



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ
ΑΤΤΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

«Σχεδιασμός και υλοποίηση μονάδων αφαλάτωσης μεγάλης κλίμακας με ΑΠΕ»

Συγγραφέας

Ευθυμιάδης Βασίλειος

ΑΜ: 461454603

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Κονδύλη Μ. Αιμιλία

Αθήνα, Οκτώβριος, 2023



**UNIVERSITY OF WEST
ATTICA SCHOOL
DEPARTMENT**

Diploma Thesis

Design and implementation of RES based desalination plants of large scale

Student name and surname: Vasileios Efthymiadis

Registration Number:

46145603

Supervisor name and surname:

Emilia M. Kondili

Athens, October, 2023



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ
ΑΤΤΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ**

Τίτλος εργασίας

«Σχεδιασμός και υλοποίηση μονάδων αφαλάτωσης μεγάλης κλίμακας με ΑΠΕ»

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

Α/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΑΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Κονδύλη Αιμιλία		
2	Παπαποστόλου Χριστιάννα		
3	Ζαφειράκης Δημήτριος		

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος/η Ευθυμιάδης Βασίλειος του Λαζάρου, με αριθμό μητρώου 46145603 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο/Η Δηλών/ούσα



Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, κλείνει ένας σημαντικό κύκλος στην εκπαιδευτική μου διαδρομή και σηματοδοτείται το άνοιγμα ενός νέου.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην Επιβλέπουσα Καθηγήτρια μου κ. Κονδύλη Αιμιλία για την υπομονή, υποστήριξη και την καθοδήγηση, εφόσον χωρίς τη συμβολή της, η παρούσα πτυχιακή εργασία δεν θα είχε ολοκληρωθεί.

Θερμά ευχαριστώ και την οικογένεια και τους φίλους μου, που στάθηκαν συνεχώς δίπλα μου.

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες, η αύξηση του πληθυσμού από κοινού με τις ανάγκες οικονομικής ανάπτυξης, έχουν οδηγήσει σε αυξημένη ζήτηση για νερό. Περαιτέρω, πέραν του ζητήματος της ραγδαίας αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού, ορισμένοι παράγοντες όπως η κλιματική αλλαγή και η παγκοσμιοποίηση εντείνουν την εκμετάλλευση των υδάτινων πόρων. Ωστόσο, οι υδάτινοι πόροι του πλανήτη παραμένουν σταθεροί, γεγονός που εγείρει ανησυχίες για την εξάντληση τους. Πολλές περιοχές του κόσμου πλήττονται από σημαντική έλλειψη νερού. Η αφαλάτωση έχει αναδυθεί ως μια τεχνολογικά και οικονομικά βιώσιμη λύση για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων. Τις τελευταίες δεκαετίες, οι τεχνολογίες αφαλάτωσης με βάση τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν προσελκύσει αυξημένο ενδιαφέρον. Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας ήταν η διερεύνηση του σχεδιασμού και υλοποίησης μονάδων αφαλάτωσης μεγάλης κλίμακας με ΑΠΕ. Από μεθοδολογικής σκοπιάς εκπονήθηκε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση μέσω αναζήτησης μελετών, άρθρων και λοιπών δημοσιεύσεων στις ηλεκτρονικές βάσεις αναζήτησης Academia, Scopus και Google Scholar. Ειδικότερα, εξετάστηκαν οι παράμετροι σχεδιασμού και διαστασιολόγησης, το κόστος εγκατάστασης και η οικονομική αξιολόγηση, ενώ διερευνήθηκε και η χρήση ενός εξειδικευμένου λογισμικού σχεδιασμού μονάδας αφαλάτωσης με ΑΠΕ. Συμπεραίνεται, ότι ένα σημαντικό εμπόδιο στην υλοποίηση μονάδων αφαλάτωσης, μεγάλης κλίμακας, που βασίζονται σε ΑΠΕ είναι η διαλείπουσα λειτουργία αυτών των πηγών ενέργειας, αλλά και το αυξημένο κόστος εγκατάστασης τους, εν συγκρίσει με μονάδες που τροφοδοτούνται από συμβατικές μορφές ενέργειας. Αναδεικνύεται λοιπόν η ανάγκη για την εκπόνηση περαιτέρω μελετών για την βελτιστοποίηση των υφιστάμενων συστημάτων, ενώ η χρήση τεχνητής νοημοσύνης ενδεχομένως θα μπορούσε να συμβάλει σημαντικά σε αυτή την κατεύθυνση.

Λέξεις-κλειδιά: αφαλάτωση, μονάδες αφαλάτωσης, μεγάλη κλίμακα, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργεια (ΑΠΕ), σχεδιασμός, υλοποίηση

Abstract

In recent decades, population growth coupled with the needs of economic development has led to an increased demand for water. Besides the rapid growth of the world population, certain factors such as climate change and globalization intensify the exploitation of water resources. However, the planet's water resources remain stable, raising concerns about their depletion. Many areas of the world are currently suffering from significant water shortages. Desalination has emerged as a technologically and economically viable solution to address these challenges. In recent decades, desalination technologies based on Renewable Energy Sources (RES) have attracted increased interest. The purpose of this thesis was to investigate the design and implementation of large-scale desalination units with RES. From a methodological point of view, a bibliographic review was conducted by searching for studies, articles and other publications on online academic databases Academia, Scopus and Google Scholar. In particular, the design and dimensioning parameters, the installation costs and the economic evaluation were examined, while the use of specialized design software was also investigated. It is concluded that a significant obstacle to the implementation of large-scale desalination units based on RES is the intermittent operation of these energy sources, but also the increased cost of their installation, compared to units powered by conventional forms of energy. The need for further studies to optimize existing systems is highlighted, while the use of artificial intelligence could potentially contribute significantly in this direction.

Keywords: desalination, desalination units, large scale, Renewable Energy Sources (RES), design, implementation

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη.....	6
Abstract	7
Πίνακας Περιεχομένων.....	8
Πίνακας Περιεχόμενων Εικόνων	10
Συντομογραφίες.....	12
Εισαγωγή.....	13
Κεφάλαιο 1. Υδάτινοι Πόροι & Έλλειψη Νερού.....	16
1.1 Έλλειψη νερού & παράγοντες που την προκαλούν.....	16
1.2 Μέθοδοι αντιμετώπισης έλλειψης νερού.....	19
1.2.1 Αποθήκευση νερού	20
1.2.2 Μεταφορά νερού.....	21
1.2.3 Υδροσυλλογή βρόχινου νερού	22
1.2.4 Η μέθοδος της αφαλάτωσης.....	22
Κεφάλαιο 2. Η Αφαλάτωση.....	23
2.1 Ορισμός & Ιστορική Αναδρομή.....	23
2.2 Τεχνολογίες αφαλάτωσης	26
2.2.1 Απόσταξη πολλαπλών βαθμίδων (MED).....	27
2.2.2 Εξάτμιση Πολλαπλής Φάσης (MSF).....	29
2.2.3 Συμπύεση Ατμού (VC)	30
2.2.4 Αντίστροφη Ώσμωση (RO).....	32
2.2.5 Νανοφιλτράρισμα (NF).....	34
2.2.6 Ηλεκτροδιάλυση (ED)	35
2.2.7 Απόσταξη μέσω μεμβρανών (MD)	36
Κεφάλαιο 3. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	38
3.1 Ορισμός & Ιστορική Αναδρομή.....	38
3.2 Είδη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	40
3.2.1 Ηλιακή ενέργεια.....	40
3.2.2 Υδροηλεκτρική ενέργεια.....	42
3.2.2 Αιολική ενέργεια.....	43
3.2.3 Γεωθερμική ενέργεια	43
3.2.4 Ενέργεια από βιομάζα (χημική/θερμική).....	43
3.2.5 Κυματική/ Παλιρροϊκή ενέργεια & θερμική ενέργεια από τους ωκεανούς	44
3.3 ΑΠΕ, Βιωσιμότητα & Κλιματική Αλλαγή.....	45

Κεφάλαιο 4. Χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε Μονάδες Αφαλάτωσης.....	47
4.1 Τεχνικές αφαλάτωσης μέσω ηλιακής ενέργειας.....	47
4.1.1 Ηλιακός αποστακτήρας (SSD).....	47
4.1.2 Ηλιακή καμινάδα	48
4.1.3 Ηλιακή λίμνη	49
4.1.4 Ύγρανση/αφύγρανση με ηλιακή ενέργεια.....	49
4.1.4 Αφαλάτωση μέσω ηλιακής διάχυσης.....	51
4.1.5 Ηλιακή απόσταξη μέσω μεμβρανών	52
4.1.6 Φωτοβολταϊκά/ Αντίστροφη ώσμωση.....	53
4.1.7 Παραβολικοί Συλλέκτες/MSF.....	53
4.1.8 Παραβολικοί Συλλέκτες/ MED.....	54
4.2 Τεχνικές αφαλάτωσης μέσω αιολικής ενέργειας.....	54
4.3 Τεχνικές αφαλάτωσης μέσω γεωθερμικής ενέργειας	55
4.4 Τεχνικές αφαλάτωσης μέσω ωκεανίας ενέργειας.....	56
4.5 Η αφαλάτωση με χρήση ΑΠΕ στην Ελλάδα και τον κόσμο.....	56
Κεφάλαιο 5. Σχεδιασμός & Υλοποίηση Μονάδων Αφαλάτωσης μεγάλης κλίμακας με ΑΠΕ	62
5.1 Προσέγγιση & αρχικό στάδιο σχεδιασμού.....	62
5.2 Σημαντικοί παράμετροι σχεδιασμού & διαστασιολόγησης.....	65
5.2.1 Παράμετροι μονάδας αφαλάτωσης	66
5.2.2 Παράμετροι μονάδας ΑΠΕ	66
5.3 Οικονομική αξιολόγηση μονάδας αφαλάτωσης.....	67
5.4 Κόστος για την εγκατάσταση της μονάδας αφαλάτωσης ΑΠΕ.....	69
5.4.1 Άμεσο κόστος για την εγκατάσταση της μονάδας αφαλάτωσης ΑΠΕ	69
5.4.2 Έμμεσο κόστος για την εγκατάσταση της μονάδας αφαλάτωσης ΑΠΕ	72
5.4.3 Λειτουργικό κόστος μονάδας αφαλάτωσης ΑΠΕ.....	72
5.5 Χρήση εξειδικευμένου λογισμικού για επιλογή κατάλληλης τεχνολογίας αφαλάτωσης με ΑΠΕ	74
Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	76
Βιβλιογραφία.....	78

Πίνακας Περιεχομένων Εικόνων

Εικόνα 1. Το φράγμα Hoover στον ποταμό Κολοράντο, Νεβάδα, ΗΠΑ (Ha & Schleiger, 2020)	20
Εικόνα 2. Ταξινόμηση τεχνολογιών αφαλάτωσης (προσαρμοσμένο από Alkaisi et al., 2017).	26
Εικόνα 3. Διάταξη μονάδας αφαλάτωσης με Εξάτμιση Πολλαπλής Επίδρασης (MED) (προσαρμοσμένο από Curto et al., 2021).....	28
Εικόνα 4. Διάταξη μονάδας αφαλάτωσης με Πολυβάθμια Εκτόνωση (MSF) (προσαρμοσμένο από Curto et al., 2021)	29
Εικόνα 5. Διάταξη μονάδας αφαλάτωσης με Μηχανική Συμπίεση Ατμού (MVC) (προσαρμοσμένο από Curto et al., 2021).....	31
Εικόνα 6. Διάταξη μονάδας αφαλάτωσης με Θερμική Συμπίεση Ατμού (TVC) (προσαρμοσμένο από Curto et al., 2021)	31
Εικόνα 7. Διάταξη μονάδας αφαλάτωσης με MED-TVC (προσαρμοσμένο από Curto et al., 2021)	32
Εικόνα 8. Απεικόνιση του φαινομένου της ώσμωσης, σύμφωνα με την εξωτερική πίεση που ασκείται στις δύο πλευρές της μεμβράνης. Περίπτωση (a) Εμπρόσθια ώσμωση, Περίπτωση (b) Καθυστερήση ώσμωσης, Περίπτωση (c) Μηδενική ροή, Περίπτωση (d) Αντίστροφη ώσμωση (προσαρμοσμένο από Curto et al., 2021).....	33
Εικόνα 9. Διάταξη απλής μονάδας αφαλάτωσης με RO (προσαρμοσμένο από Curto et al., 2021)	34
Εικόνα 10. Διάταξη μιας μονάδας νανοφιλτραρίσματος (προσαρμοσμένο από Curto et al., 2021)	34
Εικόνα 11. Τεχνολογίες φιλτραρίσματος με βάση το μέγεθος των σωματιδίων & την πίεση (προσαρμοσμένο από Fritzmann et al., 2016)	35
Εικόνα 12. Αρχές λειτουργίας μια μονάδας αφαλάτωσης με ηλεκτροδιάλυση(προσαρμοσμένο από Curto et al., 2021)	36
Εικόνα 13. Διάταξη ηλιακού αποστακτήρα(προσαρμοσμένο από Alnaimat et al., 2018)	48
Εικόνα 14. Μονάδα αφαλάτωσης ηλιακής καμινάδας (προσαρμοσμένο από Curto et al., 2021)	49
Εικόνα 15. Ηλιακή αφύγρανση (προσαρμοσμένο από Alnaimat et al., 2018).....	50
Εικόνα 16. Αφαλάτωση μέσω ηλιακής διάχυσης (προσαρμοσμένο από Alnaimat et al., 2018)	51
Εικόνα 17. Μονάδα αφαλάτωσης με Φωτοβολταϊκά/ Αντίστροφη ώσμωση (προσαρμοσμένο από Comrain, 2012).....	53
Εικόνα 18. Διαγραμματική απεικόνιση μονάδας αφαλάτωσης με συνδυασμό αιολικής ενέργειας & RO (προσαρμοσμένο από Eltawil et al., 2008.....	55
Εικόνα 19. Μονάδα αφαλάτωσης βασισμένη στην αιολική ενέργεια & στην τεχνολογία της αντίστροφης ώσμωσης στη Μήλο (itagroup.gr, 2021)	59
Εικόνα 20. Αλγόριθμος για το σχεδιασμό μιας μονάδας αφαλάτωσης με τη χρήση ΑΠΕ (Voivontas et al., 2001).	63
Εικόνα 21. Αλγόριθμος εκτίμησης των ροών ενέργειας σε ετήσια βάση & μέγεθος μονάδας (Voivontas et al., 2001)	65
Εικόνα 22. Ενδεικτικό κόστος κεφαλαίου για την εγκατάσταση μονάδας αφαλάτωσης με χρήση θαλασσινού νερού (Tzen, 2003)	70
Εικόνα 23. Ενδεικτικό κόστος κεφαλαίου για την εγκατάσταση μονάδας αφαλάτωσης με χρήση υφάλμυρου νερού (Tzen, 2003)	71
Εικόνα 24. Ενδεικτικό κόστος νερού για μια μονάδα αφαλάτωσης με θαλασσινό νερό τροφοδοσίας (Tzen, 2003)	71

Εικόνα 25. Ενδεικτικό κόστος νερού για μια μονάδα αφαλάτωσης με υφάλμυρο νερό τροφοδοσίας (Tzen, 2003)	72
Εικόνα 26. Διαγραμματική απεικόνιση του κόστους εγκατάστασης & λειτουργίας μιας μονάδας αφαλάτωσης ΑΠΕ(Voivontas et al., 2001).....	74

