντίκτυπος της απόρριψης άλμης στις εκροές χρησιμοποιώντας πολλαπλούς διαχύτες (Del-Pilar-Rusoetal., 2015; Portilloetal., 2012).

Η άλμη που παράγεται κυρίως με θερμικές μεθόδους και έχει υψηλότερη θερμοκρασία (π.χ. 30-40 ° C) από το θαλασσινό νερό περιβάλλοντος μπορεί να έχει αρκετές επιβλαβείς επιπτώσεις στη θαλάσσια ζωή. Η τοξικότητα των μετάλλων και των χημικών αυξάνεται με τη θερμοκρασία (Uddin, 2014; Lietai., 2013). Επιπλέον, διάφορα βαρέα μέταλλα, όπως ο χαλκός Cu και το νικέλιο Ni, μπορεί να γίνουν μέρος της ροής άλμης όταν τα κράματα τους που χρησιμοποιούνται σε εναλλάκτες θερμότητας αρχίζουν να διαβρώνονται κατά την διαδικασία της αφαλάτωσης. Σε μια πρόσφατη μελέτη, ο Alshahri (2016) εξέτασε τις υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στην περιοχή διάθεσης άλμης των μονάδων αφαλάτωσης στον Αραβικό Κόλπο (Περσικός Κόλπος). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι συγκεντρώσεις σιδήρου Fe και χρωμίου Cr και χαλκού Cu στην άμμο και τα ιζήματα είναι σημαντικά υψηλότερες από τις συγκεντρώσεις στο σχιστόλιθο λόγω ανθρωπογενούς ρύπανσης.

Ομοίως, μια ερευνητική μελέτη για τα παράκτια ιζήματα στην περιοχή Al-Khafji του Αραβικού κόλπου αποκάλυψε ότι υψηλά επίπεδα Cu στη βόρεια ακτογραμμή μπορεί να προκλήθαι από τη διάθεση άλμης από την εγκατάσταση αφαλάτωσης κατά μήκος της ακτής (Alharbi et al., 2017). Επιπλέον, η φθορά του εδάφους και η ρύπανση των υπόγειων υδάτων αποτελούν σημαντικό πρόβλημα όταν απορρίπτεται η άλμη σε λίμνες εξάτμισης χωρίς επένδυση (Mohamed et al., 2005; Bhandary et al., 2018). Η δομή του εδάφους μπορεί να επιδεινωθεί λόγω της

υψηλή αλατότητας της άλμης, καθώς το  $\text{Ca}^{2+}$  αναπληρώνεται με  $\text{Na}^{+}$  στο ανταλλάξιμο σύμπλεγμα ιόντων (Heck et al., 2016; Maliva και Missimer, 2012).

Ακόμη τα βιοκτόνα που περιέχονται στην άλμη όπως το χλώριο, για την αντιμετώπιση της βιοπλήρωσης στις μεμβράνες έχουν δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Το χλώριο είναι ένα πολύ αποτελεσματικό βιοκτόνο και η τοξικότητά του έχει επιβεβαιωθεί από πολλές τοξικολογικές μελέτες. Με βάση τα τοξικολογικά δεδομένα από ένα ευρύ φάσμα θαλάσσιων ειδών, η EPA των ΗΠΑ συνιστά ένα μακροπρόθεσμο κριτήριο ποιότητας του νερού για το χλωρίνη στο θαλασσινό νερό 7,5  $\mu\text{g}/\text{L}$  και ένα βραχυπρόθεσμο κριτήριο 13  $\mu\text{g}/\text{L}$ . Η εκτίμηση περιβαλλοντικού κινδύνου της ΕΕ για υποχλωριώδες έχει καθορίσει PNEC (προβλεπόμενη συγκέντρωση χωρίς επιπτώσεις) για είδη αλμυρού νερού 0,04 $\mu\text{g}/\text{L}$  free διαθέσιμο χλώριο [16]. Τα επίπεδα απόρριψης 200–500  $\mu\text{g}/\text{L}$  και περιβαλλοντικές συγκεντρώσεις έως 100  $\mu\text{g}/\text{L}$  αποτελούν επομένως σοβαρό κίνδυνο για την υδρόβια ζωή. Επιπλέον, η αξιολόγηση κινδύνου της ΕΕ σημειώνει ότι θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι συνεργιστικές επιδράσεις της θερμικής καταπόνησης και της έκθεσης σε υπολειμματικό χλώριο, οι οποίες έχουν καταδειχθεί σε πολλές μελέτες, π.χ. για την απόρριψη λυμάτων ψύξης σταθμών ηλεκτροπαραγωγής (Latterman και Horner, 2007).

Η άλμη επίσης περιέχει κροκιδωτικά (όπως χλωριούχος σίδηρος III) και κροκιδωτικά βοηθήματα (όπως πολυακρυλαμίδιο), τα οποία προστίθενται στο νερό τροφοδοσίας για την πήξη και τη διήθηση μέσω του αιωρούμενου υλικού. Τα φίλτρα των μέσων πλένονται κατά διαστήματα και το νερό της αντίστροφης έκπλυσης που περιέχει το αιωρούμενο υλικό και τα πηκτικά συνήθως απορρίπτεται στο νερό χωρίς επεξεργασία. Οι ίδιες οι χημικές ουσίες έχουν πολύ χαμηλή τοξικότητα. Ωστόσο, η απόρριψή τους μπορεί να προκαλέσει έντονο χρωματισμό του απορριπτόμενου ρεύματος εάν χρησιμοποιηθούν άλατα σιδήρου («κόκκινα άλμη»), τα οποία μπορεί να αυξήσουν τη θολότητα και να μειώσουν τη διείσδυση του φωτός ή θα μπορούσαν να θάψουν άμιστους βενθικούς οργανισμούς στη θέση απόρριψης (Latterman και Horner, 2007)..

Αρνητικές επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον μπορεί να προκύψουν όταν οι υψηλές απορρίψεις λυμάτων συμπίπτουν με ευαίσθητα οικοσυστήματα. Οι επιπτώσεις μιας μονάδας αφαλάτωσης στο θαλάσσιο περιβάλλον εξαρτώνται τόσο από τις φυσικοχημικές ιδιότητες των ρευμάτων απόρριψης όσο και από τα υδρογραφικά και βιολογικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος υποδοχής. Οι κλειστές και ρηχές τοποθεσίες με άφθονη θαλάσσια ζωή μπορεί γενικά να θεωρηθεί ότι είναι πιο ευαίσθητες στις εκκενώσεις της μονάδας αφαλάτωσης από τις εκτεθειμένες, υψηλής ενέργειας, ανοικτές θέσεις, οι οποίες είναι πιο ικανές να αραιώσουν και να διασκορπίσουν τις απορρίψεις (Latterman και Horner, 2007).

## 9.2 Υφιστάμενοι τρόποι διάθεσης της άλμης

Λόγω του ότι οι διαδικασίες αφαλάτωσης παράγουν σημαντικές ποσότητες άλμης, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι διάθεσής της. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν επιφανειακή απόρριψή της, υπόγεια απόρριψη της σε βαθύτερα στρώματα, έγχυση σε βαθιά φρεάτια, λίμνες εξάτμισης και απόθεση επί της στεριάς. Ωστόσο, καμία από τις προηγούμενες μεθόδους δεν μπορεί να εφαρμοστεί ευρέως σε οποιοδήποτε τύπο και μέγεθος αφαλάτωσης έργου. Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου διάθεσης άλμης εξαρτάται από πολυάριθμους παράγοντες. Αυτοί οι παράγοντες είναι η ποσότητα, η ποιότητα και η σύνθεση της άλμης, η γεωγραφική θέση του τόπου διάθεσης, η διαθεσιμότητα του τόπου παραλαβής, το επιτρεπτό της επιλογής, η δημόσια αποδοχή, το κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας και η ικανότητα της εγκατάστασης για μελλοντική επέκταση (National Research Council, 2008; Mickley, 2018).



Όσον αφορά το κόστος διάθεσης άλμης κυμαίνεται από 5% έως 33% του συνολικού κόστους των διεργασιών και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά και τον όγκο της άλμης, το επίπεδο προεπεξεργασίας, τα μέσα διάθεσης και τη φύση του περιβάλλον διάθεσης (Eslamian, 2016).

### 9.2.1 Επιφανειακή εναπόθεση της άλμης

Η επιφανειακή εναπόθεση της άλμης είναι μια μέθοδος απόρριψης άλμης που περιλαμβάνει την άμεση απόρριψη άλμης σε ωκεανούς, ποτάμια, όρμους, λίμνες και άλλα ανοιχτά σώματα νερού. Η άλμη μεταφέρεται στον τόπο απόρριψης όπου απορρίπτεται μέσω μιας δομής εκροής στο υδάτινο σώμα υποδοχής. Αυτή η μέθοδος υιοθετείται από την πλειοψηφία των μονάδων αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης (90% των παγκόσμια εργοστάσιων αντίστροφης όσμωσης). Το κόστος αυτής της μεθόδου διάθεσης κυμαίνεται από 0,05 \$/m<sup>3</sup> έως 0,30 \$/m<sup>3</sup> άλμης που απορρίπτεται (Ziolkowska and Reyes, 2016; Arafat, 2017).

Ωστόσο, αυτή η μέθοδος μπορεί να διαταράξει το θαλάσσιο περιβάλλον και να οδηγήσει σε αύξηση της αλατότητας των ημίκλειστων θαλασσών όπως η Μεσόγειος και η Ερυθρά Θάλασσα (Williams και Follows, 2011). Για συμμόρφωση τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών κινδύνων, οι θαλάσσιες εκροές πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να αραιώνουν την άλμη όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά. Έχει αναφερθεί ότι ένας συντελεστής αραιώσης 40 προς 1, θα ήταν επαρκής για την προστασία του 99% των θαλάσσιων ειδών (Falkenberg και Styan, 2015).