Συντομογραφίες

AI – Artificial Intelligence
ED – Electro-dialysis
ESG – Enhanced Geothermal Systems
FO – Forward Osmosis
GHG – Greenhouse Gas
HDH – Humidification-Dehumidification
IDA – International Desalination Agency
MD – Membrane Distillation
MED – Multi-Effect Distillation
MSF – Multiple Stage Flushing
MVC – Mechanical Vapor Compression
NF – Nanofiltration
RO – Reverse Osmosis
RWH – Rainwater Harvesting
SC – Solar Chimney
SSD – Solar Still Distillation
TVC – Thermal Vapor Compression
ΑΕΠ – Ακαθάριστο Εθνικό Προϊόν
ΑΠΕ – Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΕΕ – Ευρωπαϊκή Ένωση
ΛΑΠ – Λεκάνη Απορροής Ποταμού
ΣΒΑ – Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης
ΣΣΚ – Συμβούλιο Συνεργασίας του Κόλπου

Εισαγωγή

Το νερό έχει αναγνωριστεί ως βασικό ανθρώπινο δικαίωμα. Σε πολλά μέρη του κόσμου απαιτούνται μεγάλες ποσότητες γλυκού νερού για γεωργικές, βιομηχανικές και οικιακές χρήσεις. Ωστόσο σήμερα, σχεδόν το ένα τέταρτο της ανθρωπότητας υποφέρει από έλλειψη πόσιμου νερού (Fiorenza, Sharma, & Braccio, 2003). Το νερό απαραίτητο συστατικό στοιχείο τόσο για την κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη, όσο και για τη διατήρηση υγιών οικοσυστημάτων. Καθώς η πληθυσμιακή και οικονομική ανάπτυξη απαιτεί αυξημένες ποσότητες υπόγειων και επιφανειακών υδάτων για οικιακή χρήση, τη γεωργία και τη βιομηχανία, η πίεση στους υδάτινους πόρους εντείνεται, οδηγώντας σε εντάσεις, συγκρούσεις μεταξύ των χρηστών και υπερβολική πίεση στο περιβάλλον. Η αυξανόμενη πίεση στους υδάτινους πόρους, που προκαλείται από τη διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση και την αλόγιστη χρήση τους, καθώς και από την αυξανόμενη ρύπανση παγκοσμίως, προκαλεί σοβαρή ανησυχία και θέτει εν αμφιβόλω την ανθρώπινη ανάπτυξη (Okamro & Nwulu, 2021).

Περαιτέρω, η ξηρασία και η ερημοποίηση αυξάνονται σημαντικά, εξαπλώνόμενες σε όλο και ευρύτερες περιοχές του πλανήτη. Βάσει εκτιμήσεων, πάνω από τα δύο τρίτα της επιφάνειας της γης καλύπτονται με νερό, ενώ η διαθεσιμότητα του θα παραμείνει σταθερή στο εγγύς μέλλον. Το μεγαλύτερο μέρος του διαθέσιμου νερού υπάρχει είτε υπό τη μορφή θαλασσινού νερού, είτε υπό τη μορφή παγετώνων στις πολικές περιοχές. Περίπου το 97% του νερού του πλανήτη είναι αλμυρό και το υπόλοιπο είναι γλυκό νερό. Ωστόσο, λιγότερο από 1% γλυκού νερού είναι προσβάσιμο στον άνθρωπο. Παρά την τεχνολογική πρόοδο που έχει επιτευχθεί, τα ανανεώσιμα αποθέματα γλυκού νερού στη γη εκτιμάται ότι θα ανέλθουν μόνο στο 0,3% του παγκόσμιου νερού μελλοντικά, με τη γεωργία να χρησιμοποιεί τα δύο τρίτα του διαθέσιμου γλυκού νερού. Το ποσοστό της αρδευόμενης επιφάνειας παρουσίασε μια αύξηση κατά 1/3 το 2010 και αναμένεται να αυξηθεί κατά 50% το 2025, ενώ η βιομηχανική και οικιακή χρήση του νερού αυξάνεται με διπλάσιο ρυθμό από εκείνο της αύξησης του ανθρώπινου πληθυσμού. Περαιτέρω, η κατανάλωση νερού επταπλασιάστηκε από το 1900 και εν συνόλω η ζήτηση νερού διπλασιάζεται κάθε 20 χρόνια. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι πόροι γλυκού νερού έχουν σχεδόν εξαντληθεί πλήρως σε πολλές χώρες της Μέσης Ανατολής (Eltawil, Zhengming, & Yuan, 2008).

Η αφαλάτωση του νερού έχει αναδυθεί ως μια τεχνολογικά και οικονομικά βιώσιμη λύση για την αντιμετώπιση των προκλήσεων, που σχετίζονται με τις αυξανόμενες ελλείψεις νερού, που συναντώνται σε πολλές περιοχές του κόσμου (Droogers et al., 2012; Ghaffour, Bundschuh, Mahmoudi, & Goosen, 2015). Η αφαλάτωση είναι αποδεκτή ως μια διαφορετική προσέγγιση για την παροχή πόσιμου νερού, ιδιαίτερα σε περιοχές που αντιμετωπίζουν προκλήσεις λειψυδρίας. Η αφαλάτωση του θαλασσινού νερού και των υφάλμυρων υπόγειων υδάτων είναι εμπορικά διαθέσιμη, ενώ πραγματοποιούνται εκτεταμένες έρευνες για τη βελτίωση των τεχνολογιών της. Η αφαλάτωση παρέχει ήδη γλυκό νερό σε κοινότητες, κωμοπόλεις, πόλεις, καθώς και εγκαταστάσεις του ιδιωτικού τομέα (π.χ. ξενοδοχεία, γήπεδα γκολφ κ.λπ.) παγκοσμίως. Επιπλέον, το αφαλατωμένο νερό είναι κατάλληλο για χρήση για άρδευση γεωργικής γης,

παρά το υψηλό κόστος του (Sommariva, Hogg, & Callister, 2003; Daghari et al., 2021).

Οι τεχνολογίες αφαλάτωσης μπορούν να χωριστούν σε τρεις κύριες κατηγορίες διεργασιών: θερμική αφαλάτωση (απόσταξη), αφαλάτωση με μεμβράνη και αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση (διεργασίες ανταλλαγής ιόντων). Οι θερμικές τεχνολογίες είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές σε μεγάλες χωρητικότητες (αρκετές χιλιάδες m^3 /ημέρα). Οι τεχνολογίες αντίστροφης ώσμωσης είναι κατάλληλες για πηγές υφάλμυρου νερού καθώς και για συστήματα μικρής κλίμακας (μερικές εκατοντάδες m^3 /ημέρα). Οι τεχνολογίες αφαλάτωσης με μεμβράνες είναι οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες εμπορικές τεχνολογίες αφαλάτωσης, εφόσον έχουν βελτιστοποιηθεί, ώστε να παρέχουν οποιοδήποτε εύρος παραγωγικής ικανότητας νερού (Kyriakarakos, Papadakis, & Karavitis, 2022).

Ωστόσο, η αφαλάτωση είναι μια ενεργοβόρα διαδικασία, που απαιτεί συνήθως εγκαταστάσεις υψηλής χωρητικότητας, οι οποίες χρησιμοποιούν ακριβά και μη ανανεώσιμα ορυκτά καύσιμα, τα οποία με τη σειρά τους συμβάλλουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη και στην ατμοσφαιρική ρύπανση (Borsani & Rebagliati, 2005). Ενώ ορισμένες χώρες είναι πλούσιες σε συμβατικές πηγές ενέργειας, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, άλλες εξαρτώνται από τις εισαγωγές ορυκτών καυσίμων. Επιπλέον, οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί και οι συνεχώς αυξανόμενες τιμές των ορυκτών καυσίμων είναι δύο από τους κύριους περιορισμούς για τις τεχνολογίες, που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα (Lattemann & Hörner, 2008). Ομοίως, οι χώρες παραγωγής πετρελαίου όπως αυτές που βρέθηκαν στο Συμβούλιο Συνεργασίας του Κόλπου (ΣΣΚ) έχουν συνειδητοποιήσει ότι είναι ευάλωτες σε οποιαδήποτε μελλοντική παγκόσμια ενεργειακή κρίση. Ως αποτέλεσμα, έχουν αναπτύξει σχέδια για τη διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας τους. Αυτή η διαφοροποίηση περιλαμβάνει Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΕΠ) και κυρίως πηγές ηλιακής ενέργειας (Banafe & Macleod, 2017).

Η Σαουδική Αραβία, για παράδειγμα, έχει στοχεύσει να αυξήσει τη συμμετοχή της συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας και της ενέργειάς από φωτοβολταϊκά σε 23% και 39% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας, αντίστοιχα, έως το 2030 και το 2050 (ibid). Ωστόσο, σημειώνεται ότι η τρέχουσα εγκατεστημένη ικανότητα αφαλάτωσης με χρήση ΑΕΠ είναι αμελητέα σε σύγκριση με τη συνολική χωρητικότητα παγκοσμίως (Ghaffour et al., 2015). Σε όλο τον κόσμο, έχουν εγκατασταθεί αρκετές μονάδες αφαλάτωσης μικρής κλίμακας, που λειτουργούν με ανανεώσιμες πηγές και οι περισσότερες από αυτές έχουν λειτουργήσει με επιτυχία, ενώ έχει αποδειχθεί ότι χρήζουν πολύ απλής συντήρησης (Goosen, Mahmoudi, & Ghaffour, 2014).

Ωστόσο, ένα κεντρικό ζήτημα είναι ο εντοπισμός και η αξιολόγηση των πηγών ΑΕΠ ως προϋπόθεση για την ικανοποίηση της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης γλυκού νερού με οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμο τρόπο, ειδικά σε περιοχές με λειψυδρία. Η ηλιακή και πιθανώς η γεωθερμική ενέργεια θα μπορούσε να αποτελούν μια καλή εναλλακτική πηγή επειδή είναι μόνιμη, άφθονα διαθέσιμη και είναι φιλική προς το περιβάλλον (Goosen et al., 2014; Kyriakarakos et al., 2022). Ωστόσο, οι περισσότερες από τις εγκατεστημένες μονάδες συνδέονται σε ένα δίκτυο από όπου τροφοδοτούνται οι μονάδες αφαλάτωσης. Στην πραγματικότητα, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τις ΑΠΕ θα

μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή, όπως συστήματα κλιματισμού (Ghaffour et al., 2015; Banafe & Macleod, 2017).

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας ήταν η διερεύνηση του σχεδιασμού και υλοποίησης μονάδων αφαλάτωσης μεγάλης κλίμακας με ΑΠΕ. Από μεθοδολογικής σκοπιάς εκπονήθηκε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση μέσω αναζήτησης μελετών, άρθρων και λοιπών δημοσιεύσεων στις ηλεκτρονικές βάσεις αναζήτησης Academia, Scopus και Google Scholar. Η εργασία δομείται ως ακολούθως. Το Πρώτο Κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρόβλημα της έλλειψης του νερού, καθώς και οι τρόποι αντιμετώπισης του. Στο Δεύτερο Κεφάλαιο αναλύεται η έννοια της αφαλάτωσης, πραγματοποιείται μια σύντομη ιστορική αναδρομή, ενώ περιγράφονται οι κύριες τεχνολογίες, που χρησιμοποιούνται σήμερα. Περαιτέρω, στο Τρίτο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, οι κύριες μορφές τους, καθώς επίσης και τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα, που αυτές παρουσιάζουν. Στο Τέταρτο κεφάλαιο μελετάται η χρήση των ΑΠΕ στο πλαίσιο της αφαλάτωσης, ενώ παρουσιάζεται η έκταση χρήσης τους σε Ελλάδα και εξωτερικό. Στο Πέμπτο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παράμετροι σχεδιασμού και υλοποίησης μονάδων αφαλάτωσης μεγάλης κλίμακας με ΑΠΕ. Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα, που προέκυψαν και διατυπώνονται προτάσεις για το μέλλον.

Κεφάλαιο 1. Υδάτινοι Πόροι & Έλλειψη Νερού

1.1 Έλλειψη νερού & παράγοντες που την προκαλούν

Η «σπανιότητα» (Jury & Vaux, 2005) από κοινού με την ασφάλεια του πόσιμου νερού (Vörösmarty et al., 2010) έχουν αναγνωρισθεί ως κύρια παγκόσμια περιβαλλοντικά προβλήματα του 21^{ου} αιώνα. Παρά την διαρκή αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού (Gleick & Palaniappan, 2010), οι εφεδρείες του πλανήτη σε προσβάσιμο, ανανεώσιμο γλυκό νερό ήταν και παραμένουν λίγο πολύ σταθερές (Okampo & Nwulu, 2021). Αν και η συλλογή των πλημμυρικών υδάτων και η αύξηση της ικανότητας αποθήκευσης νερού θα μπορούσε να βελτιώσει κάπως την κατάσταση, σήμερα χρησιμοποιείται πάνω από το 50% όλων των διαθέσιμων πηγών πόσιμου νερού, εγείροντας εύλογες ανησυχίες ότι η έλλειψη νερού μπορεί να περιορίσει μελλοντικά τη γεωργική και βιομηχανική παραγωγή και κατά συνέπεια την ανθρώπινη ευημερία στο μέλλον. Την τελευταία δεκαετία, αυξανόμενες ενδείξεις υποδηλώνουν τη διασυνδεδεμένη φύση του παγκόσμιου συστήματος (Alcamo et al., 2008) μέσω του υδροκλιματικού συστήματος και της μεταφοράς «εικονικού νερού» μεταξύ των διαφόρων περιοχών του πλανήτη. Μολαταύτα, παρά την αναγνώριση του νερού ως ενός παγκόσμιου αγαθού (Hoekstra & Mekonnen, 2012), το μεγαλύτερο μέρος του αντλείται, διαχειρίζεται και χρησιμοποιείται σε περιφερειακή έως τοπική κλίμακα. Ανάλογα με τις τοπικές κοινωνικοοικονομικές, πολιτικές και υδρολογικές συνθήκες, οι κοινές παγκόσμιες κινητήριες δυνάμεις της αλλαγής, όπως η κλιματική αλλαγή, η πληθυσμιακή αύξηση και η παγκοσμιοποίηση, έχουν ποικίλες περιφερειακές επιπτώσεις (Srinivasan et al., 2022).

Η φυσική και η οικονομική έλλειψη νερού είναι οι δύο κύριοι τύποι λειψυδρίας. Όταν η ζήτηση του νερού υπερβαίνει την παροχή νερού σε οποιαδήποτε δεδομένη γεωγραφική περιοχή, τότε γίνεται λόγος για φυσική ή απόλυτη λειψυδρία. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, περίπου 1,2 δισεκατομμύρια άνθρωποι ζουν σε περιοχές φυσικής έλλειψης νερού (Quandt et al., 2022) και δη σε άνυδρες ή ημίξηρες χώρες. Η φυσική λειψυδρία ενδέχεται να είναι εποχιακή. Εκτιμάται ότι τα δύο τρίτα του παγκόσμιου πληθυσμού διαβιεί σε τοποθεσίες, όπου η λειψυδρία εμφανίζεται τουλάχιστον μία φορά το χρόνο. Καθώς ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται και οι καιρικές συνθήκες γίνονται πιο απρόβλεπτες και έντονες, ο αριθμός των ανθρώπων που πλήττονται από φυσική λειψυδρία είναι πιθανό να αυξηθεί (Ismail & Go, 2021).

Η οικονομική λειψυδρία, από την άλλη, προκαλείται από την έλλειψη υποδομών νερού ή από την ανεπαρκή διαχείριση των υδάτινων πόρων, όπου υπάρχουν υποδομές (Zisopoulou & Panagoulia, 2021) και πλήττει περισσότερους από 1,6 δισεκατομμύρια ανθρώπους (Quandt et al., 2022). Συντά, ενώ υπάρχουν επαρκείς ποσότητες νερού διαθέσιμες για την κάλυψη των ανθρώπινων και περιβαλλοντικών απαιτήσεων σε τοποθεσίες με οικονομική λειψυδρία, η πρόσβαση ενδέχεται να είναι περιορισμένη. Η αναποτελεσματική χρήση του νερού μπορεί να συμβάλει στη λειψυδρία, κυρίως λόγω της οικονομικής υποτίμησης του νερού ως πεπερασμένου φυσικού πόρου. Η υποτίμηση του νερού θα μπορούσε να

προκύψει από την ακατάλληλη τιμολόγηση και την υποτιμολόγηση του. Επίσης, το προσβάσιμο νερό ενδέχεται να είναι μολυσμένο ή ακατάλληλο προς ανθρώπινη κατανάλωση λόγω μη βέλτιστων πρακτικών διαχείρισης (Egbueri & Agbasi, 2022).

Η λειψυδρία, είναι ένα πρόβλημα σε πολλές περιοχές του κόσμου, επηρεάζοντας εκατομμύρια ανθρώπους σε όλες τις ηπείρους: (α) περισσότεροι από 2 δισεκατομμύρια άνθρωποι διαβιούν σε περιοχές με προβλήματα λειψυδρίας και ο αριθμός αυτός είναι πιθανό να αυξηθεί, (β) περισσότεροι από 1 δισεκατομμύριο άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση σε πόσιμο, καθαρό και ασφαλές νερό, (γ) περίπου 3.440 εκατομμύρια άνθρωποι πεθαίνουν κάθε χρόνο λόγω της κατανάλωσης μολυσμένου νερού, (δ) εκατομμύρια γυναίκες και παιδιά περνούν αρκετές ώρες την ημέρα συλλέγοντας νερό σε μέση απόσταση 6 km, (ε) ανά πάσα στιγμή, οι μισές νοσοκομειακές κλίνες παγκοσμίως καταλαμβάνονται από ασθενείς, που πάσχουν από ασθένειες που σχετίζονται με την έλλειψη πρόσβασης ή τη χαμηλή ποιότητα νερού (Macedo et al., 2022).

Πολλοί παράγοντες διαμορφώνουν τις πιέσεις, που ασκούνται στη διαθεσιμότητα του νερού για τις προηγούμενες, τις σημερινές και τις μελλοντικές γενιές. Αυτές περιλαμβάνουν ευρύτερες τάσεις όπως: την αύξηση του πληθυσμού, την οικονομική ανάπτυξη, την αστικοποίηση, την κλιματική αλλαγή, την έλλειψη επενδύσεων, την τεχνολογία και την καινοτομία, την αναποτελεσματική διαχείριση και την ανισότητα (Global Commission on the Economics of Water, 2023).

Ο παγκόσμιος πληθυσμός αναμένεται να φτάσει τα 9,7 δισεκατομμύρια το 2050, με τη μεγαλύτερη πληθυσμιακή ανάπτυξη να εμφανίζεται στην υποσαχάρια Αφρική και τη Νότια Ασία (Gillespie et al., 2007). Αυτή η πληθυσμιακή αύξηση θα αυξήσει σημαντικά τις απαιτήσεις για νερό, τρόφιμα και ενέργεια (Chen et al., 2016). Η αύξηση του πληθυσμού έχει οδηγήσει σε εντατικοποίηση της γεωργίας και της κτηνοτροφίας και στην αύξηση της χρήσης και κατανάλωσης νερού (UNEP, 2019). Η παγκόσμια κατανάλωση νερού αναμένεται να αυξηθεί κατά 20-30% επιπλέον έως το 2050, σε σύγκριση με το 2010 (Mekonnen & Gerbens-Leenes, 2020). Σχεδόν το 20% της παγκόσμιας κατανάλωσης νερού για άρδευση προέρχεται από την εξάντληση του υδροφόρου ορίζοντα (Wada et al., 2012) κυρίως σε χώρες όπως την Ινδία, την Κίνα, τις ΗΠΑ και το Πακιστάν. Επιπλέον, πολλά ποτάμια υποβαθμίζονται λόγω υπερβολικής εξόρυξης και της μειωμένης απορροής (Döll et al., 2009).

Οι χώρες με έλλειψη τροφίμων και αυξανόμενο πληθυσμό θα πρέπει να μειώσουν τη σπατάλη τροφίμων και να αυξήσουν ταχύτερα την εγχώρια παραγωγή, προκειμένου να αποφευχθεί η αύξηση της παγκόσμιας έλλειψης τροφίμων. Η τρέχουσα ζήτηση τροφίμων να μην ικανοποιείται, αλλά εκατοντάδες εκατομμύρια ανθρώπων βρίσκονται σε επισιτιστική ανασφάλεια, ενώ σημαντική είναι και η σπατάλη τροφίμων παγκοσμίως (Okampo & Nwulu, 2021). Οι παγκόσμιες αγροτικές εξαγωγές (1.492 δισεκατομμύρια δολάρια το 2020) είναι εξαιρετικά σημαντικές για την κάλυψη των τρεχουσών και μελλοντικών απαιτήσεων σε τρόφιμα, καθώς το μερίδιο των τροφίμων που εξάγονται αντιπροσωπεύει περίπου το 20% της συνολικής κατανάλωσης. Ενώ οι εξαγωγές τροφίμων μετριάζουν την επισιτιστική ανασφάλεια (Zimmermann et al., 2018), οι πρόσθετες απαιτήσεις σε τρόφιμα απαιτούν την πρόσθετη

κατανάλωση νερού και ενέργειας (Ritchie & Roser, 2022). Η κατάσταση αυτή δημιουργεί διασυνοριακές εξαρτήσεις (D'Odorico et al., 2019), που πρέπει να αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά σε παγκόσμια κλίμακα (Katic & Grafton, 2023).

Επιπλέον, σε επίπεδο οικονομίας το νερό χρησιμοποιείται για την εξόρυξη, παραγωγή, διανομή, κατανάλωση και διάθεση των προϊόντων και έτσι συνδέεται με την αύξηση του Ακαθάριστου Εθνικού Προϊόντος (ΑΕΠ). Περαιτέρω, απαιτείται για την παραγωγή ενέργειας (π.χ. υδροηλεκτρική ενέργεια και ψύξη) (Marchioni et al., 2023). Σημειώνεται ότι ορισμένες βιομηχανίες εξάγουν νερό από τους υδροφόρους ορίζοντες πέρα από τα επίπεδα επαναφόρτισης (Famiglietti, 2014), ενώ η συνιστώσα της κατανάλωσης του νερού συχνά δεν υπολογίζεται κατά την παραγωγή ενέργειας ή σε άλλες παραγωγικές διαδικασίες (Jin et al., 2019). Ενώ η αύξηση του ΑΕΠ μπορεί να μειώσει τη φτώχεια, ενισχύοντας την πρόσβαση σε υπηρεσίες ύδρευσης, τρόφιμα και βελτιωμένη διαχείριση του νερού (UNEP, 2019), αυτή αντισταθμίζεται από την εξάντληση του φυσικού κεφαλαίου, που επηρεάζει περισσότερο τους ανθρώπους, που διαβιούν σε αναπτυσσόμενες χώρες. Περίπου 2 εκατομμύρια τόνοι λυμάτων ρέουν στα υδατικά συστήματα κάθε μέρα και περίπου το ένα τρίτο της παγκόσμιας βιοποικιλότητας μειώνεται από τα υποβαθμισμένα οικοσυστήματα του νερού, κυρίως λόγω της ρύπανσης. Συγκεκριμένα, τα άτομα με μεγαλύτερο εισόδημα έχουν υψηλότερο αντίκτυπο στη ρύπανση και μεγαλύτερη πρόσβαση στο νερό, καταναλώνοντας περισσότερο νερό ανά άτομο εν συγκρίσει με τα άτομα, που ανήκουν σε φτωχότερα κοινωνικά στρώματα (Gupta et al., 2020), συμβάλλοντας τρόπον τινά στην υπέρβαση των πλανητικών ορίων (Rammelt et al., 2022).

Η αυξανόμενη αστικοποίηση, ειδικά σε χώρες χαμηλού εισοδήματος στην Αφρική και την Ασία, αυξάνει τη ζήτηση νερού, καθώς οι κάτοικοι των πόλεων έχουν υψηλότερο βιοτικό επίπεδο (Kuddus et al., 2020), που αυξάνει επίσης το υδάτινο αποτύπωμά τους (Hoekstra & Charagain, 2006). Η μη προγραμματισμένη αστική ανάπτυξη θέτει εμπόδια στην αποτελεσματική παροχή υπηρεσιών νερού, αποχέτευσης και υγιεινής, καθώς οι άτυποι οικισμοί μπορεί να μην αναγνωρίζονται από την κυβέρνηση (Hassan Rashid et al., 2018) και, ως εκ τούτου, δεν τους παρέχονται υπηρεσίες επεξεργασίας νερού, στεγανοποίησης του εδάφους και διαχείρισης της απορροής. Καθώς τα δημογραφικά προφίλ των πόλεων αλλάζουν, υπάρχει επίσης ανάγκη για αναβάθμιση ή δημιουργία κυκλικών συστημάτων ανακύκλωσης (Breitenmoser et al., 2022).

Η υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα και δόμηση στις πόλεις μειώνει τους χώρους πρασίνου, που συμβάλλουν στη σφράγιση του εδάφους με υψηλούς ρυθμούς απορροής, μειώνοντας την αναπλήρωση των υπόγειων υδάτων, ρυπαίνοντας τα υπόγεια ύδατα και επηρεάζοντας αρνητικά την ανθρώπινη υγεία (Bleischwitz et al., 2018). Οι αζωτούχοι και οι φωσφορικοί ρύποι μπορούν επίσης να υποβαθμίσουν τα υπόγεια και τα επιφανειακά ύδατα (Hobbie et al., 2017). Αξίζει να αναφερθεί ότι η αστική ρύπανση είναι υπεύθυνη για περίπου το 80% της ρύπανσης των ωκεανών μέσω της εκροής ποταμών και της απορροής (Landrigan et al., 2020).

Επιπροσθέτως, η κλιματική αλλαγή συνδέεται με ακραία καιρικά φαινόμενα, άνοδο της στάθμης

της θάλασσας, μόλυνση των παράκτιων υδάτινων πόρων και αλλαγές στους παγετώνες. Αυτές οι αλλαγές επηρεάζουν την αναπλήρωση των υπόγειων υδάτων, την τοπική επισιτιστική ασφάλεια, τις εγκαταστάσεις υδροηλεκτρικής ενέργειας, τις ασθένειες που μεταδίδονται από το νερό και την υποβάθμιση της ποιότητας του νερού. Η κλιματική αλλαγή συνδέεται με μεγαλύτερη συχνότητα και μέγεθος καταστροφών, που σχετίζονται με τις καιρικές συνθήκες (Mohanty et al., 2020). Βάσει εκτιμήσεων, τα δύο τρίτα της παγκόσμιας έκτασης της γης θα αντιμετωπίσουν μείωση της χερσαίας αποθήκευσης νερού, ενώ η παγκόσμια έκταση που βάλλεται από ακραίες ξηρασίες θα μπορούσε να υπερδιπλασιαστεί έως το 2070 (Pokhrel et al., 2021). Αυτές οι επιπτώσεις είναι χωροταξικά ετερογενείς. Επί παραδείγματι, ορισμένα τμήματα της Νότιας Αμερικής, της Μεσογειακής Ευρώπης και της Βόρειας Αφρικής αναμένεται να υποστούν άνευ προηγουμένου και ακραίες συνθήκες ξηρασίας μέχρι το 2050 (Sato et al., 2022).

Περαιτέρω, η υπο-επένδυση σε υποδομές ύδρευσης αποτελούν μια κρίσιμη πρόκληση. Οι κυβερνήσεις αποτυγχάνουν διαχρονικά να λάβουν υπόψη τις μη αγοραίες αξίες του νερού και, ως εκ τούτου, δεν πραγματοποιούν επαρκείς επενδύσεις σε υποδομές νερού τόσο σε χώρες υψηλού, όσο και σε χώρες χαμηλού εισοδήματος, οδηγώντας σε ένα αυξανόμενο χρηματοδοτικό κενό. Λιγότερες από το 15% των χωρών διαθέτουν τους απαραίτητους οικονομικούς πόρους, προκειμένου να εφαρμόσουν σχέδια για την παροχή υπηρεσιών νερού, αποχέτευσης και υγιεινής (Global Commission on the Economics of Water, 2023).

Σημαντικός είναι και ο ρόλος της καινοτομίας και των νέων τεχνολογιών, οι οποίες όμως δεν στερούνται μειονεκτημάτων. Ειδικότερα, οι τεχνολογίες άντλησης νερού οδηγούν στην εξάντληση των υπόγειων υδάτων (Molle et al., 2018). Ωστόσο, οι νέες τεχνολογίες μπορούν επίσης να βελτιώσουν την πρόσβαση στο νερό και να μειώσουν τους κινδύνους για την υγεία και το κόστος ευκαιρίας του χρόνου, που αφιερώνεται στην άντληση νερού, ιδιαίτερα για γυναίκες σε χώρες χαμηλού εισοδήματος. Επί παραδείγματι, η απομακρυσμένη χρήση αισθητήρων παρέχει εκτιμήσεις για την πραγματική κατανάλωση του νερού στον πιο σημαντικό τομέα κατανάλωσης του (δηλαδή την αρδευόμενη γεωργία), παρέχοντας την δυνατότητα για βιώσιμη και αποτελεσματική διαχείριση του (Perry et al., 2023).

1.2 Μέθοδοι αντιμετώπισης έλλειψης νερού

Ιστορικά, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής επιχείρησαν να λύσουν τα ζητήματα λειψυδρίας μέσω της κατασκευής φραγμάτων, της αναπλήρωσης των υπόγειων υδάτων, της σποράς νεφών, της αφαλάτωσης, της επαναχρησιμοποίησης λυμάτων και της ανάπτυξης μαζικών έργων μεταφοράς νερού, μεταξύ άλλων (Hutchinson et al., 2010). Ωστόσο, υπάρχουν όλο και περισσότερες ενδείξεις ότι η λειψυδρία μπορεί να δημιουργηθεί ή να ενταθεί από μη βιώσιμες αποφάσεις για την κάλυψη των αυξανόμενων αναγκών σε νερό (Gohari et al., 2013).