### 9.2.2 Εναπόθεση της άλμης στο σύστημα αποχέτευσης

Η εναπόθεση της άλμης στο σύστημα αποχέτευσης είναι μια μέθοδος απόρριψης άλμης που περιλαμβάνει την απόρριψη άλμη στο κοντινό σύστημα συλλογής λυμάτων. Αυτή η μέθοδος υιοθετείται ευρέως από τις μικρές κλίμακας εγκαταστάσεις αφαλάτωσης. Η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας λόγω των δυνητικών αρνητικών επιπτώσεων του υψηλού περιεχομένου TDS της άλμης σε μονάδα επεξεργασίας λυμάτων (WWTP) (Chang, 2015). Γενικά, η υψηλή αλατότητα εμποδίζει τη διαδικασία βιολογικής επεξεργασίας σε ένα ενεργού ιλύος, καθώς η συγκέντρωση TDS της εισόδου στην εγκατάσταση βιολογικής επεξεργασίας δεν μπορεί να υπερβαίνει τα 3000 mg/L (Valirouretal., 2014). Λαμβάνοντας υπόψη ότι το επίπεδο TDS άλμης που προέρχεται από την αφαλάτωση μπορεί να είναι υψηλότερο από 55.000 mg/L, η ποσότητα των λυμάτων πρέπει να είναι τουλάχιστον 20 φορές μεγαλύτερη από τον ημερήσιο όγκο αποβολής άλμης για να διατηρηθεί η ικανότητα της εγκατάστασης προς επεξεργασία.

Επιπλέον η εγκατάσταση ενεργού ιλύος απαιτείται να ενσωματώσει βασικές τεχνολογίες στην βασική προεπεξεργασία, όπως η εξουδετέρωση του pH ή οποιαδήποτε άλλη απαίτηση μπορεί να είναι επιβάλλεται επειδή η άλμη μπορεί να περιέχει ίχνη βαρέων μετάλλων. Αυτό εξασφαλίζει την υποδομή και τη διαδικασία επεξεργασίας καθώς και την ποιότητα του τελικό απόβλητο λυμάτων (Hobbs et al., 2016). Το κόστος αυτής της διάθεσης κυμαίνεται από 0,32 €/m<sup>3</sup> έως 0,66 €/m<sup>3</sup> άλμης που απορρίπτεται (Panagoroulos et al., 2019).

### **9.2.3 Έγχυση της άλμης σε βαθιά πηγάδια**

Η έγχυση της άλμης σε βαθιά πηγάδια είναι μια μέθοδος απόρριψης άλμης που περιλαμβάνει την απόρριψη άλμης σε έναν καθορισμένο βαθύ υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα, επαρκώς απομονωμένο από υδροφορείς πάνω από αυτό. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως από μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης

όσμωσης όλων των μεγεθών. Η άλμη εγχέεται σε ένα πηγάδι που αποτελείται από πολλά στρώματα περιβλήματος και αρμολόγησης. Στη συνέχεια, πορώδεις βράχοι χρησιμοποιούνται για να περιέχουν την άλμη, ενώ αδιαπέραστοι σχηματισμοί χρησιμοποιούνται για να εμποδίσουν τη ρύπανση των υδροφορέων (Thomas και Benson, 2015; Malivaetal., 2011; Pertiwi, 2015). Το απαιτούμενο βάθος αυτά τα πηγάδια κυμαίνεται κανονικά μεταξύ 500 m και 1500 m, ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες του τόπου. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου είναι ο υδροφορέας λήψης πρέπει να είναι σε θέση να λάβει την άλμη που παράγεται κατά τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης (25-30 ετών) (Gálvez et al., 2010; Olabarria, 2015). Το κύριο περιβαλλοντικό μέλημα για την έγχυση σε βαθιά φρεάτια είναι το δυναμικό ρύπανσης των κοντινών υδροφορέων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως πηγή πόσιμου νερού (American Water Works Association, 2011). Πριν από την κατασκευή φρεατίου, απαιτείται λεπτομερή υδρογεωλογική μελέτη, οπές δοκιμών γεώτρησης, περιβαλλοντικές επισκοπήσεις και πιλοτικές δοκιμές πρέπει να εκτελεστεί (Mickley, 2018). Το κεφαλαιουχικό κόστος της έγχυσης βαθέων φρεατίων είναι σημαντικά υψηλότερο από τις δύο προηγούμενες μεθόδους διάθεσης. Επομένως, αυτή η μέθοδος απόρριψης άλμης επιλέγεται συνήθως όταν απουσιάζει άλλη βιώσιμη εναλλακτική λύση. Το κόστος αυτής της μεθόδου διάθεσης κυμαίνεται από 0,54 €/m<sup>3</sup> έως 2,65 €/m<sup>3</sup>.

#### **9.2.4 Εναπόθεση της άλμης επί του εδάφους**

Η εφαρμογή εδαφικής διάθεσης της άλμης είναι μια μέθοδος απόρριψης άλμης που περιλαμβάνει άρδευση με ψεκασμό άλμης σε φυτά και χόρτα ανθεκτικά στο αλάτι (π.χ. χόρτα που χρησιμοποιούνται σε πάρκα, γκαζόν και γήπεδα γκολφ). Αυτή η μέθοδος διάθεσης χρησιμοποιείται κυρίως για χαμηλούς όγκους άλμης που παρήχθη από αντίστροφη όσμωση και η εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα είναι

περιορισμένη από τις κλιματολογικές συνθήκες, την εποχιακή ζήτηση καθώς και τη διαθεσιμότητα κατάλληλης συνθήκης ξηράς και υπόγειων υδάτων (Ladewig και Asquith, 2011). Δεδομένου ότι κάθε εγκατάσταση έχει διαφορετική ανοχή σε αλατότητα, η ποσότητα της άλμης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το είδος των φυτών, το έδαφος και τα χαρακτηριστικά της άλμης. Σχεδόν όλα τα φυτά μπορούν να ανεχθούν συγκεντρώσεις TDS ως 500 mg/L. Ωστόσο, μόνο φυτά με υψηλή ανοχή σε αλατότητα (που ονομάζονται «αλογόφυτα») μπορεί να αρδευθεί με άλμη με TDS υψηλότερη από 20000 mg/L (Pantaetal., 2016). Η άρδευση μπορεί να έχει αρνητικό αντίκτυπο στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα κάτω από την αρδευόμενη περιοχή. Η αλατότητα των ρηχών υπόγειων υδάτων είναι συνήθως μικρότερη από την αλατότητα της άλμης και επομένως η επιφανειακή απορροή και η διαβροχή εδάφους της άλμης μπορούν να αυξήσουν την αλατότητα του υδροφόρου ορίζοντα. Εξαίρεση, ωστόσο, αποτελούν οι ρηχοί αλμυροί παράκτιοι υδροφορείς ή βαθιά περιορισμένοι υδροφόροι ορίζοντες που είναι απομονωμένοι από άμεση ή έμμεση αλληλεπίδραση με την άλμη. Η επιλογή αυτής της μεθόδου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως το κλίμα, η διαθεσιμότητα και το κόστος της γης, το ποσοστό διείσδυσης, οι απαιτήσεις άρδευσης, η ποιότητα νερού των υποκείμενων υπόγειων υδροφορέων, η ανοχή στην αλατότητα των αρδευόμενων φυτών και η ικανότητα εφαρμογής γης με σύστημα συμμόρφωσης σύμφωνα με τις κανονιστικές απαιτήσεις και τα πρότυπα ποιότητας των υπόγειων υδάτων. Το κόστος αυτής της μεθόδου διάθεσης κυμαίνεται από 0,74 \$/m<sup>3</sup> έως 1,95 €/m<sup>3</sup> προς διάθεση άλμης (Ziolkowska και Reyes, 2016; Arafat, 2017).

## **10 Εφαρμογές αντίστροφης ώσμωσης**

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται το πεδίο εφαρμογής της τεχνολογίας της αντίστροφης ώσμωσης, με έμφαση στις Μεσογειακές χώρες, όπου τοποθετείται και η Ελλάδα.

## 10.1 Εισαγωγή

Η ιδιαιτερότητα των Μεσογειακών χωρών ως προς το κλίμα, τον τουρισμό και τις αγροτικές δραστηριότητες δημιουργεί την ανάγκη εξεύρεσης υδάτινων πόρων. Η αφαλάτωση θα μπορούσε να αποδειχθεί μία αποτελεσματική απάντηση στο πρόβλημα αυτό. Μία από τις χώρες που χρησιμοποιεί την αφαλάτωση ευρέως είναι η Ισπανία. Το παράδειγμά της θα μπορούσε να αποδειχθεί οδηγός για την χώρα μας, καθώς παρουσιάζει παρόμοιες συνθήκες λόγω του τουρισμού, της γεωργίας και του κλίματος που έχει.

Το 75% των αναγκών της Ισπανίας σε νερό προέρχεται από την άρδευση, ενώ σε ορισμένες περιοχές όπως η Αλμερία το ποσοστό φτάνει στο 50%. Η Ισπανία παρουσιάζει δείκτη καταπόνησης νερού 30%, ενώ ο δείκτης 40% καταδεικνύει κατάσταση οξείας λειψυδρίας και 10% βιώσιμο σενάριο. Το πρόβλημα παρουσιάζεται κυρίως στις μεσογειακές ακτές.