1.2.1 Αποθήκευση νερού

Η αποθήκευση νερού μετατοπίζει τη διαθεσιμότητα των πόρων με την πάροδο του χρόνου και είναι θεμελιώδης για την ικανοποίηση των μεταβλητών και αβέβαιων απαιτήσεων και αναγκών μιας κοινωνίας. Είναι απαραίτητη για την αντιμετώπιση της χρονικής μεταβλητότητας των υδάτινων πόρων (Gaupp, Hall & Dadson, 2015) και των περιόδων σοκ, που δέχεται το υδάτινο σύστημα (π.χ. πλημμύρες και ξηρασίες). Η αποθήκευση νερού ενδείκνυται για οποιαδήποτε υπηρεσία βασίζεται σε μια συγκεκριμένη ποσότητα και ποιότητα νερού, που δεν είναι πάντα διαθέσιμη στο κατάλληλο μέρος, την κατάλληλη στιγμή. Επί παραδείγματι, η αποθήκευση καθιστά δυνατή την παροχή ενός ευρέος φάσματος υπηρεσιών, από την παροχή πόσιμου νερού 24 ώρες το 24ωρο έως την χρήση του νερού άρδευσης κατά τη διάρκεια των κρίσιμων σταδίων ανάπτυξης διαφόρων καλλιεργειών και την ικανοποίηση μιας ποικιλίας κοινωνικών αναγκών (π.χ. αναψυχή). Η φυσική αποθήκευση ρυθμίζει επίσης κρίσιμες περιβαλλοντικές διαδικασίες (π.χ. μετανάστευση ψαριών, ιζήματα, ποιότητα νερού). Περαιτέρω, η αποθήκευση επιτρέπει την αποτελεσματικότερη διαχείριση διαφορετικών πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έναντι διαφορετικών ενεργειακών απαιτήσεων στο χρόνο. Μπορεί επίσης να λειτουργήσει ως ασφαλιστική δικλείδα για μελλοντικές περιόδους λειψυδρίας, συμβάλλοντας στην ασφάλεια νερού (Global Water Partnership, 2021).

Υπάρχουν πολλοί τύποι αποθήκευσης με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Οι ανθρώπινες κοινωνίες αποθήκευαν νερό από την αρχαιότητα ακόμα. Οι ανθρώπινοι οικισμοί βρίσκονταν συνήθως κοντά σε ποτάμια, λίμνες, υγροτόπους και αξιόπιστες φυσικές πηγές, που τροφοδοτούνταν από τους υδροφόρους ορίζοντες για την παροχή νερού όλο το χρόνο. Καθώς οι πληθυσμοί αυξάνονταν, αυξήθηκε και η ανάγκη τροποποίησης του τοπίου για τη δημιουργία πρόσθετων χώρων αποθήκευσης νερού. Η ανθρωπογενής αποθήκευση του νερού ποικίλλει σε μέγεθος από τις μικρότερες οικιακές δεξαμενές νερού έως τις τεράστιες τεχνητές λίμνες, που δημιουργούνται μέσω φραγμάτων. Κάθε μορφή αποθήκευσης έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά όσον αφορά τον όγκο, τη σκοπιμότητα, την προσαρμοστικότητα, τη δυνατότητα ελέγχου, την αξιοπιστία, την ευπάθεια, το κόστος και τη βιωσιμότητα (Muller et al., 2015).



Εικόνα 1. Το φράγμα Hoover στον ποταμό Κολοράντο, Νεβάδα, ΗΠΑ (Ha & Schleiger, 2020)

Οι δεξαμενές (τεχνητές λίμνες) που σχηματίζονται πίσω από φράγματα σε ποτάμια μπορούν να συλλέγουν νερό σε περιόδους υγρασίας και να το αποθηκεύουν για χρήση κατά τη διάρκεια ξηρών περιόδων. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αστική παροχή νερού. Άλλα οφέλη των φραγμάτων και των ταμιευτήρων είναι η υδροηλεκτρική ενέργεια, ο έλεγχος των πλημμυρών και η αναψυχή, που προσφέρουν. Μερικά από τα μειονεκτήματα τους περιλαμβάνουν την απώλεια νερού λόγω εξάτμισης σε ξηρά κλίματα και τη διάβρωση των καναλιών στα κατάντη τμήματα των ποταμών. Επιπλέον, τα φράγματα μειώνουν τη ροή του νερού κατάντη, γεγονός που θα μπορούσε να οδηγήσει σε πολιτικές συγκρούσεις, σε περιπτώσεις που ένα ποτάμι εκτείνεται σε κράτη ή χώρες (Ha & Schleiger, 2020). Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα των φραγμάτων είναι οι αρνητικές τους επιπτώσεις στο οικοσύστημα. Επί παραδείγματι, τα φράγματα επηρεάζουν τον οικότοπο ενός ποταμιού, ώστε να προσομοιάζει οικότοπο λίμνης, ενώ παρεμποδίζουν τη μετανάστευση και την ωοτοκία των ψαριών. Επιπλέον, η θέρμανση των επιφανειακών υδάτων επηρεάζει τη θερμοκρασία του νερού, επηρεάζοντας τα ψάρια και τα υδρόβια ασπόνδυλα, που είναι προσαρμοσμένα σε πιο ψυχρές θερμοκρασίες. Τα φράγματα παγιδεύουν επίσης ιζήματα που διαφορετικά θα συνέχιζαν να ρέουν, παρέχοντας τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για την επιβίωση των βιοτόπων (Di Baldassarre et al., 2018).

1.2.2 Μεταφορά νερού

Οι υποδομές μεταφοράς νερού υπάρχουν από την αρχαιότητα ακόμα, προκειμένου να μεταφέρουν νερό σε περιοχές, όπου αυτό δεν επαρκεί για να υποστηρίξει τον πληθυσμό και την οικονομική ανάπτυξη (Rising et al., 2022). Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα υδραγωγεία, τα οποία ωστόσο μπορεί να προκαλούν διαμάχες και να έχουν σημαντικό πολιτικό κόστος, ειδικά εάν οι αποστάσεις μεταφοράς του νερού είναι μεγάλες. Ένα μειονέκτημα τους έγκειται στο ότι η εκτροπή του νερού μπορεί να προκαλέσει ξηρασία στην περιοχή άντλησης του νερού (Ha & Schleiger, 2020).

Σήμερα, η μεταφορά νερού μεταξύ λεκανών απορροής ποταμών (ΛΑΠ) από περιοχές με αφθονία νερού (δότες) σε περιοχές με λειψυδρία (αποδέκτριες) έχει αναγνωριστεί ως αποτελεσματική λύση και την εξασφάλιση της παροχής νερού για την υποστήριξη της ανάπτυξης σε περιοχές με λειψυδρία (Gupta & van der Zaag, 2008). Έτσι, πολυάριθμα έργα μεταφοράς νερού έχουν υλοποιηθεί σε όλο τον κόσμο. Παγκοσμίως, περίπου το 14% της παγκόσμιας χρήσης νερού παρέχεται μέσω έργων μεταφοράς νερού μεταξύ ΛΑΠ και αυτό το ποσοστό αναμένεται να αυξηθεί στο 25% έως το 2025. Οι πρωτοβουλίες μεταφοράς νερού συμβάλλουν στην ανακούφιση διαφόρων ομάδων χρηστών, που πλήττονται από την λειψυδρία (Ballesterio, 2004), την ενίσχυση της κοινωνικοοικονομικής ανάπτυξης και την αύξηση της διαθεσιμότητας γλυκού νερού για την επιβίωση του οικοσυστήματος στις λεκάνες, που λαμβάνουν το νερό (Gohari et al., 2013).

Η παγκόσμια αθροιστική ικανότητα μεταφοράς νερού μεταξύ ΛΑΠ έχει αυξηθεί από τον 20^ο αιώνα και προβλέπεται να αυξηθεί περαιτέρω στο μέλλον. Μια χώρα, που έχει πραγματοποιήσει εκτεταμένες επενδύσεις για την ανακατανομή του νερού σε διάφορες ΛΑΠ με ποικίλα επίπεδα ύδατος,

είναι η Κίνα (Sun et al., 2023). Ωστόσο, η μεταφορά νερού μπορεί να έχει αρνητικές μακροπρόθεσμες κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις, εγείροντας ανησυχία ως προς την αποτελεσματικότητά της ως πανάκεια για την έλλειψη νερού (Gohari et al., 2013). Έχει υποστηριχθεί ότι η ανάγκη για πρόσθετη παροχή νερού σε περιοχές με λειψυδρία αυξάνεται όταν η έλλειψη νερού αντιμετωπίζεται μέσω της ανεξέλεγκτης μεταφοράς νερού, που δεν λαμβάνει υπόψη τον παράγοντα της ζήτησης (Ha & Schleiger, 2020).

1.2.3 Υδροσυλλογή βρόχινου νερού

Η υδροσυλλογή βρόχινου νερού (RWH - Rainwater Harvesting) είναι μια πρακτική βιώσιμης διαχείρισης του νερού, που έχει υιοθετηθεί από την αρχαιότητα για την αύξηση των αποθεμάτων πόσιμου και μη νερού σε περιοχές με έλλειψη. Έχει αποδειχθεί ότι συνιστά μια οικονομικά αποδοτική λύση σε αστικές και περιαστικές περιοχές (Evans et al., 2019). Μετά από μια κάμψη των συστημάτων RWH, που σημειώθηκε τον περασμένο αιώνα, από το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα το ενδιαφέρον για αυτά ανανεώθηκε, ως απόρροιας της αυξανόμενης ζήτησης νερού λόγω του αυξανόμενου πληθυσμού, της αστικοποίησης, της μεταβλητότητας του κλίματος και της επισιτιστικής ανασφάλειας (Tzanakakis et al., 2020).

Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για τα συστήματα RWH τόσο στις αναπτυσσόμενες, όσο και στις αναπτυγμένες χώρες (Ευρωπαϊκή Ένωση, ΗΠΑ, Ηνωμένο Βασίλειο, Ιαπωνία, Νότια Κορέα, Αυστραλία και Αφρική) (Evans et al., 2019) κυρίως λόγω της αποδοτικότητας τους σε όρους κόστους και των πιθανών οφελών τους σε διαφορετικούς τομείς της οικονομίας, του περιβάλλοντος, των υδάτινων πόρων και της ανθρώπινης υγείας (Suleiman et al., 2020). Ένα συγκριτικό πλεονέκτημα της RWH είναι η ευελιξία της και η δυνατότητα προσαρμογής της σε διάφορους τύπους συστημάτων συλλογής, που κυμαίνονται από μικρές ιδιόκτητες και διαχειριζόμενες κατασκευές έως κατασκευές μεγάλης κλίμακας (πολυκαταστήματα, σχολεία, στάδια, αεροδρόμια και άλλα), καθώς και συστήματα συλλογής ομβρίων υδάτων από αστικές, προαστιακές, βιομηχανικές και αγροτικές περιοχές (Demetropoulou et al. 2019). Ωστόσο, για την εκτεταμένη αξιοποίηση τους απαιτούνται ακόμη περαιτέρω εξελίξεις στους τομείς της τεχνολογίας, της έρευνας και της εκπαίδευσης (Gwenzi et al., 2015), στις πολιτικές και το νομοθετικό πλαίσιο του πολεοδομικού και υδάτινου σχεδιασμού (Suleiman et al., 2020), την οικονομική βιωσιμότητα και τους κινδύνους για τη δημόσια υγεία (Tzanakakis et al., 2020).

1.2.4 Η μέθοδος της αφαλάτωσης

Η αφαλάτωση αποτελεί μια διαδικασία αφαίρεσης των διαλυμένων αλάτων από το νερό, παράγοντας έτσι γλυκό νερό από θαλασσίνο ή υφάλμυρο νερό. Οι τεχνολογίες αφαλάτωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολλές εφαρμογές. Η πιο διαδεδομένη χρήση τους αφορά την παραγωγή πόσιμου νερού από αλατούχο νερό για την υδροδότηση οικιών και δήμων. Αυτή τη στιγμή λειτουργούν περισσότερες από 15.150 μονάδες αφαλάτωσης σε περισσότερες από 150

χώρες παγκοσμίως, με περισσότερες από τις μισές από αυτές να βρίσκονται στη Μέση Ανατολή, ενώ ο αριθμός τους αυξάνεται συνεχώς. Η συνολική δυναμικότητα αυτών των μονάδων υπολογίζεται σε περίπου 95,59 εκατομμύρια m³ γλυκού νερού την ημέρα (Brika, 2019). Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η Σαουδική Αραβία, η οποία καταλαμβάνεται από έρημο και διαθέτει άφθονα αποθέματα πετρελαίου. Σύμφωνα με ερευνητικά δεδομένα, το 70% των υδατικών πόρων, που χρησιμοποιούνται στη χώρα παράγονται από αφαλάτωση νερού, αλλά αυτή η πρακτική έχει ως αποτέλεσμα τη χρήση 1,5 εκατομμυρίων βαρελιών αργού πετρελαίου (Ghanim, 2019; Ling, 2022).

Καθώς ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται, η ζήτηση για νερό εντείνεται. Ως εκ τούτου, η αφαλάτωση αναδεικνύεται σε μια ελκυστική εναλλακτική λύση για την κάλυψη της ζήτησης και την επίλυση του επίμονου προβλήματος έλλειψης νερού σε πολλές χώρες ανά τον κόσμο. Οι τεχνολογίες αφαλάτωσης μπορούν να ταξινομηθούν ευρέως είτε ως μεμβράνης, είτε ως θερμικές. Οι τεχνολογίες αφαλάτωσης μέσω μεμβρανών αντιπροσωπεύουν το 93% της παγκόσμιας αγοράς και οι τεχνολογίες θερμικής αφαλάτωσης αντιπροσωπεύουν το υπόλοιπο 7% (Brika, 2019).

Η αφαλάτωση του θαλασσινού νερού προσφέρει μια σειρά από οφέλη για την ανθρώπινη υγεία, καθώς επίσης κοινωνικό-οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη παρέχοντας μια φαινομενικά απεριόριστη, σταθερή παροχή πόσιμου νερού υψηλής ποιότητας, χωρίς παράλληλα να βλάπτει τα φυσικά οικοσυστήματα (Lattemann & Hörner, 2008). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όπως κάθε άλλη τεχνολογία, η αφαλάτωση είναι πιθανό να έχει σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, οι οποίες μπορούν ωστόσο να μετριαστούν με την λήψη των κατάλληλων μέτρων. Οι κύριες τοπικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διαδικασίας αφαλάτωσης προκύπτουν από το συμπύκνωμα άλμης και από τις απορρίψεις χημικών ουσιών. Άλλα περιβαλλοντικά ζητήματα που αφορούν την αφαλάτωση είναι η υψηλή ενεργειακή κατανάλωση και οι παραγόμενες εκπομπές θερμοκηπίου (τεχνικές θερμικής αφαλάτωσης) (Trieb & Müller-Steinhagen, 2008; Ling, 2022). Μερικά μέτρα για την αντιμετώπιση αυτών των δυσμενών επιδράσεων περιλαμβάνουν την συμμόρφωση με τους υπάρχοντες περιβαλλοντικούς νόμους/κανονισμούς, τον αποτελεσματικό σχεδιασμό της διαχείρισης των υδάτινων πόρων και την ευαισθητοποίηση του κοινού για τη διατήρηση του νερού (Brika, 2019; Ling, 2022).