## 10.2 Περιπτώσεις εφαρμογής

### 10.2.1 Κύπρος



*Εικόνα 34: Μονάδες Αφαλάτωσης Κύπρου (κατά σειρά Δεκελείας, Λεμεσού, ΑΗΚ Βασιλικού, Λάρνακας, Πάφου) (Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων Κύπρου, 2021)*

#### Μονάδα Αφαλάτωσης Δεκέλειας

Το Συμβόλαιο για την κατασκευή και λειτουργία της Μονάδας ανατέθηκε το 1996, κατόπιν προσφορών, στην Κοινοπραξία CARAMONDANI BROS LTD και CARAMONDANI DESALINATION PLANTS LTD, στην τιμή των £0,54/m<sup>3</sup>. Η Μονάδα λειτούργησε τον Απρίλιο του 1997 με δυναμικότητα 40.000 m<sup>3</sup>/ημέρα και εξαγοράστηκε από την Κυβέρνηση το 2005, κάνοντας χρήση του σχετικού όρου του Συμβολαίου. Ακολούθως, η Κυβέρνηση προχώρησε στην προκήρυξη Διαγωνισμού για την Ανακαίνιση, Λειτουργία και Συντήρηση της Μονάδας και Πώληση νερού στο ΤΑΥ για περίοδο 20 ετών. Το Συμβόλαιο ανατέθηκε στην Εταιρεία CARAMONDANI DESALINATION PLANTS LTD, στην τιμή των £0,38/m<sup>3</sup>. Η Μονάδα, η οποία ανακαινίστηκε το 2005, ξεκίνησε την 20ετή περίοδο λειτουργίας της το Μάιο του 2007, ενώ το Συμβόλαιο αναμένεται να λήξει τον Μάιο του 2027. Από τον Ιούλιο του 2008, η δυναμικότητα αυξήθηκε κατά 10.000m<sup>3</sup>/ημέρα και από τον Απρίλιο του 2009 κατά ακόμα 10.000m<sup>3</sup>/ημέρα, με τη συνολική δυναμικότητα σήμερα να ανέρχεται στις 60.000m<sup>3</sup>/ημέρα. Η Μονάδα Αφαλάτωσης Δεκέλειας καλύπτει τις υδρευτικές ανάγκες της ελεύθερης περιοχής Αμμοχώστου και μέρος των αναγκών της Λάρνακας (Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων Κύπρου, 2021).

### **Μονάδα Αφαλάτωσης Λεμεσού (Επισκοπής)**

Το Συμβόλαιο για την κατασκευή και λειτουργία της Μονάδας, υπογράφηκε τον Αύγουστο του 2009. Ανάδοχος είναι η Κοινοπραξία M.N. LIMASSOL WATER CO LTD, που αποτελείται από τις Εταιρείες MEKOROT (Ισραήλ) και NETCOM (Κύπρος) και η τιμή του Συμβολαίου είναι €0,87/m<sup>3</sup>. Το Συμβόλαιο αυτό προνοεί 20ετή λειτουργία, η οποία ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2012 και αναμένεται να λήξει τον Ιούλιο του 2032. Η Μονάδα ήταν κυρίως σε εφεδρεία έως το τέλος 2015. Η δυναμικότητα της Μονάδας είναι 40.000m<sup>3</sup>/ημέρα, με δυνατότητα επέκτασης στα 60.000m<sup>3</sup>/ημέρα. Η Μονάδα Αφαλάτωσης Λεμεσού μπορεί να καλύψει μέρος των υδρευτικών αναγκών της Επαρχίας Λεμεσού ( Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων Κύπρου, 2021).

### **Μονάδα Αφαλάτωσης ΑΗΚ Βασιλικού**

Η Συμφωνία προμήθειας νερού από τη Μονάδα Αφαλάτωσης Βασιλικού, υπογράφηκε με την ΑΗΚ, τον Φεβρουάριο του 2010, στην τιμή των €0,81/m<sup>3</sup> και είναι διάρκειας 20 χρόνων. Παρόλο που η 20ετής περίοδος ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2013, η Μονάδα βρισκόταν σε εφεδρεία μέχρι το τέλος του 2015. Η Συμφωνία αναμένεται να λήξει τον Ιούλιο του 2033. Η Μονάδα είναι δυναμικότητας 60.000m<sup>3</sup>/ημέρα και μπορεί να καλύψει υδρευτικές ανάγκες κοινοτήτων της Επαρχίας Λεμεσού, ενώ τροφοδοτεί τον αγωγό Χοιροκοιτίας-Αμμοχώστου μέσω της Δεξαμενής επεξεργασμένου νερού του Διυλιστηρίου Χοιροκοιτίας (Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων Κύπρου, 2021).

### **Μονάδα Αφαλάτωσης Λάρνακας**

Το Συμβόλαιο για την κατασκευή και λειτουργία της Μονάδας Αφαλάτωσης Λάρνακας ανατέθηκε το 1999 στην Εταιρεία LARNACA WATER PARTNERS (Κοινοπραξία των Εταιρειών IDE και OCEANA από το Ισραήλ), στην τιμή των €0,40/m<sup>3</sup>. Το Συμβόλαιο ήταν 10ετές και η Μονάδα λειτούργησε τον Ιούνιο του 2001 με δυναμικότητα 52.000m<sup>3</sup>/ημέρα. Τον Ιανουάριο του 2009, η δυναμικότητα της Μονάδας αυξήθηκε κατά 10.000 m<sup>3</sup>/ημέρα και έφτασε στα 62.000m<sup>3</sup>/ημέρα. Το Συμβόλαιο έληξε τον Ιούλιο 2011, οπότε η Μονάδα περιήλθε στην κυριότητα του ΤΑΥ. Η Κυβέρνηση προχώρησε στην προκήρυξη νέου Διαγωνισμού και η νέα συμφωνία για Ανακαίνιση και Λειτουργία της Μονάδας υπογράφηκε τον Ιανουάριο του 2012, με την Εταιρεία MN LARNACA DESALINATION CO LTD (Κοινοπραξία των Εταιρειών Mekorot και Netcom), στην τιμή των €0,60/m<sup>3</sup>. Η 25ετής περίοδος

ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2015 και αναμένεται να λήξει τον Ιούνιο του 2040. Η Μονάδα βρισκόταν κυρίως σε εφεδρεία έως το τέλος 2015. Η δυναμικότητα της Μονάδας είναι 60.000m<sup>3</sup>/ημέρα. Η Μονάδα Αφαλάτωσης Λάρνακας καλύπτει σήμερα, σε μεγάλο βαθμό, τις ανάγκες των Επαρχιών Λευκωσίας και Λάρνακας( Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων Κύπρου, 2021).

### **Μονάδα Αφαλάτωσης Πάφου**

Το Συμβόλαιο για την κατασκευή και λειτουργία της Μονάδας υπογράφηκε τον Ιανουάριο του 2019. Ανάδοχος είναι η CARAMONDANI DESALINATION PLANTS LTD και η τιμή του Συμβολαίου είναι €0,80/m<sup>3</sup>. Το Συμβόλαιο προνοεί την 25ετή λειτουργία της Μονάδας, η οποία αναμένεται να ξεκινήσει αρχές του 2021. Η Μονάδα, δυναμικότητας 15.000m<sup>3</sup>/ημέρα, θα μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην κάλυψη των αναγκών της Επαρχίας Πάφου( Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων Κύπρου, 2021) .

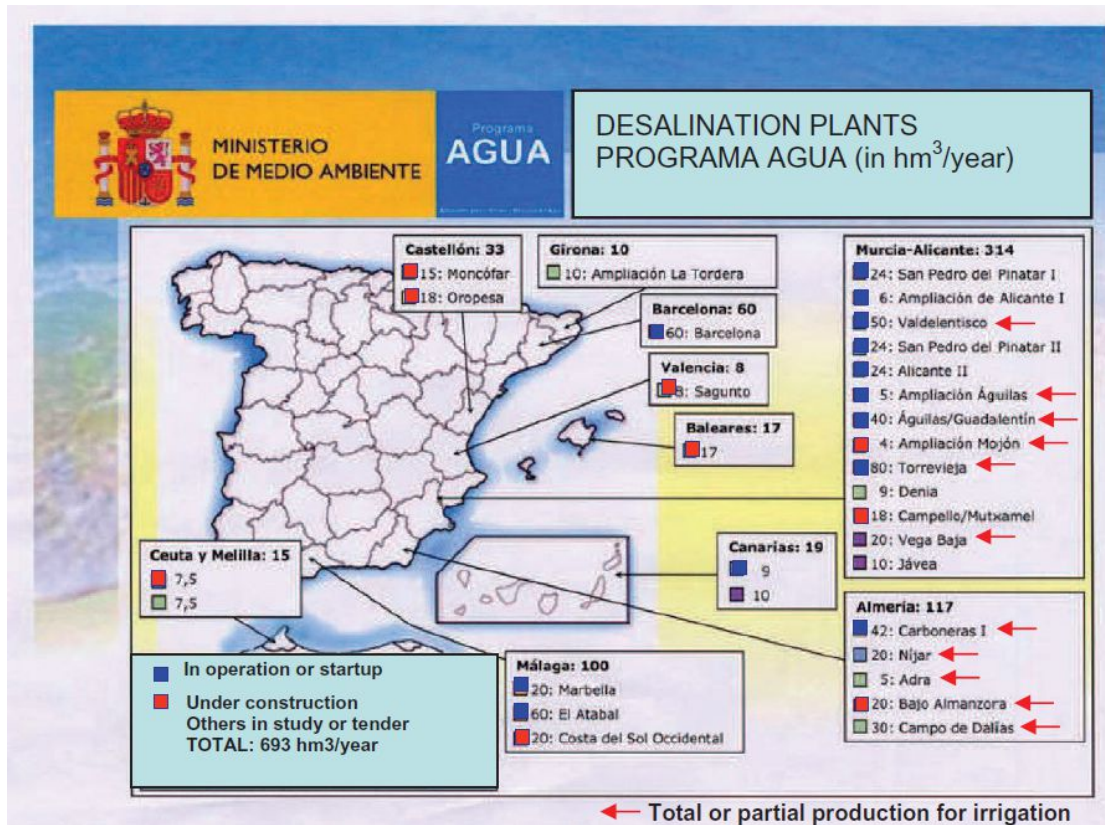
### **10.2.2 Ισπανία**

Το 2001 έγινε η πρώτη προσπάθεια αντιμετώπισής με το σχέδιο “Plan Hidrológico Nacional” μέσω της μεταφοράς νερού από τον ποταμό Ebroσε διάφορες περιοχές της μεσογειακής ακτής. Ωστόσο το κόστος μεταφοράς κατέστη υπερβολικό καθώς από 0,31€/m<sup>3</sup> που ήταν η αρχική εκτίμηση, ανέβηκε στα 0,91€/m<sup>3</sup> (Molina&Casañas, 2010). Το σχέδιο τροποποιήθηκε και καταρτίστηκε το πρόγραμμα A.G.U.A. με την δημιουργία πολλών εγκαταστάσεων αντίστροφης ώσμωσης. Ανάμεσά τους είναι η εγκατάσταση Campode Dalías με δυναμικότητα 100,000 m<sup>3</sup>/day, Marina Bajaμε δυναμικότητα 50,000 m<sup>3</sup>/day και η Costa del Solμε δυναμικότητα 60,000 m<sup>3</sup>/day.

Πολλές από τις εγκαταστάσεις του προγράμματος A.G.U.A. χρησιμοποιούν νερό που προέρχεται από λύματα όπως η εγκατάσταση San Javier με δυναμικότητα



30,000 m<sup>3</sup>/day, η εγκατάσταση Los Alcázares (22,500 m<sup>3</sup>/day) και η εγκατάσταση Hellín με δυναμικότητα 12,500 m<sup>3</sup>/day. Το επεξεργασμένο νερό από λύματα χρησιμοποιείται για άρδευση.



**Εικόνα 35: Εγκαταστάσεις αφαλάτωσης του προγράμματος Α.Γ.Υ.Α. στην Ισπανία (Zarzo, etal., 2012)**

### 10.2.3 Ελλάδα

Επιπλέον, εξετάζεται η περίπτωση μονάδων αφαλάτωσης βασισμένων στην τεχνολογία της αντίστροφης ώσμωσης οι οποίες είναι εγκατεστημένες σε διάφορα νησιά της Ελλάδας.

Μια επιτυχημένη μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης, η οποία τροφοδοτείται με ενέργεια παραγόμενη από ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε

λειτουργία στο νησί της Μήλου από το 2009. Το έργο αποτελείται από τρεις παρόμοιες μονάδες αντίστροφης ώσμωσης με συνολική δυναμικότητα 3360 m<sup>3</sup>/ημέρα και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, περί των 3,5 kWh/m<sup>3</sup>). Η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από μία ανεμογεννήτρια ισχύος 850 kW.



***Εικόνα 36: Μονάδα αντίστροφης ώσμωσης στην Μήλο (ITAGroup, 2021)***

Οι μονάδες αντίστροφης ώσμωσης και η ανεμογεννήτρια υποστηρίζονται από ένα εποπτικό σύστημα ελέγχου και συλλογής δεδομένων για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος, καθώς τόσο η ανεμογεννήτρια όσο και η μονάδα αφαλάτωσης συνδέονται στα δίκτυα κοινής ωφέλειας του νησιού. Σημειώνεται δε πως το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και το δίκτυο ύδρευσης της Μήλου είναι αυτόνομα.



***Εικόνα 37: Ανεμογεννήτριες μονάδας αντίστροφης ώσμωσης στην Μήλο (ITAGroup, 2021)***

Η βελτιστοποίηση προκύπτει μέσα από την εκμετάλλευση μετεωρολογικών δεδομένων και δεδομένων τα οποία αφορούν στη ζήτηση νερού στο νησί, αλλά και δεδομένων τα οποία αφορούν στην πληρότητα των δεξαμενών της μονάδας. Αναφέρεται ότι η μονάδα διαθέτει τέσσερις δεξαμενές στις οποίες αποθηκεύεται το παραγόμενο πόσιμο νερό προκειμένου να καταστεί εφικτή η κάλυψη της ζήτησης νερού:



**Εικόνα 37: Δεξαμενές αποθήκευσης παραγόμενου νερού μονάδας αντίστροφης ώσμωσης στην Μήλο (ITAGroup, 2021)**

Αξίζει να σημειωθεί πως δύο χρόνια αργότερα επιχειρήθηκε να εγκατασταθεί μία επιπλέον μονάδα αφαλάτωσης μέσω συμπίεσης ατμών, ισχύος 330kW, προερχόμενης από αιολική ενέργεια, η οποία ωστόσο δεν κατέστη επιτυχημένη καθώς η δυναμικότητα παραγωγής πόσιμου νερού ήταν ιδιαίτερα περιορισμένη.

Σε ό,τι αφορά στη Σαντορίνη, στο νησί λειτουργούν συνολικά πάνω από δέκα μονάδες αφαλάτωσης μέσω αντίστροφης ώσμωσης. Οι τρεις παλαιότερες μονάδες αφαλάτωσης έχουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

**Πίνακας6: Χαρακτηριστικά μονάδων αφαλάτωσης στη Σαντορίνη (Zotalis, Dialynas, Mamassis, & Angelakis, 2014)**

Θέση	Έτος λειτουργίας	Δυναμικότητα (m <sup>3</sup> /ημέρα)	Λειτουργικό κόστος (€/m <sup>3</sup> )
Οία	1994	220	2
Οία	2000	320	2
Οία	2002	160	2

Σύμφωνα με τους Zotalis et al. (2014) ένας σημαντικός παράγοντας ο οποίος καθιστά το λειτουργικό κόστος των μονάδων αντίστροφης ώσμωσης στη Σαντορίνη τόσο υψηλό είναι η μικρή του κλίμακα, δηλαδή η μικρή παραγωγική δυναμικότητα και των τριών μονάδων.

Το 2009 τέθηκε σε λειτουργία μία ακόμη μονάδα αφαλάτωσης, μέσω αντίστροφης ώσμωσης, με ημερήσια δυναμικότητα  $1.200\text{m}^3$  πόσιμου νερού, το οποίο πληροί τις απαιτήσεις του θεσμικού πλαισίου. Το νερό τροφοδοσίας είναι υφάλμυρο, ενώ η μονάδα αποτελείται από πολλαπλά στάδια επεξεργασίας προκειμένου να παράγεται υψηλής καθαρότητας νερό.



***Εικόνα 39: Νέα μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης στη Θήρα (ΤΕΜΑΚ, 2009)***

Το 2018 ξεκίνησε η κατασκευή μίας νέας μεγάλης κλίμακας μονάδας αφαλάτωσης, η δυναμικότητα της οποίας αναμένεται να φτάσει στα  $5.000\text{m}^3$ /ημέρα έως  $7.500\text{m}^3$ /ημέρα. Το νερό τροφοδοσίας θα είναι θαλασσινό, η πρόσληψη του οποίου γίνεται μέσω αγωγού το κάτω άκρο του οποίου είναι εμβαπτισμένο σε βάθος στη θάλασσα του νησιού. Μέχρι να κατασκευαστεί και η νεότερη αυτή μονάδα, η συνολική δυναμικότητα αφαλατωμένου νερού στη Σαντορίνη κυμαίνεται περί τα  $6.700\text{m}^3$ /ημέρα.



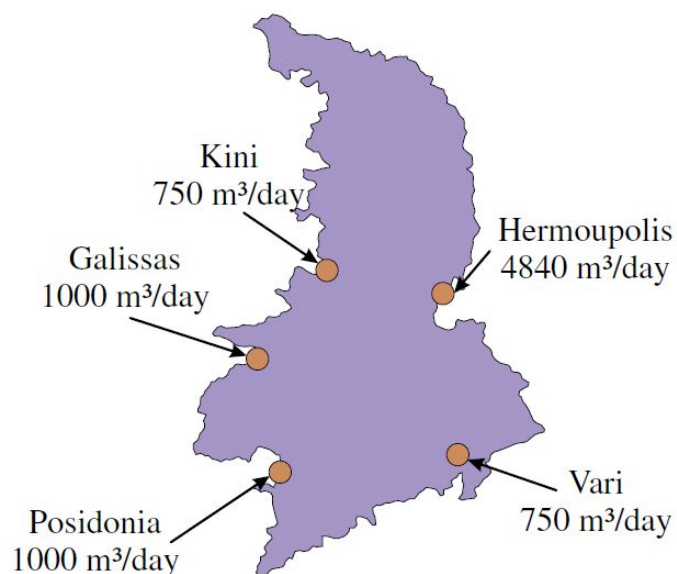
**Εικόνα 40: Νέα μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης στην Οία δυναμικότητας 2.400m<sup>3</sup>/ημέρα(CycladesVoice, 2018)**



**Εικόνα 38: Νέα μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης στην Οία δυναμικότητας 2.400m<sup>3</sup>/ημέρα(CycladesVoice, 2018)**

Τέλος, αναφέρεται η περίπτωση της νήσου Σύρου, η υδροδότηση της οποίας γίνεται σχεδόν αποκλειστικά από μονάδες αφαλάτωσης. Ομοίως, το δίκτυο ηλεκτρισμού του νησιού είναι αυτόνομο και τροφοδοτεί με ηλεκτρική ενέργεια όχι μόνον τους κατοίκους αλλά και τις μονάδες αφαλάτωσης. Συνολικά στο νησί είναι εγκατεστημένες 13 μονάδες αφαλάτωσης μέσω αντίστροφης ώσμωσης συνολικής δυναμικότητας 8.340m<sup>3</sup>/ημέρα. Οι δώδεκα από αυτές τις μονάδες διαθέτουν

σύστημα ανάκτησης ενέργειας βασισμένο σε στροβίλους, ενώ η πιο καινούρια μονάδα διαθέτει πιο εξελιγμένο σύστημα ανάκτησης ενέργειας.