Κεφάλαιο 2. Η Αφαλάτωση

2.1 Ορισμός & Ιστορική Αναδρομή

Η αφαλάτωση μπορεί να οριστεί ως «η διαδικασία αφαίρεσης διαλυμένων αλάτων από αλατούχο ή υφάλμυρο νερό, καθιστώντας το έτσι κατάλληλο προς ανθρώπινη χρήση και κατανάλωση, δηλαδή για

οικιακούς, γεωργικούς και βιομηχανικούς σκοπούς» (Borsani & Rebagliati, 2005). Αποτελεί μια συνεχή διαδικασία στη γη, εφόσον αποτελεί τη φυσική διαδικασία εξάτμισης του νερού από τη θάλασσα και εν συνεχεία η συμπύκνωση στην ατμόσφαιρα, προκειμένου να σχηματιστεί βροχή. Η ψύξη του διαθέσιμου θαλασσινού νερού κοντά στις πολικές και αρκτικές περιοχές, όπου σχηματίζονται διαφορετικοί κρύσταλλοι πάγου, προέρχεται από το καθαρό νερό, καθώς το αλάτι αποκλείεται από την ανάπτυξη των κρυστάλλων (Nair & Kumar, 2013).

Οι διαδοχικές θερμές περιόδους, που σημειώθηκαν στην περιοχή της Μεσογείου από τη Μεγαλιθική περίοδο (περίπου 6.000 π.Χ.), συνέβαλαν στο να συντελεστεί σημαντική πρόοδος στις πρακτικές και τη διαχείριση των υδάτινων πόρων (Angelakis et al., 2021). Στην αρχαία Ελλάδα, ο φιλόσοφος Αριστοτέλης (384–322 π.Χ.) ήταν ο πρώτος, που αναγνώρισε ότι η υδατική φάση μπορεί να μεταβληθεί με ανταλλαγή ενέργειας και πρότεινε ότι ήταν δυνατή η μετατροπή του θαλασσινού σε πόσιμο νερό μέσω της χρήσης περιστρεφόμενου ατμού (Angelakis et al., 2021).

Πριν από τη Βιομηχανική Επανάσταση, η αφαλάτωση χρησιμοποιήθηκε κυρίως για πλοία, που διέσχισαν τους ωκεανούς, τα οποία διαφορετικά θα έπρεπε να τροφοδοτούνται με πόσιμο νερό. Στις ΗΠΑ ο Thomas Jefferson εφηύρε μια μέθοδο αφαλάτωσης σε πλοία με βάση τη θερμότητα (Angelakis et al., 2021). Ο πρώτος τύπος μονάδας αφαλάτωσης κατασκευάστηκε και διατέθηκε στην αγορά από τους G. & J. Weir το 1885 στη Γλασκώβη (Σκωτία). Αυτή η εταιρεία, η οποία αργότερα έγινε γνωστή ως Weir Westgarth, διέθετε ουσιαστικά το μονοπώλιο ως κατασκευαστής μονάδων αφαλάτωσης μέχρι τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο. Τα επόμενα χρόνια, εγκαταστάσεις αφαλάτωσης εγκαταστάθηκαν σε πολλές χώρες του κόσμου. Το 1907, μια ολλανδική εταιρεία εγκατέστησε την πρώτη μονάδα αφαλάτωσης στις χώρες του Αραβικού Κόλπου στην πόλη της Τζέντα. Με εντολή του βασιλιά Abdulaziz Al Saud, οι εγκαταστάσεις αυτές αντικαταστάθηκαν το 1928, με δύο μονάδες παραγωγής της Weir Westgarth (με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 135 m³/ημέρα) (Curto et al., 2021).

Μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, σημαντικές έρευνες για τη βελτίωση των τεχνολογιών αφαλάτωσης διεξήχθησαν στις ΗΠΑ τόσο σε επίπεδο κυβερνητικών οργανισμών όπως το Γραφείο Έρευνας Υδάτινων Πόρων, που ιδρύθηκε το 1974, όσο και σε επίπεδο πανεπιστημίων, ενώ την ανάπτυξη τους αναλάμβαναν στη συνέχεια μεγάλες εταιρείες χημικών (Garcia-Rodriguez, 2002).

Το 1953 εγκαταστάθηκαν νέες μονάδες αφαλάτωσης στο Κατάρ και στο Κουβέιτ. Αναλυτικά, εγκαταστάθηκαν 5 μονάδες στο Κατάρ συνολικής δυναμικότητας 682 m³/ημέρα και 10 μονάδες στο Κουβέιτ συνολικής δυναμικότητας 4545,5 m³/ημέρα. Το 1955 εγκαταστάθηκαν άλλες 10 μονάδες ίδιου μεγέθους στο Shuwaikh (Κουβέιτ). Έκτοτε, οι μονάδες αφαλάτωσης επεκτάθηκαν σε όλο τον κόσμο, με την ίδρυση πολλών εταιρειών όπως η Krupp στη Γερμανία, η Westinghouse στις ΗΠΑ και η SIR (Società Italiana Resine) στην Ιταλία. Η άλλη επικρατούσα μέθοδος αφαλάτωσης είναι η αντίστροφη ώσμωση (RO), που βασίζεται σε ημι-διαπερατές μεμβράνες. Ιστορικά, το φαινόμενο της ώσμωσης παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το 1748 από τον Jean-Antoine Nollet και δεν είχε τύχει καμίας εφαρμογής για περίπου δύο αιώνες. Στις ΗΠΑ οι πρώτες μελέτες ξεκίνησαν από τους ερευνητές Sidney Loeb και Srinivasa

Sourirajan το 1956 στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια και στο Πανεπιστήμιο της Φλόριντα, αντίστοιχα (Curto et al., 2021).

Η πρώτη μεμβράνη κατασκευάστηκε το 1959, ενώ η πρώτη πιλοτική μονάδα εγκαταστάθηκε το 1965, με δυναμικότητα 19 m³/ημέρα. Η βελτίωση αυτής της τεχνικής επιτεύχθηκε με την ανάπτυξη ασύμμετρων μεμβρανών, που επιτρέπουν τη μεγαλύτερη ροή του νερού. Η αργή διάχυση στη RO οφειλόταν αρχικά στην υψηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, που απαιτείται για την παραγωγή γλυκού νερού σε σύγκριση με άλλες τεχνικές και στην περιορισμένη διάρκεια ζωής των ημι-διαπερατών μεμβρανών. Οι πρώτες εφαρμογές αφορούσαν το υφάλμυρο νερό, λόγω της χαμηλότερης ωσμωτικής του πίεσης σε σύγκριση με το θαλασσινό νερό. Η πρώτη μονάδα αφαλάτωσης, με βάση την RO, εγκαταστάθηκε το 1977 στις ΗΠΑ, με εγκατεστημένη ισχύ 11.350 m³/ημέρα. Στην ίδια περιοχή, το 1985 κατασκευάστηκε άλλη μια μεγάλη μονάδα αφαλάτωσης, εγκατεστημένης ισχύος ίσης με 56.800 m³/ημέρα (Belessiotis & Delyannis, 2000).

Μεγάλη τεχνολογική πρόοδος συντελέστηκε στην τεχνολογία της αντίστροφης ώσμωσης χάρη στην αύξηση της διάρκειας ζωής των μεμβρανών και στην υιοθέτηση συσκευών ανάκτησης ενέργειας για τη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων για την όλη διαδικασία. Έτσι, σήμερα η RO εφαρμόζεται στο θαλασσινό νερό και είναι οικονομικά ανταγωνιστική εν συγκρίσει με τις άλλες τεχνολογίες. Αυτή η βελτίωση επιτεύχθηκε κατά τη δεκαετία του 1990 χάρη στην εισαγωγή ενός συστήματος ανάκτησης ενέργειας, που βασίζεται στην εισαγωγή υδροστροβίλων ή παρόμοιων συστημάτων πριν από την επιστροφή του υφάλμυρου νερού στη θάλασσα (Angelakis et al., 2021).

Επί του παρόντος, η RO είναι η πιο διαδεδομένη τεχνολογία αφαλάτωσης, ακολουθούμενη από την εξάτμιση πολλαπλής φάσης (MSF- Multiple Stage Flushing) και την απόσταξη πολλαπλών βαθμίδων (MED - Multi-Effect Distillation). Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία, η συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα βασίζεται ουσιαστικά σε τρεις τεχνολογίες: την RO (68,7%), την MSF (17,6%) και την MED (6,9%). Οι υπόλοιπες τεχνολογίες διαδραματίζουν οριακό ρόλο (6,8%). Οι μονάδες αφαλάτωσης είναι εγκατεστημένες σε όλο τον κόσμο, αλλά είναι συγκεντρωμένες κυρίως στη Μέση Ανατολή και τη Βόρεια Αφρική (47,5% της παγκόσμιας δυναμικότητας) (Jones et al., 2019). Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Αφαλάτωσης (IDA - International Desalination Agency) περίπου 28 εκατομμύρια m³/d αφαλατωμένο νερό προερχόμενα από ωκεανούς και περιφερειακές θάλασσες παράγονται σε όλο τον κόσμο (Cipollina et al., 2009).

Η Μέση Ανατολή και η Βόρεια Αφρική είναι σήμερα εξοπλισμένες με 4.826 μονάδες, με εγκατεστημένη ισχύ ίση με $45,32 \times 10^6$ m³/ημέρα. Οι υπόλοιπες μονάδες αφαλάτωσης κατανέμονται με τον ακόλουθο τρόπο: 3.505 μονάδες στην Ανατολική Ασία και τον Ειρηνικό (18,4% της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος), 2.341 στη Βόρεια Αμερική (11,9%), 2.337 στη Δυτική Ευρώπη (9,2%), 1.373 στη Λατινική Αμερική και την Καραϊβική (5,7%), 655 στη Νότια Ασία (3,1%), 566 στην Ανατολική Ευρώπη και την Κεντρική Ασία (2,4) και 303 στην Υποσαχάρια Αφρική (1,9%). Οι κύριοι τομείς, που χρησιμοποιούνται είναι η βιομηχανία (7.757 μονάδες με δυναμικότητα $28,8 \times 10^6$ m³/ημέρα) και οι

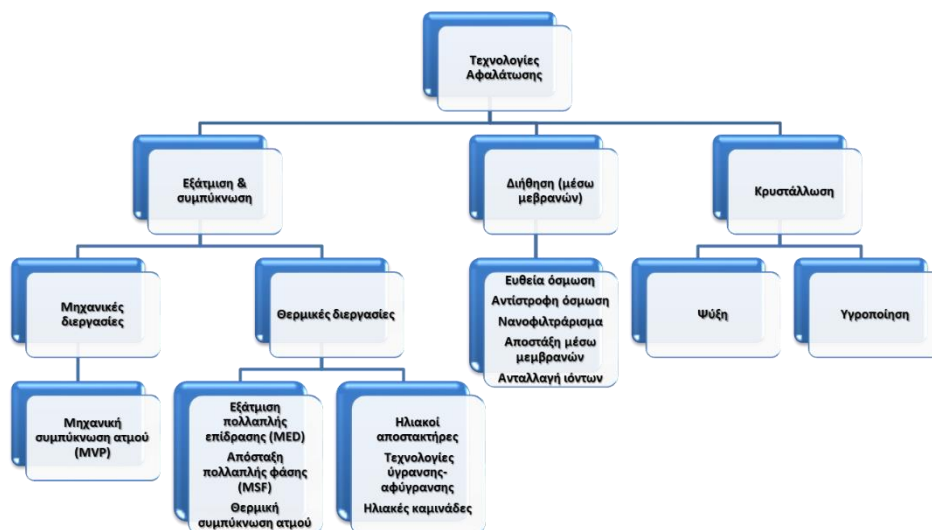
δημοτικές υπηρεσίες (6.055 μονάδες, $59,39 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$). Η κύρια πηγή ακατέργαστου νερού αντιπροσωπεύεται από το θαλασσινό νερό (70,5% της παγκόσμιας χωρητικότητας) (Jones et al., 2019).

2.2 Τεχνολογίες αφαλάτωσης

Σήμερα, η αφαλάτωση μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνολογίες. Γενικά, μια μονάδα αφαλάτωσης περιλαμβάνει διαφορετικές διαδικασίες για την απόκτηση γλυκού νερού, μεταξύ των οποίων η μονάδα αφαλάτωσης είναι το πιο ενεργοβόρο συστατικό. Μια μονάδα αφαλάτωσης συνήθως περιλαμβάνει (El-Ghonemy, 2018):

- Είσοδος, που αποτελείται από αντλίες και σωλήνες για την πρόσληψη νερού από την πηγή (θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό).
- Προ-επεξεργασία, που συνίσταται στη διήθηση ακατέργαστου νερού για την αφαίρεση στερεών συστατικών και την προσθήκη χημικών ουσιών για τη μείωση της καθίζησης του αλατιού και της διάβρωσης στο εσωτερικό της μονάδας αφαλάτωσης.
- Αφαλάτωση, όπου το γλυκό νερό εξάγεται από το αλμυρό νερό.
- Μετά την επεξεργασία, για τη διόρθωση του pH με την προσθήκη επιλεγμένων αλάτων για την κάλυψη των απαιτήσεων των τελικών χρήσεων.

Όσον αφορά την ταξινόμηση των τεχνολογιών παρατίθεται παρακάτω μια ταξινόμηση από τους Alkaisi et al. (2017) στη βάση τριών κριτηρίων. Εξάτμιση και Συμπύκνωση, Διήθηση και Κρυστάλλωση (Εικόνα 2).



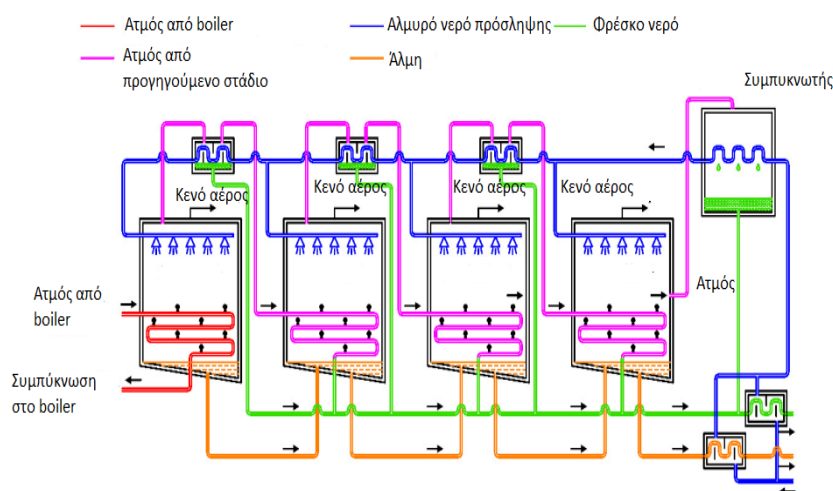
Εικόνα 2. Ταξινόμηση τεχνολογιών αφαλάτωσης (προσαρμοσμένο από Alkaisi et al., 2017).

Οι τεχνολογίες εξάτμισης και συμπύκνωσης είναι οι πρώτες τεχνικές αφαλάτωσης, που αναπτύχθηκαν. Η ιδέα πίσω από αυτές τις τεχνολογίες είναι η παροχή θερμικής ενέργειας στο θαλασσινό νερό, που **οδηγεί** στην παραγωγή ατμού και στη συνέχεια συμπύκνωση. Αυτή η ενέργεια μπορεί να παραχθεί χρησιμοποιώντας τη θερμότητα από μια θερμική διεργασία (επί παραδείγματι ή καύση καυσίμου) ή μέσω μηχανικής διεργασίας. Στην πρώτη περίπτωση, οι πιο κοινές τεχνολογίες είναι οι MED, MSF, η Θερμική Συμπύεση Ατμών (TVC – Thermal Vapor Compression) και Απόσταξη με Μembrάνη (MD - Membrane Distillation). Επί του παρόντος, άλλες προσεγγίσεις βρίσκονται υπό διερεύνηση, και μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται λύσεις, που βασίζονται στην ηλιακή ακτινοβολία: Ηλιακός Αποστακτήρας (SSD - Solar Still Distillation), Ηλιακή Καμινάδα (SC – Solar Chimney) και Αφαλάτωση Ύγρανσης-Αφύγρανσης (HDH – Humidification - Dehumidification). Όσον αφορά τις μηχανικές διεργασίες, που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή γλυκού νερού μέσω της εξάτμισης και συμπύκνωσης του θαλασσινού νερού, η κύρια τεχνική είναι η Μηχανική Συμπύεση Ατμών (MVC - Mechanical Vapor Compression) (Bahar et al., 2004). Στην περίπτωση των τεχνολογιών διήθησης, όλα τα διαλύματα βασίζονται ουσιαστικά σε μια ημιδιαπερατή μεμβράνη, δηλαδή μια μεμβράνη, που συμπεριφέρεται διαφορετικά ανάλογα με τα μεγέθη ή τη φύση των μορίων. Η μόνη εξαίρεση είναι οι τεχνικές ανταλλαγής ιόντων, όπου χρησιμοποιούνται φυσικά ή τεχνητά υλικά για τη σύλληψη των διαλυμένων ιόντων με χημικό τρόπο (Xu, 2005). Σε αυτό το πλαίσιο, η RO είναι η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για την αφαλάτωση. Η ηλεκτροδιάλυση (ED- Electro-dialysis) και η ανταλλαγή ιόντων χρησιμοποιούνται για την παραγωγή νερού με πολύ περιορισμένη συγκέντρωση αλάτων. Άλλες τεχνικές, όπως η ευθεία ώσμωση (FO- Forward Osmosis) και το νανοφιλτράρισμα (NF - Nanofiltration) βρίσκονται ακόμα στο στάδιο ανάπτυξης (Talaiepour et al., 2017).

2.2.1 Απόσταξη πολλαπλών βαθμίδων (MED)

Η πρώτη μονάδα MED κατασκευάστηκε στο Κουβέιτ τη δεκαετία του 1950 με τη χρήση ενός εξατμιστή βυθισμένου σωλήνα τριπλής επίδρασης. Παρά το γεγονός ότι ήταν η πρώτη τεχνολογία αφαλάτωσης, η MED δεν διαδόθηκε ευρέως, επειδή επηρεάζεται ιδιαίτερα από το πρόβλημα συγκέντρωσης αλάτων στις σωληνώσεις σε σύγκριση με άλλες θερμικές τεχνολογίες αφαλάτωσης. Ωστόσο, από τη δεκαετία του 1980 έχουν πραγματοποιηθεί αρκετά ερευνητικά έργα σχετικά με τη MED, που διερευνούν χαμηλότερες θερμοκρασίες, προκειμένου να μειώσουν τα προβλήματα με τα άλατα και τη διάβρωση των σωλήνων (Curto et al., 2021). Η MED χρησιμοποιείται επίσης σήμερα στη βιομηχανία τροφίμων για την εξαγωγή χυμού από ζαχαροκάλαμο και για την παραγωγή αλάτων από το θαλασσινό νερό (Shatat & Riffat, 2012). Οι μονάδες MED μπορούν να τοποθετηθούν σε διάφορες διαμορφώσεις, λαμβάνοντας υπόψη το σχήμα του εναλλάκτη θερμότητας ή την κατεύθυνση ροής της άλμης σε σχέση με την κατεύθυνση των ατμών. Οι μονάδες μπορούν να συναρμολογηθούν σε μία γραμμή ή σε δύο παράλληλες γραμμές, λειτουργώντας σε διαφορετικές πιέσεις, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η ανάκτηση θερμότητας (Blagin et al., 2019).

Η MED μπορεί να ταξινομηθεί σε χαμηλής θερμοκρασίας (< 90 °C) ή υψηλής θερμοκρασίας (> 90 °C). Για τη μείωση του ενεργειακού κόστους, ο ατμός συνήθως διαχέεται από έναν ατμοστρόβιλο μέσα σε μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής ή ανακτάται από μια πηγή ενέργειας. Καθώς ο πρωτεύων ατμός δεν έρχεται σε άμεση επαφή με το αλατούχο νερό, το συμπύκνωμα μέσα στον εξατμιστή κανονικά ανακυκλώνεται στο λέβητα για επαναχρησιμοποίηση. Η Εικόνα 3 απεικονίζει το διάγραμμα μιας μονάδας MED με οριζόντιες σωληνώσεις (Shatat et al., 2012).



Εικόνα 3. Διάταξη μονάδας αφαλάτωσης με Εξάτμιση Πολλαπλής Επίδρασης (MED) (προσαρμοσμένο από Curto et al., 2021)

Αναλυτικά, το αλατούχο νερό μπορεί να διαχωριστεί σε δύο γραμμές, προκειμένου να ανακτηθεί η θερμική ενέργεια του γλυκού νερού και της άλμης, που παράγεται από το σύστημα (βλ. Εικόνα 3). Εν συνεχεία, χρησιμοποιείται το αλατούχο νερό ως ψυκτικό υγρό για τον συμπυκνωτή και στη συνέχεια προθερμαίνεται χρησιμοποιώντας τους εναλλάκτες ανάκτησης θερμότητας, που παρέχονται από τον ατμό, που παράγεται σε κάθε θάλαμο (Cirollina et al., 2005). Το προθερμασμένο νερό ψεκάζεται στον πρώτο θάλαμο στην επιφάνεια του εξατμιστή, παράγοντας μια λεπτή μεμβράνη για την προώθηση του ταχέως βρασμού και της εξάτμισης χάρη στη χαμηλή πίεση στο εσωτερικό του θαλάμου και την εξωτερική παροχή θερμικής ενέργειας. Ο ατμός που παράγεται μέσα σε αυτόν τον θάλαμο μεταφέρεται με σωλήνες στον επόμενο θάλαμο. Καθώς η πίεση στο εσωτερικό του δεύτερου θαλάμου είναι χαμηλότερη από τον πρώτο, η θερμοκρασία βρασμού είναι επίσης χαμηλότερη. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατή η συμπύκνωση των ατμών, που παράγονται στον πρώτο θάλαμο μέσα στους σωλήνες και ταυτόχρονα η παραγωγή περαιτέρω ατμών μέσα στον δεύτερο θάλαμο (Sharon & Reddy, 2015).

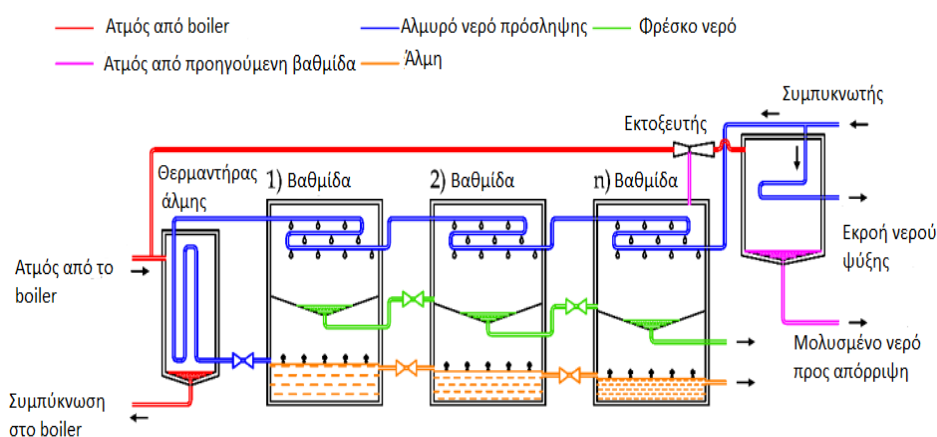
Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται στους επόμενους θαλάμους με τον ίδιο τρόπο, χρησιμοποιώντας τον ατμό που παράγεται στον προηγούμενο θάλαμο για την παραγωγή περισσότερου ατμού σε χαμηλότερη πίεση. Στον τελευταίο θάλαμο, ο ατμός τελικά συμπυκνώνεται μέσα στον συμπυκνωτή και ψύχεται από το αλατούχο νερό τροφοδοσίας. Η άλμη που παράγεται στους προηγούμενους θαλάμους συνήθως μεταφέρεται μέσα στους επόμενους θαλάμους, προκειμένου να διασφαλιστεί η εξαγωγή περισσότερου γλυκού νερού, χάρη στη χαμηλότερη πίεση στο εσωτερικό τους

(Curto et al., 2021). Η πίεση μέσα στους θαλάμους διατηρείται κάτω από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες χρησιμοποιώντας ένα ειδικό σύστημα κενού. Η ενεργειακή απόδοση των μονάδων MED εξαρτάται από τον αριθμό των βαθμίδων, που συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 4 και 21 (Shatat & Riffat, 2014).

Οι μονάδες MED χρησιμοποιούνται για την παραγωγή γλυκού νερού με ρυθμό ροής που κυμαίνεται από 2.000 έως 20.000 m³/ημέρα. Για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, η MED μπορεί να συνδυαστεί με μια μονάδα θερμικής ή μηχανικής συμπίεσης ατμών (Sharon & Reddy, 2015). Οι μεγαλύτερες μονάδες αφαλάτωσης συγκεντρώνονται στην Κίνα και τη Μέση Ανατολή (Karagiannis & Soldatos, 2008).

2.2.2 Εξάτμιση Πολλαπλής Φάσης (MSF)

Η πρώτη μονάδα MSF κατασκευάστηκε τη δεκαετία του 1950 στη Σκωτία και μετά από λίγα χρόνια αναδείχθηκε στην ευρύτερα χρησιμοποιούμενη τεχνολογία αφαλάτωσης (Tenno & Nguyen, 2016). Στην πραγματικότητα, απαιτείται επίσης μια αρχική παροχή θερμότητας, χρησιμοποιώντας ατμό που διαχέεται από μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και η φθίνουσα πίεση χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού. Για τη λειτουργία της πληθώρας αντλιών, που διανέμονται κατά μήκος της μονάδας αφαλάτωσης, απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια (Al-Karaghoulī & Kazmerski, 2013). Η Εικόνα 4 απεικονίζει διαγραμματικά μια μονάδα MSF. Η εγκατάσταση μπορεί εννοιολογικά να χωριστεί σε δύο τμήματα: το πρώτο είναι το τμήμα θερμαντήρα άλμης, όπου το τροφοδοτικό νερό λαμβάνει θερμότητα από μια εξωτερική παροχή και το δεύτερο είναι το τμήμα ανάκτησης θερμότητας, όπου η θερμική ενέργεια ανακτάται για την προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας (El-Ghonemy, 2018).



Εικόνα 4. Διάταξη μονάδας αφαλάτωσης με Πολυβάθμια Εκτόνωση (MSF) (προσαρμοσμένο από Curto et al., 2021)

Το αλατούχο νερό τροφοδοσίας χρησιμοποιείται αρχικά ως ψυκτικό υγρό για τον συμπυκνωτή και στη συνέχεια ως ακατέργαστη πηγή για την παραγωγή γλυκού νερού. Το αλατούχο νερό αυξάνει προοδευτικά τη θερμοκρασία του, ρέοντας μέσα στις σωληνώσεις και διερχόμενο μέσα από τους εναλλάκτες θερμότητας μέσα στις διαφορετικές βαθμίδες. Για την εκκίνηση της διαδικασίας, το αλατούχο

νερό θερμαίνεται μέσα στον θερμαντήρα άλμης χρησιμοποιώντας ατμό, που συνήθως διαχέεται από μια μονάδα παραγωγής ενέργειας. Αυτός ο ατμός συμπυκνώνεται μέσα στον θερμαντήρα άλμης, έτσι ώστε να μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί στη μονάδα παραγωγής ατμού. Καθώς το αλατούχο νερό τροφοδοσίας ρέει μέσα στους σωλήνες στον θερμαντήρα άλμης και στα στάδια εκτόνωσης, οι εργασίες συντήρησης για την αφαίρεση των αλάτων είναι απλούστερες από ό,τι στη MED (Shatat & Riffat, 2014). Για το λόγο αυτό, οι μονάδες MSF είναι η πιο διαδεδομένη, θερμική τεχνολογία αφαλάτωσης, αντιπροσωπεύοντας το 17,6% της συνολικής εγκατεστημένης ικανότητας αφαλάτωσης στον κόσμο (Jones et al., 2019).

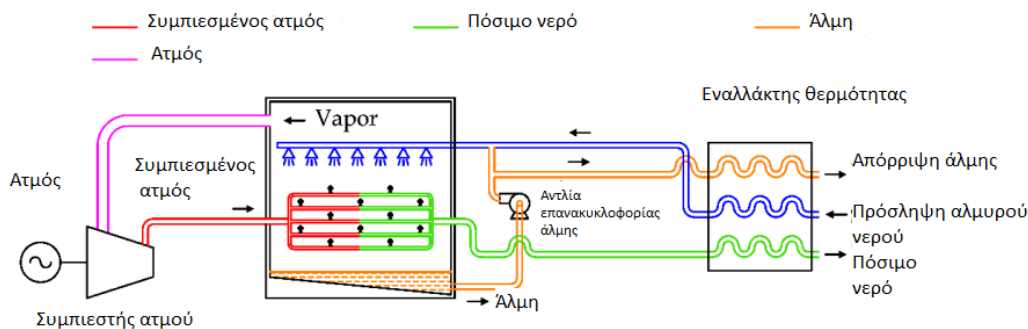
Μετά την αρχική θέρμανση, το αλατούχο νερό ελασματοποιείται μέσα στον πρώτο θάλαμο. Ο ατμός που παράγεται στο εσωτερικό του θαλάμου συμπυκνώνεται χάρη στην απομάκρυνση θερμότητας από το αλατούχο νερό τροφοδοσίας μέσα στον εναλλάκτη θερμότητας. Η άλμη, που συλλέγεται στο κάτω μέρος του θαλάμου ελασματοποιείται στους επόμενους θαλάμους, όπου η εσωτερική πίεση μειώνεται γραμμικά από το πρώτο στάδιο στο τελευταίο (Tenno & Nguyen, 2016). Το κενό λαμβάνεται με τη χρήση εκτοξευτών ατμού που παρέχονται από ατμό υψηλής πίεσης (όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4), ή με τη χρήση αντλιών κενού (El-Ghonemy, 2018). Χάρη στην πτώση της πίεσης, η εισαγωγή θερμαινόμενου αλατούχου νερού παράγει το «φαινόμενο εκτόνωσης», για το οποίο το αλατούχο νερό φτάνει σε θερμοκρασία βρασμού γρήγορα μέσα στο θάλαμο, παράγοντας ατμό. Για την μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος, οι μονάδες MSF αποτελούνται συνήθως από πολλά στάδια εκτόνωσης, με τον συνολικό αριθμό να κυμαίνεται από 15 έως 25 στάδια. Αυτή η τεχνολογία είναι σε θέση να ικανοποιήσει μια ζήτηση γλυκού νερού από περίπου 4.000 έως 57.000 m³/ημέρα, απαιτώντας θέρμανση στους 90 °C–110 °C (Curto et al., 2021).