**Εικόνα 42: Θέσεις εγκατάστασης και λειτουργίας μονάδων αφαλάτωσης στη Σύρο (Kartalidis, Tzen, Kampragkou, & Assimacopoulos, 2016)**

Οι δεκατρείς μονάδες είναι συγκεντρωμένες στα παραπάνω πέντε σημεία του νησιού, προκειμένου το παραγόμενο νερό να διοχετεύεται κατά τον δυνατόν κοντύτερα προκειμένου να περιορίζεται το λειτουργικό κόστος. Η δε δυναμικότητα κάθε μονάδας κυμαίνεται από 250 έως 2.000m<sup>3</sup>/ημέρα.

Σύμφωνα με τους Kartalidis et al. (2016) το συνολικό λειτουργικό κόστος του παραγόμενου πόσιμου νερού είναι της τάξης των 1,2€/m<sup>3</sup> έως 1,6€/m<sup>3</sup>, με το κόστος της ενέργειας να αντιπροσωπεύει περίπου το 45% αυτού, ήτοι περίπου τα 0,7€/m<sup>3</sup>. Σημειώνεται πως η συνολική ηλεκτρική ισχύς των παραπάνω δεκατριών μονάδων φτάνει στα περίπου 2MW<sub>el</sub>(Kartalidis, etal., 2016).



***Εικόνα 43: Μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης Αλμυρού Ποταμού Κρήτης (ΕΦΣΥΝ, 2018)***

Η μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης Αλμυρού Ποταμού Κρήτης είναι ένα από τα πλέον σημαντικά έργα υποδομών του Δήμου Μαλεβιζίου, προϋπολογισμού μαζί με τα δίκτυα 3.000.000 ευρώ, με χρηματοδότηση από το ΕΣΠΑ, το οποίο δίνει τη λύση σε ολόκληρο τον πρώην Δήμο Γαζίου, στο τεράστιο πρόβλημα που αντιμετωπίζει η Κρήτη, αυτό της λειψυδρίας. Η επέκταση της υπάρχουσας μονάδας αφαλάτωσης η οποία λειτουργεί από το 2014, θα γίνει από την ανάδοχο εταιρεία «SYCHEM» και στη σύμβαση προβλέπεται η προμήθεια και εγκατάσταση νέας μονάδας δυναμικότητας 3.000 κυβικών ανά ημέρα (με δυνατότητα αύξησης) καθώς και η πενταετής λειτουργία της μονάδας (ΕΦΣΥΝ, 2018).

Το σύνολο των δυο μονάδων, θα έχει δυναμικότητα 6.000 περίπου κυβικών μέτρων και θα καλύπτει πλήρως τις ανάγκες του Δήμου Μαλεβιζίου με πόσιμο νερό υψηλής ποιότητας, ακόμα και μέσα στην θερινή τουριστική περίοδο(ΕΦΣΥΝ, 2018)..



Τα έργα υποδομής και δικτύων τα οποία ήδη κατασκευάζονται, θα μπορούν να καλύψουν την εύκολη μελλοντική επέκταση της μονάδας μέχρι και για 15.000 κυβικά/ημέρα, με απλή προσθήκη μηχανολογικού εξοπλισμού. Η δε ανάδοχος εταιρεία, θα συντηρεί και θα λειτουργεί την μονάδα με σταθερή τιμή για 5 έτη στα 0,16 €/m<sup>3</sup> και με δεσμευτική κατανάλωση ενέργειας στην 1 kWh/m<sup>3</sup>, κάτι το οποίο δίνει τη δυνατότητα στη Δημοτική Αρχή να εξετάσει ακόμα και την μείωση της τιμής χρέωσης προς τους δημότες(ΕΦΣΥΝ, 2018). .

Σημειώνεται ότι η μονάδα θα αποτελεί και το μεγαλύτερο εγκατεστημένο συγκρότημα αφαλάτωσης, με σκοπό την ύδρευση, σε όλη την Ελλάδα και το σημαντικότερο έργο του νόμου Ηρακλείου, όσον αφορά την αντιμετώπιση της λειψυδρίας. Με τη νέα επεκταμένη μονάδα, θα καλύπτονται εκτός από το Γάζι και τη Ροδιά, το Παλαιόκαστρο, το Μαδέ, η Λυγαριά και η Αγία Πελαγία(ΕΦΣΥΝ, 2018). .

Στην Μύκονο κατόπιν ενεργειών της δημοτικής αρχής έγινε η προμήθεια δύο φορητών μονάδων αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης ελάχιστης παραγωγής 1000m<sup>3</sup> ανά ημέρα η κάθε μία. Οι μονάδες συμβάλουν στην διασφάλιση της απρόσκοπτης υδροδότησης του νησιού και θα εγκατασταθούν στο Παλιό Λιμάνι (Υποδομές, 2021).

## Συμπεράσματα

Το ολοένα αυξανόμενο, παγκόσμιο πρόβλημα κάλυψης της ζήτησης νερού, συμπεριλαμβανόμενης της κάλυψης της ζήτησης νερού με νερό το οποίο πληροί αυστηρά ποιοτικά κριτήρια οδήγησε στη λήψη μέτρων και στον σχεδιασμό πολιτικών για τη βιώσιμη διαχείριση των υδάτινων πόρων. Επιπρόσθετα, στα πλαίσια ανάγκης όχι μόνον κάλυψης της ζήτησης του νερού αλλά γενικά επιβράδυνσης της κλιματικής αλλαγής σημειώνεται μία γενική στροφή σε μοντέλα βιώσιμης ανάπτυξης, στα οποία εντάσσονται οι στρατηγικές βιώσιμης διαχείρισης των υδάτινων πόρων. Η διασφάλιση της ποιότητας του πόσιμου νερού προς ανθρώπινη κατανάλωση διασφαλίζεται στην Ευρωπαϊκή Ένωση με την οδηγία πλαίσιο 2020/2184/EC.

Η αφαλάτωση και οι διάφορες τεχνολογίες αφαλάτωσης βρίσκουν ευρεία εφαρμογή τα τελευταία χρόνια. Συγκεκριμένα αφορά την παραγωγή πόσιμου νερού από το θαλασσινό νερό και τα αποθέματα υφάλμυρων υδάτων, τόσο για την βελτίωση της κάλυψης της ζήτησης και της ποιότητας του πόσιμου νερού, όσο και για την παραγωγή νερού για όλο το φάσμα των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Οι εξελίξεις στην τεχνολογία των μεμβρανών, η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η διαρκής αύξηση της παγκόσμιας δυναμικότητας παραγωγής πόσιμου νερού μέσα από μονάδες αφαλάτωσης έχουν οδηγήσει στη συμπίεση του κόστους του παραγόμενου καθαρού νερού και στην περαιτέρω διείσδυση των τεχνολογιών αφαλάτωσης σε όλο τον κόσμο. Η αξία της αφαλάτωσης τεκμαίρεται από το ότι παράγεται πόσιμο νερό για περιοχές που υποφέρουν από λειψυδρία και έχουν πρόσβαση μόνο σε αλμυρό ή υφάλμυρο νερό.

Από τα ευρήματα της παρούσης διαφαίνεται ότι υπάρχει σημαντικό εύρος τεχνολογιών και μεθόδων αφαλάτωσης, οι οποίες διαχωρίζονται στις θερμικές μεθόδους, τις μεθόδους μεμβρανών, με τις πρώτες να εφαρμόζονται σε ευρύτερη κλίμακα (91% του συνόλου των εγκαταστάσεων στην Ευρωπαϊκή Ένωση). Η εξέλιξη της τεχνολογίας τους, η διεθνής εμπειρία και το χαμηλό κόστος λειτουργίας τους σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες έχουν συμβάλλει στην επικράτησή τους. Συγκεκριμένα τα συστήματα πολυβάθμιας αφαλάτωσης, που είναι η δεύτερη

τεχνολογία που εφαρμόζεται σε μεγάλη κλίμακα, απαιτούν περίπου 83-84 kWh/m<sup>3</sup> ενέργειας, ενώ μεγάλης κλίμακας συστήματα αντίστροφης όσμωσης απαιτούν 3-5 kWh/ m<sup>3</sup> για αλατούχο νερό και 0,5-2,6 kWh/m<sup>3</sup> για υφάλμυρο νερό. Σύμφωνα με νέα στοιχεία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, η εξέλιξη της τεχνολογίας αντίστροφης όσμωσης και τα μέτρα ενεργειακής απόδοσης οδήγησαν σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των συστημάτων αντίστροφης όσμωσης στα 1,5 kWh/m<sup>3</sup>, για την διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης, χωρίς να ληφθούν υπόψη οι υπόλοιπες απαιτούμενες διεργασίες για την αφαλάτωση όπως το κόστος άντλησης και η προεπεξεργασία. Σημειώνεται πως το κόστος της αντίστροφης όσμωσης ανέρχεται στο 71% του συνόλου της κατανάλωσης μίας εγκατάστασης αφαλάτωσης με την χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας.