Σε πιο πρόσφατες μονάδες, έχουν εισαχθεί μερικές αλλαγές. Αντί για τον συμπυκνωτή, εισάγεται ένα τμήμα απόρριψης θερμότητας, το οποίο αποτελείται από δύο ή τρία στάδια εκτόνωσης. Αναλυτικά, το θαλασσινό νερό χρησιμοποιείται ως ψυκτικό υγρό σε αυτή την ενότητα. Μετά από αυτό το βήμα, ένα μέρος του θαλασσινού νερού απορρίπτεται και το υπόλοιπο μέρος αναμιγνύεται με ένα μέρος άλμης, που εξάγεται από το τελευταίο στάδιο εκτόνωσης. Αυτό το διάλυμα αλατιού χρησιμοποιείται στο κύριο τμήμα της μονάδας αφαλάτωσης, με τον ίδιο τρόπο όπως φαίνεται στο προηγούμενο διάγραμμα. Αυτή η τεχνική εφαρμόζεται για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης μεγάλων μονάδων αφαλάτωσης, που αποτελούνται από 19-40 στάδια εκτόνωσης και 2-3 στάδια απόρριψης θερμότητας (El-Ghonemy, 2018).

2.2.3 Συμπύεση Ατμού (VC)

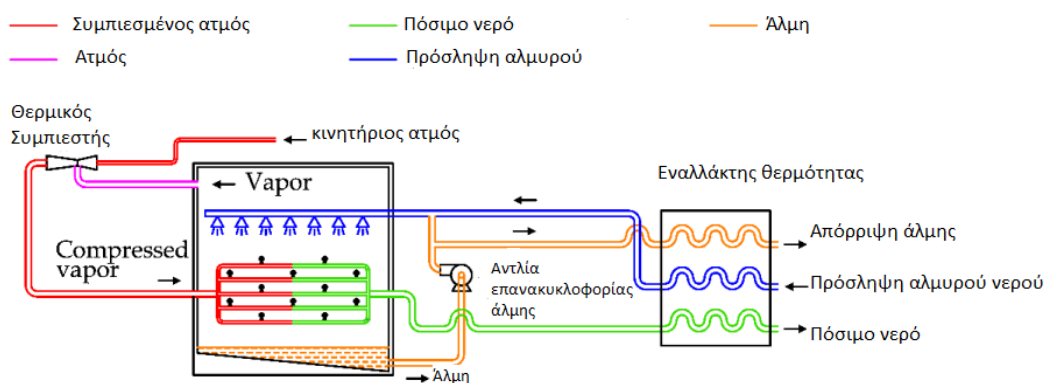
Η Συμπύεση Ατμού (VC) είναι μια κοινή τεχνική, που χρησιμοποιείται στον τομέα της αφαλάτωσης, βασισμένη στη μετάβαση φάσης υγρού-ατμού. Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται η περίπτωση μιας μονάδας αφαλάτωσης μηχανικής συμπύεσης ατμών (MVC). Ένας συμπιεστής ατμών χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των ατμών, που παράγονται μέσα στο θάλαμο. Λόγω της συμπύεσης, ο ατμός αυξάνει τη θερμοκρασία και την πίεσή του. Αυξάνοντας τη θερμοκρασία και χρησιμοποιώντας έναν εναλλάκτη θερμότητας, ο ατμός υπό πίεση μπορεί να μεταφέρει θερμότητα στο αλατούχο νερό μέσα στον θάλαμο

και να παράγει ατμό. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας, χρησιμοποιείται ένας εναλλάκτης ανάκτησης θερμότητας για τη μεταφορά θερμότητας από την απόρριψη άλμης και το συμπυκνωμένο νερό τροφοδοσίας στο αλατούχο νερό τροφοδοσίας (Al-Karaghoulis & Kazmerski, 2013).

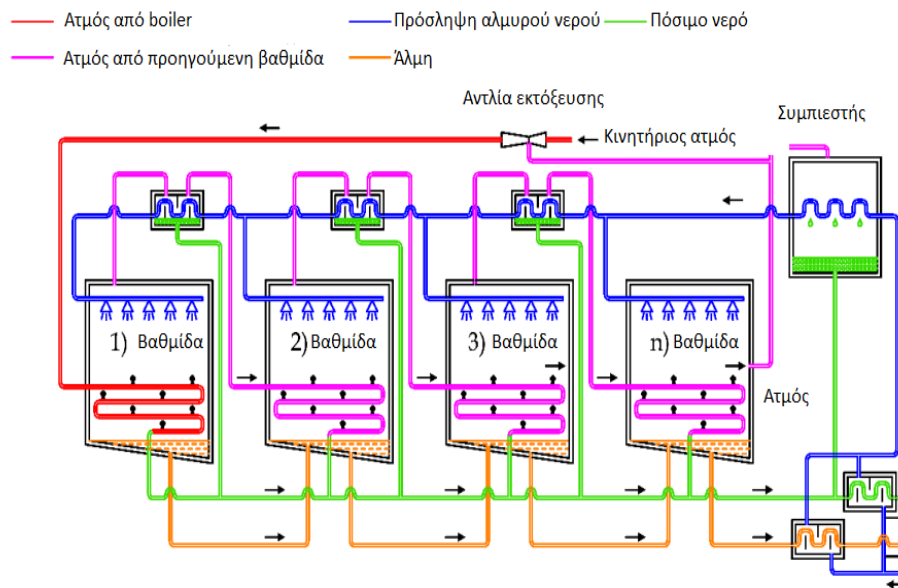


Εικόνα 5. Διάταξη μονάδας αφαλάτωσης με Μηχανική Συμπίεση Ατμού (MVC) (προσαρμοσμένο από Curto et al., 2021)

Μετά την προθέρμανση, το αλατούχο νερό αναμιγνύεται με μια ροή επανακυκλοφορίας της άλμης. Αυτό το διάλυμα ψεκάζεται εξωτερικά στον κύριο εναλλάκτη θερμότητας μέσα στη μονάδα αφαλάτωσης. Η MVC ουσιαστικά απαιτεί ηλεκτρική ενέργεια για την εκτέλεση της διαδικασίας. Ως εκ τούτου, μπορεί να κατασκευαστεί μια μικρή αυτόνομη μονάδα αφαλάτωσης για την ικανοποίηση ζήτησης για γλυκό νερό, που κυμαίνεται από 100 έως 3000 m³/ημέρα. Η ίδια προσέγγιση υιοθετείται στη μονάδα θερμικής συμπίεσης ατμών (TVC), που αποτυπώνεται στην Εικόνα 6. Η μόνη σημαντική διαφορά σχετίζεται με τη μέθοδο, που χρησιμοποιείται για την αύξηση της τάσης των ατμών. Στην TVC υιοθετείται ένας θερμικός συμπιεστής, ο οποίος τροφοδοτείται από ατμό υψηλής πίεσης, που συνήθως διαχέεται από μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η TVC απαιτεί θερμική και ηλεκτρική ενέργεια. Η θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται για τη θερμική συμπίεση, ενώ η ηλεκτρική για τις αντλίες κυκλοφορίας. Η TVC μερικές φορές συναρμολογείται με μονάδες MED, υλοποιώντας ένα υβριδικό σύστημα που ονομάζεται μονάδα αφαλάτωσης MED-TVC, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7 (Curto et al., 2021).



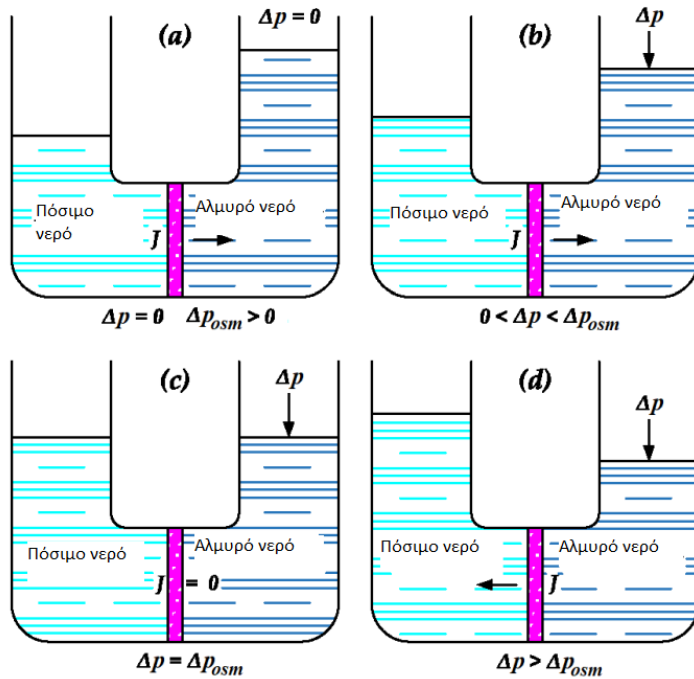
Εικόνα 6. Διάταξη μονάδας αφαλάτωσης με Θερμική Συμπίεση Ατμού (TVC) (προσαρμοσμένο από Curto et al., 2021)



Εικόνα 7. Διάταξη μονάδας αφαλάτωσης με MED-TVC (προσαρμοσμένο από Curto et al., 2021)

2.2.4 Αντίστροφη Ωσμωση (RO)

Η RO είναι μια τεχνολογία αφαλάτωσης, που βασίζεται σε ημιδιαπερατές μεμβράνες, οι οποίες είναι ειδικά στρώματα, που επιτρέπουν τη διέλευση μόνο σε επιλεγμένα μόρια. Στη φύση, εάν δύο διαλύματα με διαφορετικές συγκεντρώσεις διαλυμένων ουσιών χωρίζονται από μια ημιδιαπερατή μεμβράνη, ο διαλύτης ρέει αυθόρμητα από το πιο αραιό διάλυμα στο πιο συμπυκνωμένο, προκειμένου να εξισορροπηθεί το ενεργειακό δυναμικό και των δύο διαλυμάτων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8 (βλ. περίπτωση a). Αυτή η ροή μπορεί να μειωθεί προοδευτικά εάν εφαρμοστεί μια αυξανόμενη εξωτερική κλίση πίεσης στην ημιδιαπερατή μεμβράνη (βλ. περίπτωση b). Η ακριβής τιμή που μπορεί να τερματίσει τη ροή του διαλύτη ορίζεται ως Ωσμωτική Πίεση $\Delta\rho_{osm}$ (βλ. περίπτωση c). Εάν η εξωτερική κλίση πίεσης είναι μεγαλύτερη από την ωσμωτική πίεση, η ροή του διαλύτη αντιστρέφεται, οπότε ο διαλύτης μπορεί να εξαχθεί από το συμπυκνωμένο διάλυμα (βλ. περίπτωση d) (Helfer et al., 2014).



Εικόνα 8. Απεικόνιση του φαινομένου της ώσμωσης, σύμφωνα με την εξωτερική πίεση που ασκείται στις δύο πλευρές της μεμβράνης. Περίπτωση (a) Εμπρόσθια ώσμωση, Περίπτωση (b) Καθυστέρηση ώσμωσης, Περίπτωση (c) Μηδενική ροή, Περίπτωση (d) Αντίστροφη ώσμωση (προσαρμοσμένο από Curto et al., 2021)

Για κάθε διάλυμα η απόλυτη ωσμωτική πίεση p_{osm} μπορεί να οριστεί σύμφωνα με την εξίσωση van't Hoff (Helfer et al., 2014). Το ισοδύναμο αντιπροσωπεύει την ποσότητα μιας συγκεκριμένης ουσίας που μπορεί να αντιδράσει (ή να παρέχει) ένα γραμμομόριο υδρογόνου (H^+) σε μια αντίδραση όξινης βάσης ή να αντιδράσει (ή να παρέχει) ένα γραμμομόριο ηλεκτρονίων σε μια αντίδραση οξειδοαναγωγής (Curto et al., 2021):

$$P_{osm} = i [c] R \tau$$

Όπου:

i είναι ο δείκτης van't Hoff (ονομάζεται επίσης ο αριθμός των ωσμωτικά ενεργών σωματιδίων), που δίνεται από τη σχέση $i = 1 + \epsilon(v-1)$.

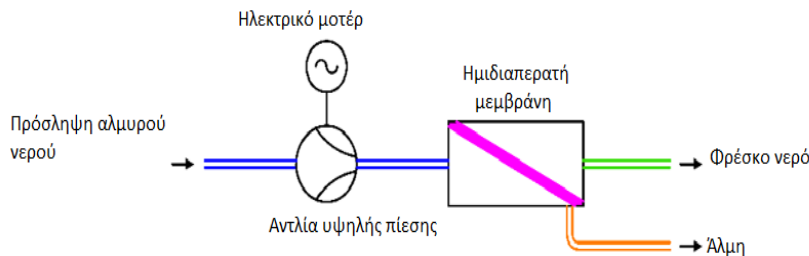
$[c]$ είναι η μοριακή συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας.

R είναι η σταθερά ιδανικού αερίου, που ισούται με $8.31441 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$.

τ είναι η απόλυτη θερμοκρασία του διαλύματος.

Καθώς η συγκέντρωση του αλατιού είναι αμελητέα στο γλυκό νερό και κατά συνέπεια η ωσμωτική του πίεση (η ελάχιστη πίεση που απαιτείται για να σταματήσει η ροή του διαλύτη) είναι ίση με την ωσμωτική πίεση του αλατούχου νερού. Για το θαλασσινό νερό, η συγκέντρωση αλατιού κυμαίνεται μεταξύ $0,51$ και $0,68 \text{ mol L}^{-1}$. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη μια θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με $25 \text{ }^\circ\text{C}$, η ωσμωτική πίεση σύμφωνα με την εξίσωση του van't Hoff κυμαίνεται μεταξύ 25 και 33 bar . Μπορούν να μετρηθούν μεγαλύτερες τιμές, όπως στην ακραία περίπτωση της Νεκράς Θάλασσας, όπου η ωσμωτική πίεση είναι ίση με 290 bar (Helfer et al., 2014).