Οι μεμβράνες αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της έμφραξης με αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου ζωής τους και την αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας. Ειδικά σε ό,τι αφορά στα χαρακτηριστικά του νερού τα οποία καθορίζουν και επηρεάζουν τη διαδικασία λήψης απόφασης για την εκλογή της καταλληλότερης μεθόδου προεπεξεργασίας. Οι τεχνολογίες προεπεξεργασίας επικεντρώνονται στην μείωση του φορτίου αλάτων προς τις μεμβράνες. Συγκεκριμένα αφορούν στη μείωση της θολότητας του νερού η οποία επιτυγχάνεται μέσω άντλησης από υπόστρωμα νερού και όχι από την επιφάνεια, τεχνολογιών κροκίδωσης, διήθησης και την απαλλαγή από μικροοργανισμούς για την αποφυγή σχηματισμού βιοφίλμ επί των μεμβρανών. Τα υβριδικά συστήματα μεμβρανών μέσω σταδίου εμπρόσθιας όσμωσης, που προηγούνται της αντίστροφης όσμωσης έρχονται να μειώσουν περαιτέρω το φορτίο προς της μεμβράνες. Ακόμη μέσω της αποτελεσματικής χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, επιτυγχάνεται η μείωση ή ακόμη και η εκμηδένιση εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου και της κατανάλωσης ενέργειας.

Οι περιβαλλοντικές συνέπειες της άλμης δεν είναι αμελητέες. Η άλμη μπορεί να είναι επιβλαβής για το περιβάλλον λόγω της αλατότητας, της θερμοκρασίας και των χημικών ουσιών της.. Η αλατότητα άλμης είναι 1,6-2 φορές υψηλότερη από την αλατότητα θαλασσινού νερού (35g / L). Η απόρριψη της άλμης στην θάλασσα από πολλές εγκαταστάσεις μπορεί να έχει ως συνέπεια την αύξηση της αλατότητας του νερού. Αυτή η διαταραχή οδηγεί σε αφυδάτωση των κυττάρων, μείωση του

στροβιλισμού και τελικά μπορεί να οδηγήσει σε εξαφάνιση των ειδών μακροπρόθεσμα. Επιπλέον άλμη που παράγεται κυρίως με θερμικές μεθόδους και έχει υψηλότερη θερμοκρασία (π.χ. 30-40 ° C) από το θαλασσινό νερό περιβάλλοντος μπορεί να έχει αρκετές επιβλαβείς επιπτώσεις στη θαλάσσια ζωή. Η τοξικότητα των μετάλλων και των χημικών αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Επιπλέον, διάφορα βαρέα μέταλλα, όπως ο χαλκός Cu και το νικέλιο Ni, μπορεί να γίνουν μέρος της ροής άλμης λόγω του ότι τα κράματά τους χρησιμοποιούνται ως εναλλάκτες θερμότητας. Η άλμη από ένα μόνο εργοστάσιο αφαλάτωσης δεν θα επηρεάσει αρνητικά το θαλάσσιο περιβάλλον, αλλά άλμη από πολλά εργοστάσια που λειτουργούν στην ίδια περιοχή για μεγάλο χρονικό διάστημα θα μπορούσαν να δημιουργήσουν αρνητικές επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον. Ο Αραβικός Κόλπος λόγω της χρόνιας λειτουργίας εγκαταστάσεων αφαλάτωσης μεγάλης κλίμακας έχει να επιδείξει σωρεία αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων με την αύξηση της αλατότητας του θαλασσινού νερού και την συγκέντρωση ιζημάτων βαρέων μετάλλων, με εμφανείς επιπτώσεις στο θαλάσσιο οικοσύστημα. Έχοντας υπόψη τα παραπάνω σχεδιάζεται σύστημα απόρριψης της άλμης με μία από τις παρακάτω μεθόδους να προκρίνεται επιφανειακή απόθεση της άλμης, εναπόθεση στο σύστημα αποχέτευσης, έγχυση σε βαθιά πηγάδια, εναπόθεση επί του εδάφους. Η πρώτη συγκεντρώνει και το μεγαλύτερο ποσοστό διαχείρισης της άλμης παγκοσμίως (90%), ωστόσο είναι σημαντικός ο σχεδιασμός του συστήματος κάθε φορά για τον μετριασμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ξεχωριστό παράδειγμα αποτελεί η Αυστραλία η οποία μέσω της μελέτης των ρευμάτων καταφέρνει να εξαλείψει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της άλμης.

Η μέθοδος της αφαλάτωσης στη μεσογειακή περιοχή, είναι μια βασική τεχνολογία για την παροχή δημόσιας ύδρευσης (82% της συνολικής παροχής της Ε.Ε.). Στην παρούσα διπλωματική εξετάστηκαν οι εφαρμογές αφαλάτωσης στην Κύπρο, στην Ισπανία και στην Ελλάδα. Στην Κύπρο λειτουργούν οι εγκαταστάσεις Δεκελείας, Λεμεσού, ΑΗΚ Βασιλικού, Λάρνακας, Πάφου δυναμικότητας αντίστοιχα 60.000m<sup>3</sup>/ημέρα, 40.000 m<sup>3</sup>/ημέρα, 60.000 m<sup>3</sup>/ημέρα, 60.000 m<sup>3</sup>/ημέρα, 15.000 m<sup>3</sup>/ημέρα. Στην Ισπανία ξεχωρίζουν οι μονάδες Campode Dalías με δυναμικότητα 100,000 m<sup>3</sup>/ημέρα, Marina Baja με δυναμικότητα 50,000 m<sup>3</sup>/ημέρα και η Costa del

SoI με δυναμικότητα  $m^3/ημέρα$ . Πολλές χρησιμοποιούν νερό που προέρχεται από λύματα όπως η εγκατάσταση San Javier με δυναμικότητα  $30,000 m^3/ημέρα$ , η εγκατάσταση Los Alcázares ( $22,500 m^3/ημέρα$ ) και η εγκατάσταση Hellín με δυναμικότητα  $12,500 m^3/ημέρα$ . Το επεξεργασμένο νερό από λύματα χρησιμοποιείται για άρδευση. Στην Ελλάδα ξεχωρίζει μια επιτυχημένη μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης, η οποία τροφοδοτείται με ενέργεια παραγόμενη από ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε λειτουργία στο νησί της. Η εγκατάσταση αποτελείται από τρεις παρόμοιες μονάδες αντίστροφης ώσμωσης με συνολική δυναμικότητα  $3360 m^3/ημέρα$  και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, περί των  $3,5 kWh/m^3$ ). Η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από μία ανεμογεννήτρια ισχύος  $850 kW$ . Στην Σαντορίνη υπάρχουν δέκα εγκαταστάσεις αντίστροφης όσμωσης συνολική δυναμικότητα αφαλατωμένου νερού στο νησί να κυμαίνεται στα  $6.700 m^3/ημέρα$ . Το 2018 ξεκίνησε η κατασκευή μίας νέας μεγάλης κλίμακας μονάδας αφαλάτωσης, η δυναμικότητα της οποίας αναμένεται να φτάσει στα  $5.000 m^3/ημέρα$  έως  $7.500 m^3/ημέρα$ . Στο νησί της Σύρου είναι εγκατεστημένες 13 μονάδες αφαλάτωσης μέσω αντίστροφης ώσμωσης συνολικής δυναμικότητας  $8.340 m^3/ημέρα$ . Στον Αλμυρό Ποταμό Κρήτης η νέα μονάδα που κατασκευάζεται θα έχει δυναμικότητα  $6.000$  περίπου κυβικών μέτρων, θα χρησιμοποιεί υφάλμυρο νερό και θα έχει κατανάλωση μόλις  $1 kWh/m^3$  παραγόμενου νερού. Στην Μύκονο έγινε η προμήθεια δύο φορητών μονάδων αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης ελάχιστης παραγωγής  $1000 m^3$  ανά ημέρα η κάθε μία.

Καταληκτικά, η αφαλάτωση είναι μία αποτελεσματική λύση παροχής πόσιμου νερού σε άγονες περιοχές, οι οποίες συνήθως τυγχάνει να είναι και τουριστικές (95% του συνόλου των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης στην Ε.Ε. αφορούν τουριστικές περιοχές σύμφωνα με Eur Eau) και ιδιαίτερα στην χώρα μας, που στο σύνολό τους αφορούν κυρίως την εξυπηρέτηση νησιών, τα οποία έχουν περιορισμένη πρόσβαση σε υδάτινους πόρους. Η κατανάλωση ενέργειας και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που συνεπάγεται αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για την εφαρμογή της μεθόδου. Με το βλέμμα στο μέλλον, η αφαλάτωση θα κερδίζει συνεχώς έδαφος, κυρίως λόγω της κλιματικής αλλαγής καθώς εντείνονται τα φαινόμενα ξηρασίας και περιορίζονται τα αποθέματα

υδάτινων πόρων. Η δυνατότητα για συνδυασμό της αφαλάτωσης με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθιστά την μέθοδο σύμφωνη με την βιώσιμη ανάπτυξη καθώς μειώνεται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και περιορίζεται το λειτουργικό κόστος. Η συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αλλά και της αφαλάτωσης θα αυξήσει σημαντικά το μερίδιο της μεθόδου στην παροχή πόσιμου νερού στην χώρα μας αλλά και παγκοσμίως.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

Adak, A., & Tewari, P. (2014). Technical feasibility study for coupling a desalination plant to an Advanced Heavy Water Reactor. *Desalination*, 337, 76-82.

Ashley. (2018). *Financing water in 28 European Countries: Baseline Report*. European Commission.

Ashraf, M., Maah, M., Qureshi, A., Gharibreza, M., & Yusoff, I. (2013). Synthetic polymer composite membrane for the desalination of saline water, , 51:16-18, . *Desalination and Water Treatment*, 51 (16-18), 3650-3661.

Atab, S. M., Smallbone, A., & Roskilly, A. (2016). An operational and economic study of a reverse osmosis desalination system for potable water and land irrigation. *Desalination*, 397, 174-184.

Bank of Greece. (2011). *The environmental, economic, and social impacts of climate change*. Athens: Bank of Greece.

Beal, C. D., Stewart, R. A., & Fielding, K. (2013). A novel mixed method smart metering approach to reconciling differences between perceived and actual residential end use water consumption. *Journal of Cleaner Production*, 60, 116-128.

Belila, A., El-Chakhtoura, J., Otaibi, N., Muyzer, G., Gonzalez-Gil, G., Saikaly, P., et al. (2016). Bacterial community structure and variation in a full-scale seawater desalination plant for drinking water production. *Water Research*, 94, 62-72.

Ben-Dov, E., Ben-David, E., Messalem, R., Herzberg, M., & Kushmaro, A. (2015). Biofilm formation on RO membranes: the impact of seawater pretreatment. *Desalination and Water Treatment*, 57 (11), 4741-4748.

Burek, P., Satoh, Y., Fischer, G., Kahil, M., Scherzer, A., Tramberend, S., et al. (2016). *Water Futures and Solution: Fast Track Initiative (Final Report)* . Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA).

Camesano, T., & Logan, B. E. (1998). Influence of fluid velocity and cell concentration on the transport of motile and nonmotile bacteria in porous media. *Environmental science & technology*, 32 (11), 1699-1708.

Campione, A., Gurreri, L., Ciofalo, M., Micale, G., Tamburini, A., & Cipollina, A. (2018). Electrodialysis for water desalination: A critical assessment of recent developments on process fundamentals, models and applications. *Desalination*, 434, 121-160.

Creber, S., Pintelon, T., von der Schulenburg, D. G., Vrouwenvelder, J., van Loosdrecht, M., & Johns, M. (2010). Magnetic resonance imaging and 3D simulation studies of biofilm accumulation and cleaning on reverse osmosis membranes. *Food and Bioproducts Processing*, 88, 401-408.

Cyclades Voice. (2018). *Σαντορίνη: Νέα μονάδα αφαλάτωσης για την Οία*. Retrieved Ιούνιος 21, 2021, from <https://www.cycladesvoice.gr/?aid=82234>

Drews, A. (2010). Membrane fouling in membrane bioreactors—Characterisation, contradictions, cause and cures. *Journal of Membrane Science*, 363 (1-2), 1-28.

Ebrahim, S., & Abdel-Jawad, M. (1994). Economics of seawater desalination by reverse osmosis. *Desalination*, 99 , 39-55 .

Eke, J., Yusuf, A., Giwa, A., & Sodiq, A. (2020). The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity. , , p.114633. *Desalination*, 495, 1-17.

El-Dessouky, H. T., & Ettouney, H. M. (2002). Chapter 6 - Multi-Stage Flash Desalination. In H. T. El-Dessouky, & H. M. Ettouney (Eds.), *Fundamentals of Salt Water Desalination* (pp. 271-407). Elsevier .

EurEau. (2017 ). *Europe's water in figures: An overview of the European drinking water and waste water sectors, 2017 edition*. EurEau: The European Federation of National Associations of Water Services. EurEau.



European Commission . (2018). *Commission Staff Working Document Impact Assessment, Accompanying the document Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the quality of water intended for human consumption (recast). Document SWD(2017) 449 final*. European Commission .

EuropeanCommission . (2020) .  
"Σχετικά με την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης" οδηγία 2020/2184

EuropeanCommission . (2016). *Eighth Report on the Implementation Status and the Programmes for Implementation of the Urban Waste Water Directive (COM (2016)105 final) and Commission Staff Working Document accompanying the report*. European Commission .

European Commission. (2006). *Bathing Water Directive (2006/7/EC)*. European Commission.

European Commission. (2000). *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the Community action in the field of water policy*. European Commission.

European Commission. (1998). *Drinking Water Directive (98/83/EC)*. European Commission.

European Commission. (1991). *Nitrates Directive (91/676/EEC)*. European Commission.

European Commission. (1991). *Urban Waste Water Directive (91/271/EEC)*. European Commission.

Gambier, A., & Badreddin, E. (2009 ). Control of small reverse osmosis desalination plants with feed water bypass. *IEEE Control Applications, (CCA) & Intelligent Control, (ISIC)* , 800-805.

Gikas, P., & Angelakis, A. (2009). Water resources management in Crete and in the Aegean Islands, with emphasis on the utilization of non-conventional water sources. *Desalination*, 248 (1-3), 1049-1064.

Goh, P., Ismail, A., & Hilal, N. (2016). Nano-enabled membranes technology: Sustainable and revolutionary solutions for membrane desalination? *Desalination*, 380, 100-104.

Habimana, O., Correia-Semião, A. J., & Casey, E. (2014). The role of cell-surface interactions in bacterial initial adhesion and consequent biofilm. *Journal of Membrane Science*, 454, 82-96.

Henthorne, L., & Boysen, B. (2015). State-of-the-art of reverse osmosis desalination pretreatment. *Desalination*, 356, 129-139.

ITA Group. (2021). *Desalination of seawater to potable using Wind power by «Aeoliki Milou S.A.»*, member of ITA Group. Retrieved Ιούνιος 10, 2021, from <https://ita-sa.gr/αφαλάτωση?lang=en>

Jaber, I., & Ahmed, M. (2004). Technical and economic evaluation of brackish groundwater desalination by reverse osmosis (RO) process. *Desalination*, 165, 209–213.

Jiang, S., Li, Y., & Ladewig, B. (2017). A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies. *Science of The Total Environment*, 595, 567-583.

Kalogirou, S. A. (2014). Chapter 8 - Solar Desalination Systems. In S. A. Kalogirou (Ed.), *Solar Energy Engineering* (pp. 431-479). Elsevier .

Kampragou, E., Lekkas, D. F., & Assimacopoulos, D. (2011). Water demand management: implementation principles and indicative case studies. *Water and Environment Journal*, 25 (4), 466-476.

Kang, S., Subramani, A., Hoek, E., Deshusses, M., & Matsumoto, M. (2004). Direct observation of biofouling in cross-flow microfiltration: mechanisms of deposition and release. *Journal of Membrane Science*, 244 (1-2), 151-165.

Karagiannis, I., & Soldatos, P. (2008). Water desalination cost literature: review and assessment. *Desalination*, 223 (1–3), 448–456.

Kartalidis, A., Tzen, E., Kampragkou, E., & Assimacopoulos, D. (2016). Responding to water challenges in Greece through desalination: energy

considerations. *International Journal of Water Resources Development*, 32 (3), 428-441.

Khan, M., Danielsen, S., Johansen, K., Lorenz, L., Nelson, S., & Camper, A. (2014). Enzymatic cleaning of biofouled thin-film composite reverse osmosis (RO) membrane operated in a biofilm membrane reactor. *The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, 30 (2), 153-167.

Khan, Q., Maraqa, M. A., & Mohamed, A.-M. O. (2021). Chapter 17 - Inland desalination: techniques, brine management, and environmental concerns. In Q. Khan, M. A. Maraqa, & A.-M. O. Mohamed (Eds.), *Pollution Assessment for Sustainable Practices in Applied Sciences and Engineering* (pp. 871-918). Butterworth-Heinemann.

Khoukhi, B., Tadjine, M., & Boucherit, M. S. (2015). Nonlinear observer to estimate polarization phenomenon in membrane distillation. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, 6, 1-8.

Kolokytha, E., Mylopoulos, Y., & Mentis, A. (2002). Evaluating demand management aspects of urban water policy—A field survey in the city of Thessaloniki, Greece. *Urban Water*, 4, 391–400 .

Kopnina, H., & Washington, H. (2016). Discussing why population growth is still ignored or denied. *Chinese Journal of Population Resources and Environment*, 14, 133–143.

Leterme, S., Le Lan, C., Hemraj, D., & Ellis, A. (2016). The impact of diatoms on the biofouling of seawater reverse osmosis membranes in a model cross-flow system. *Desalination*, 392, 8-13.

Loutatidou, S., Chalermthai, B., Marpu, P. R., & Arafat, H. A. (2014). Capital cost estimation of RO plants: GCC countries versus southern Europe. *Desalination*, 347, 103-111.

Matin, A., Khan, Z. A., Zaidi, J., & Boyce, M. C. (2011). Biofouling in Reverse Osmosis Membranes for Seawater Desalination: Phenomena and Prevention. *Desalination* , 281, 1-16.

Mekonnen, M., & Hoekstra, A. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. , 2(2), e1500323. doi: 10.1126/sciadv.1500323. *Science Advances*, 2 (2), 1-6.

Molina, V., & Casañas, A. (2010). Reverse osmosis, a key technology in combating water scarcity in Spain. *Desalination*, 250 (3), 950-955.

Nguyen, N., Nguyen, H., Ho, S., Chen, S., Ngo, H., Guo, W., et al. (2016). Exploring high charge of phosphate as new draw solute in a forward osmosis–membrane distillation hybrid system for concentrating high-nutrient sludge. *Science of The Total Environment*, , pp.44-50., 557-558, 40-50.

OECD . (2013). *Water and Climate Change Adaptation: Policies to Navigate Uncharted Waters*, OECD Publishing. Paris: OECD .

OECD. (2012). *Environmental Outlook to 2050: The consequences of Inaction: Key Findings on Water*. Retrieved Δεκέμβριος 9, 2020, from <https://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/49844953.pdf>

Piccininni, F., Virk, G. S., & Scialpi, T. (2007). Stand-Alone Solar Desalination Plant . Agios Nikolaos, Greece: Proceedings of the 3rd IASME/WSEAS Int. Conf. on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development.

Qasim, M., Badrelzaman, M., Darwish, N. N., Darwish, N. A., & Hilal, N. (2019). Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review. *Desalination*, 459, 59-104.

Sanmartino, J., Khayet, M., & García-Payo, M. (2016). Desalination by Membrane Distillation. In *Emerging Membrane Technology for Sustainable Water Treatment* (pp. 77-109).

She, Q., Jin, X., Li, Q., & Tang, C. Y. (2012). Relating reverse and forward solute diffusion to membrane fouling in osmotically driven membrane processes. *Water Research*, 7 (1), 2478-2486.

Spellman, R. F. (2015). *The Science of Water Concepts and Applications* (3 ed.). CRC Press.

Tang, F., Hu, H., S. L., Sun, Y., Shi, N., & Crittenden, J. (2016). Fouling characteristics of reverse osmosis membranes at different positions of a full-scale plant for municipal wastewater reclamation. *Water Research, 90*, 329-336.

Task Committee on Sustainability Criteria, Water Resources Planning and Management Division, ASCE and the Working Group of UNESCO/IHP IV Project M-4.3. (1998). *Sustainability Criteria for Water Resource Systems*. Reston: American Society of Civil Engineers.

TEMAK. (2009). *NEW DESALINATION PLANT IN THIRA*. Retrieved Ιούλιος 20, 2021, from <https://www.temak.gr/site/news/thira/>

Tewari, P., & Rao, I. (2002). LTE desalination utilizing waste heat from a nuclear research reactor . *Desalination, 150*, 45-49.

United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2019). *World Urbanization Prospects The 2018 Revision*. New York: United Nations Department of Economic and Social Affairs.

Villacorte, L. O. (2014). *Algal Blooms and Membrane Based Desalination Technology* (1 ed.). Delft: Taylor & Francis Group.

Wada, Y., Flörke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, S., et al. (2016). Modelling global water use for the 21st century: The Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches. *Geoscientific Model Development, 9*, 175–222 .

Walker, S., Mattausch, P., & Abbott, A. (2007). Reverse Osmosis Treatment Facilities: Innovative Post-Treatment Stabilization Solutions. *Florida Water Resources Journal* , 35-37.

Weinrich, L., LeChevallier, M., & Haas, C. (2016). Contribution of assimilable organic carbon to biological fouling in seawater reverse osmosis membrane treatment. *Water Research, 101*, 203-213.

World Water Assessment Programme (Nations Unies). (2018). *The United Nations World Water Development Report 2018 (United Nations Educational,*

*Scientific and Cultural Organization*). New York: World Water Assessment Programme (Nations Unies).

Xenos, D., Passios, I., Georgiades, S., Parlis, E., & Koutsoyiannis, D. (2002). Water demand management and the Athens water supply. (pp. 44–50). Sofia: Proceedings of the 7th BNAWQ Scientific and Practical Conference "Water Quality Technologies and Management in Bulgaria.

Youssef, P. G., AL-Dadah, R., & Mahmoud, S. M. (2014). Comparative Analysis of Desalination Technologies. *Energy Procedia*, 61, 2604 – 2607.

Yu, H., Kuang, W., Liu, Z., Kang, G., Jie, X., Jin, Y., et al. (2016). Investigation of internal concentration polarization reduction in forward osmosis membrane using nano-CaCO<sub>3</sub> particles as sacrificial component. *Journal of Membrane Science*, 497, 485-493.

Zarzo, D., Campos, E., & Terrero, P. (2012). Spanish experience in desalination for agriculture. *Desalination and Water Treatment*, 51 (1-3), 53-66.

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

Μουτάφης, Π. (2008). *Κάλυψη της ζήτησης ενέργειας και νερού με αιολική ενέργεια και αφαλάτωση στη νήσο Σίκινο*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο.

Μυλόπουλος, Α. (2000). *Βιώσιμη Διαχείριση Υδατικών Πόρων*. Θεσσαλονίκη: Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

Kujawa, J., Cerneaux, S., Kujawski, W., Knozowska, K., 2017. Hydrophobic ceramic membranes for water desalination. *Appl. Sci.* 7 (4). <https://doi.org/10.3390/app7040402>.

Ladewig, B., Asquith, B., 2011. *Desalination Concentrate Management*. Springer Science & Business Media.

Lattemann, S., Höpner, T., 2008. Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination* 220 (1–3), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.03.009>.

Lewis, A.E., Nathoo, J., Thomsen, K., Kramer, H.J., Witkamp, G.J., Reddy, S.T., Randall, D.G., 2010. Design of a Eutectic Freeze Crystallization process for multicomponent wastewater stream. *Chem. Eng. Res. Des.* 88 (9), 1290–1296. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.01.023>.

Leyland, D., Chivavava, J., Lewis, A.E., 2019. Investigations into ice scaling during eutectic freeze crystallization of brine streams at low scraper speeds and high supersaturation.

*Sep.Purif. Technol.* 220, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.03.025>.

Li, H., Shi, A., Li, M., Zhang, X., 2013. Effect of pH, temperature, dissolved oxygen, and flow rate of overlying water on heavy metals release from storm sewer sediments. *Journal of Chemistry* <https://doi.org/10.1155/2013/434012>.

Li, Z., Valladares Linares, R., Bucs, S., Aubry, C., Ghaffour, N., Vrouwenvelder, J.S., Amy, G., 2015. Calcium carbonate scaling in seawater desalination by ammonia–carbon dioxide forward osmosis: mechanism and implications. *J.Membr. Sci.* 481, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.12.055>.

Li, Y., Zhao, Y., Tian, E., Ren, Y., 2018. Preparation and characterization of novel forward osmosis membrane incorporated with sulfonated carbon nanotubes. *RSC Adv.* (71) <https://doi.org/10.1039/C8RA08900K>.

Liden, T., Carlton, D.D., Miyazaki, S., Otoyoy, T., Schug, K.A., 2019, February 25. Forward osmosis remediation of high salinity Permian Basin produced water from unconventional oil and gas development. *Sci. Total Environ.* 653, 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.325>.

Lior, N., Kim, D., 2018. Quantitative sustainability analysis of water desalination – a didactic example for reverse osmosis. *Desalination* 431, 157–170. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.12.061>.

Liu, J., Yuan, J., Ji, Z., Wang, B., Hao, Y., Guo, X., 2016. Concentrating brine from seawater desalination process by nanofiltration–electrodialysis integrated

membrane technology. *Desalination* 390, 53–61.  
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.03.012>.

Liu, C., Chen, L., Zhu, L., 2018. Fouling mechanism of hydrophobic polytetrafluoroethylene (PTFE) membrane by differently charged organics during direct contact membrane distillation (DCMD) process: an especial interest in the feed properties. *J. Membr. Sci.* 548, 125–135.  
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.11.011>.

Liyanaarachchi, S., Shu, L., Muthukumaran, S., Jegatheesan, V., Baskaran, K., 2013. Problems in seawater industrial desalination processes and potential sustainable solutions: a review. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 13 (2), 203–214.  
<https://doi.org/10.1007/s11157-013-9326-y>.

Lokare, O.R., Tavakkoli, S., Khanna, V., Vidic, R.D., (2018) Importance of feed recirculation for the overall energy consumption in membrane distillation

Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων Κύπρου, (2021), Μονάδες Αφαλάτωσης  
[http://www.moa.gov.cy/moa/wdd/wdd.nsf/page23\\_gr/page23\\_gr?opendocument](http://www.moa.gov.cy/moa/wdd/wdd.nsf/page23_gr/page23_gr?opendocument)

Εφημερίδα των Συντακτών, (2018), «Επεκτείνεται η μονάδα αφαλάτωσης του Αλμυρού Ποταμού»

[https://www.efsyn.gr/efkriti/koinonia/163533\\_epekteinetai-i-monada-afalatosis-toy-almyro-y-potamoy](https://www.efsyn.gr/efkriti/koinonia/163533_epekteinetai-i-monada-afalatosis-toy-almyro-y-potamoy)

Olsson G. (2012). *Water and Energy: Threats and Opportunities*

Magagna, D., Hidalgo González, I., Bidoglio, G., Peteves, S. (2019), *Water Energy Nexus in Europe*

Υpodomes.com (2021), “Δύο φορητές μονάδες αφαλάτωσης αποκτά η Μύκονος” διαθέσιμο από: <https://ypodomes.com/dyo-forites-monades-afalatosis-apokta-i-mykonos/>

Williams, R.G., Follows, M.J., (2011). *Ocean Dynamics and the Carbon Cycle: Principles and Mechanisms*. Cambridge University Press.



Falkenberg, L.J., Styan, C.A., (2015). The use of simulated whole effluents in toxicity assessments: a review of case studies from reverse osmosis desalination plants. *Desalination* σελ. 368, 3–9. Διαθέσιμο από <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.01.014>.