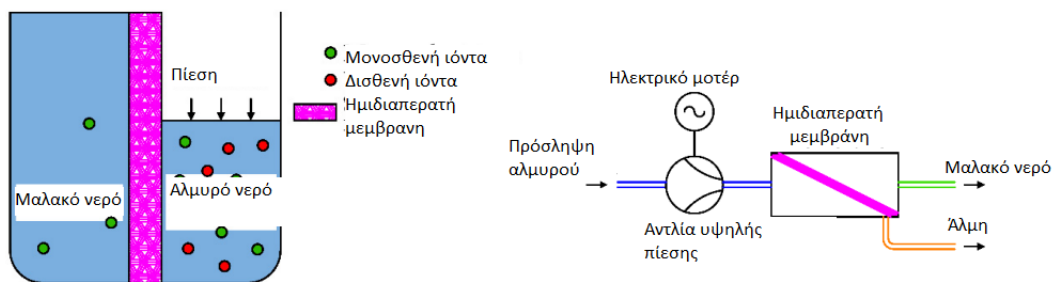
Έτσι, σύμφωνα με τις τιμές που αναφέρθηκαν παραπάνω, η RO ουσιαστικά απαιτεί ηλεκτρική (ή μηχανική) ενέργεια για τη λειτουργία των αντλιών, προκειμένου να αυξήσει σημαντικά την πίεση του θαλασσινού νερού πριν από την ημιδιαπερατή μεμβράνη. Στην Εικόνα 9 απεικονίζεται ένα απλό διάγραμμα μιας μονάδας αφαλάτωσης RO (Curto et al., 2021).



Εικόνα 9. Διάταξη απλής μονάδας αφαλάτωσης με RO (προσαρμοσμένο από Curto et al., 2021)

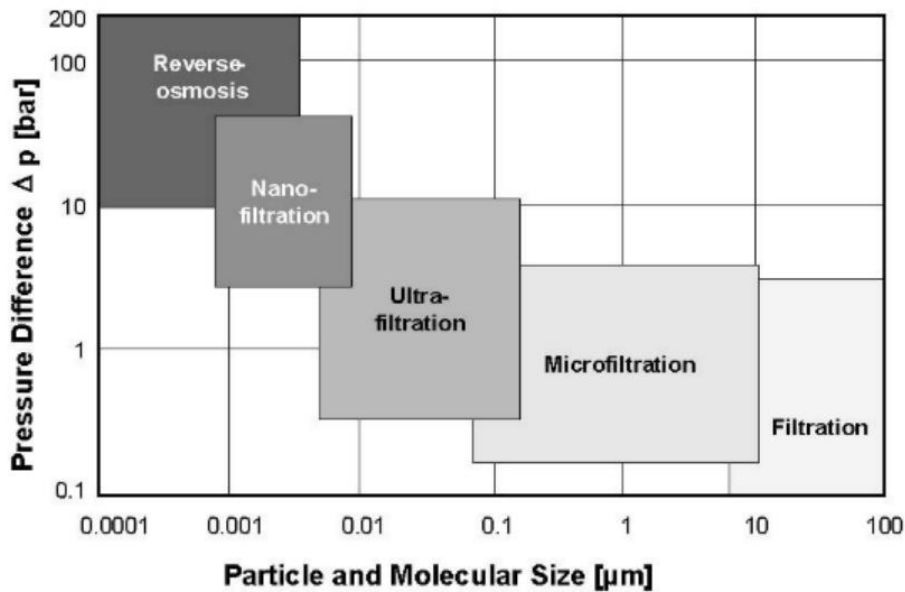
2.2.5 Νανοφιλτράρισμα (NF)

Το Νανοφιλτράρισμα είναι μια διαδικασία διήθησης μεμβράνης, που χρησιμοποιείται για την αφαίρεση διαλυμένων ιόντων ή οργανικής ύλης για την παραγωγή μαλακού νερού, δηλαδή νερού με περιορισμένο αριθμό ιόντων (Ca^{2+} , Mg^{2+} ...). Αυτή η τεχνική είναι εννοιολογικά παρόμοια με την RO. Η κύρια διαφορά τους έγκειται στη δράση, που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση των ιόντων από το αλμυρό νερό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10 (Mohammad et al., 2015).



Εικόνα 10. Διάταξη μιας μονάδας νανοφιλτραρίσματος (προσαρμοσμένο από Curto et al., 2021)

Το νανοφιλτράρισμα χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές όπως η αφαλάτωση του νερού, τα λύματα, η φαρμακευτική και η επεξεργασία τροφίμων. Οι εφαρμογές για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού είναι περιορισμένες, καθώς αυτές οι ημιδιαπερατές μεμβράνες είναι πιο πορώδεις, επιτρέποντας τη διέλευση ορισμένων διαλυμένων στερεών. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 11, οι τεχνολογίες διήθησης ταξινομούνται ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων και μορίων, που εγκλωβίζονται από τη μεμβράνη (Fritzmman et al., 2016).



Εικόνα 11. Τεχνολογίες φιλτραρίσματος με βάση το μέγεθος των σωματιδίων & την πίεση (προσαρμοσμένο από Fritzmann et al., 2016)

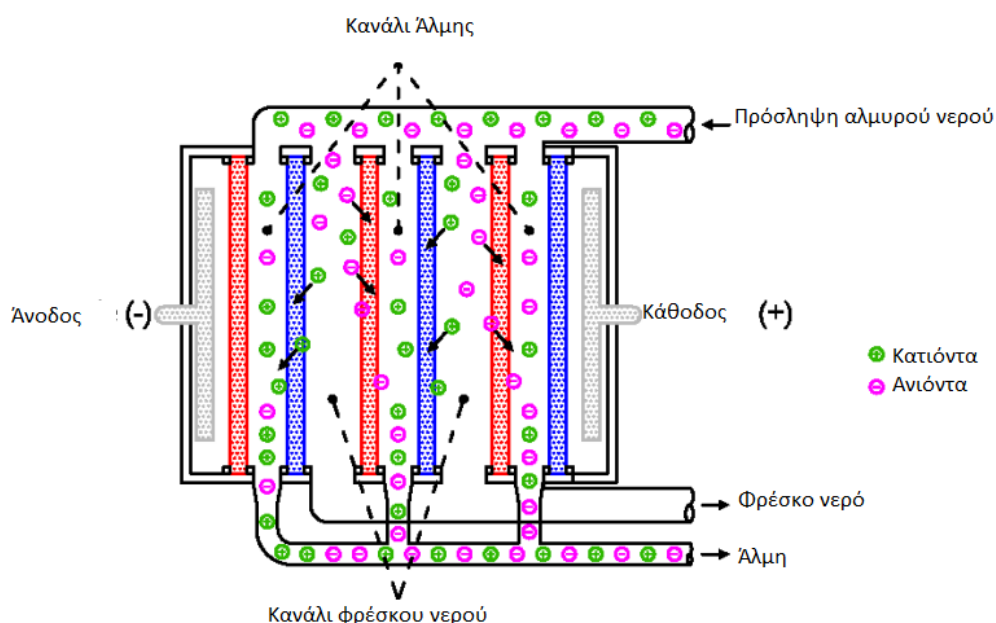
Το πρόθεμα «νανο» σχετίζεται με τα μεγέθη των πόρων, που κυμαίνονται από 1 έως 10 νανόμετρα, πολύ μικρότερα από άλλες τεχνικές φιλτραρίσματος (μικροφίλτρα και υπερδιήθηση), αλλά μεγαλύτερα από ό,τι στη RO. Κατά συνέπεια, αυτή η τεχνολογία αφαιρεί κυρίως δισθενή ιόντα (π.χ. Ca^{2+} και Mg^{2+}), με απόδοση μεταξύ 90% και 98%. Η απομάκρυνση των μονοσθενών ιόντων είναι περιορισμένη (μεταξύ 60% και 85%). Καθώς το μαλακό νερό, που παράγεται από τη διαδικασία NF έχει μεγαλύτερη συγκέντρωση ιόντων εν συγκρίσει με τη RO, πρέπει να εφαρμοστεί χαμηλότερη διαβάθμιση πίεσης στην ημιδιαπερατή μεμβράνη (μεταξύ 34 και 48 bar). Καθώς το NF απαιτεί χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας συγκριτικά με τη RO, αυτή η λύση είναι υπό διερεύνηση για την αφαλάτωση θαλασσινού του νερού, μέσω της εισαγωγής μιας μονάδας δύο βαθμίδων (Mirza, 2008; Mohammad et al., 2015).

2.2.6 Ηλεκτροδιάλυση (ED)

Η ηλεκτροδιάλυση είναι μια διαδικασία ηλεκτροχημικής αφαλάτωσης. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό ημιδιαπερατών μεμβρανών και τη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου για την απομάκρυνση των διαλυμένων ιόντων από το διάλυμα (Greiter et al., 2004). Οι αρχές λειτουργίας της φαίνονται στην Εικόνα 12. Το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται από δύο ηλεκτρόδια, τα οποία τροφοδοτούνται με τάση συνεχούς ρεύματος. Κάθε ιόν έχει ηλεκτρικό φορτίο (θετικό ή αρνητικό). Λόγω του ηλεκτρικού πεδίου, κάθε ιόν επηρεάζεται από μια ηλεκτρική δύναμη ευθέως ανάλογη με το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου και την τιμή του φορτίου των ιόντων. Τα κατιόντα (θετικά ιόντα, όπως Na^+ , Ca^{2+}) έλκονται από την άνοδο, ενώ τα ανιόντα (αρνητικά ιόντα, όπως Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-}) έλκονται από την κάθοδο (Shatat & Riffat, 2014).

Οι ανιονικές και κατιονικές ημιδιαπερατές μεμβράνες εγκαθίστανται εναλλακτικά στην περιοχή

μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Η ανιονική επιτρέπει τη ροή στα ανιόντα, η κατιονική στα κατιόντα. Με αυτόν τον τρόπο, η μετανάστευση των ιόντων, που παράγονται από το ηλεκτρικό πεδίο διακόπτεται επιλεκτικά από τις ημιδιαπερατές μεμβράνες. Επί παραδείγματι, κατά την κίνησή του προς την άνοδο (αριστερά στην εικόνα) ένα θετικό ιόν μπορεί να διασχίσει την κατιονική μεμβράνη, αλλά όχι την ανιονική. Έτσι, το ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί την κίνηση των θετικών φορτίων προς τη δεξιά πλευρά, ενώ η ανιονική μεμβράνη σταματά την κίνηση προς το ηλεκτρόδιο. Με τον ίδιο τρόπο τα αρνητικά ιόντα μεταναστεύουν στην κάθοδο, αλλά μπλοκάρονται από τις κατιονικές μεμβράνες. Ως αποτέλεσμα, τα ιόντα περιορίζονται μέσα στα κανάλια άλμης, αφαιρώντας ιόντα από τα κανάλια του γλυκού νερού (Curto et al., 2021).



Εικόνα 12. Αρχές λειτουργίας μια μονάδας αφαλάτωσης με ηλεκτροδιάλυση(προσαρμοσμένο από Curto et al., 2021)

Οι πρώτες μονάδες ED εισήχθησαν εμπορικά στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Ως λύση για την αποφυγή της εναπόθεσης αλάτων στις μεμβράνες, σε τακτά χρονικά διαστήματα η πολικότητα των ηλεκτροδίων αναστρέφεται για λίγα λεπτά, αλλάζοντας την κίνηση των ιόντων μέσα στη μονάδα. Τα κανάλια τροφοδοσίας νερού λειτουργούν προσωρινά ως κανάλια άλμης και αντίστροφα. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται επί του παρόντος για την παραγωγή γλυκού νερού από υφάλμυρο νερό (αλατότητα έως 2.000 ppm) (Al-Zubari et al., 2017).

2.2.7 Απόσταξη μέσω μεμβρανών (MD)

Η απόσταξη μέσω μεμβρανών (MD) είναι μια διαδικασία αφαλάτωσης, που βασίζεται σε υδρόφοβες μεμβράνες (Kujawa et al., 2017). Η MD είναι θεωρητικά ικανή να απορρίψει όλες τις μη πτητικές διαλυμένες ουσίες (όπως τα άλατα). Το κύριο μειονέκτημα της διαδικασίας MD είναι η μεγάλη ποσότητα ενέργειας, που καταναλώνεται κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης υγρού-

ατμού και η ατελής ανάκτηση της λανθάνουσας θερμότητας. Για αυτούς τους λόγους, η διαδικασία MD είναι ενεργειακά αναποτελεσματική εάν χρησιμοποιείται ως αυτόνομο σύστημα (Chew et al., 2019). Ωστόσο, αυτή η τεχνολογία λειτουργεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από άλλες θερμικές τεχνολογίες μετάβασης φάσης (MSF, MED). Ομοίως, η απαιτούμενη πίεση είναι χαμηλότερη από άλλες τεχνολογίες, που βασίζονται σε μεμβράνες (RO). Η MD μπορεί να λειτουργήσει χρησιμοποιώντας χαμηλής ποιότητας απορριπτόμενη θερμότητα ως πηγή ενέργειας, ενώ λειτουργεί σε χαμηλή πίεση και παρουσιάζει αμελητέα ευαισθησία στη μεταβαλλόμενη αλατότητα του νερού τροφοδοσίας. Εναλλακτικά, η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη μονάδων MD (Sharon & Reddy, 2015).

Κεφάλαιο 3. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

3.1 Ορισμός & Ιστορική Αναδρομή

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) (οι οποίες ονομάζονταν επίσης «εναλλακτικές πηγές ενέργειας») προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως ο άνεμος, η ηλιακή ενέργεια, η υδροηλεκτρική ενέργεια, η γεωθερμική ενέργεια, η βιομάζα και η υδροηλεκτρική ενέργεια (Strielkowski et al., 2021). Στις αρχές του 21^{ου} αιώνα, κατέστη σαφές ότι η ενέργεια από τις συμβατικές πηγές (πετρέλαιο, αέριο, άνθρακας, φυσικό αέριο και πυρηνική ενέργεια) δεν είναι βιώσιμη λύση λόγω της εξάντλησης των ορυκτών καυσίμων, αλλά και των κινδύνων, που συνδέονται με την πυρηνική ενέργεια. Σήμερα, η ανθρωπότητα στρέφεται αυξανόμενα στις ΑΠΕ, επειδή τα ορυκτά καύσιμα αντιπροσωπεύουν πεπερασμένους πόρους και οι περισσότερες εκτιμήσεις δείχνουν ότι τα αποδεδειγμένα αποθέματα πετρελαίου δεν θα επαρκούν για να καλύψουν την παγκόσμια ζήτηση τουλάχιστον μέχρι τα μέσα του 21^{ου} αιώνα (Ucal & Xydis, 2020).

Ο ακριβής ορισμός των ΑΠΕ αποτελεί πρόκληση, κυρίως λόγω της ύπαρξης διαφορετικών ενεργειακών πόρων και επιλογών, καθώς και των διαφόρων στόχων που προάγουν τη λειτουργία τους. Ωστόσο, οι ΑΠΕ ορίζονται αδρά ως όλες εκείνες οι πηγές ενέργειας, που αποτελούν εναλλακτική των ορυκτών πόρων (Maradin, 2021).

Σήμερα, η ανάγκη για ενέργεια για την ικανοποίηση της ανθρώπινης κοινωνικής και οικονομικής ανάπτυξης, ευημερίας και υγείας αυξάνεται (Owusu & Asumadu-Sarkodie, 2016). Η διασφάλιση της επάρκειας ενέργειας και ο περιορισμός της συμβολής αυτής στην κλιματική αλλαγή αποτελούν δύο πρωταρχικές προκλήσεις για την ανάπτυξη ενός βιώσιμου μέλλοντος (Kaygusuz, 2012). Σήμερα, 1,4 δισεκατομμύρια άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ το 85% από αυτούς διαβιεί σε αγροτικές περιοχές. Ως αποτέλεσμα, ο αριθμός των αγροτικών κοινοτήτων, που βασίζονται στην παραδοσιακή χρήση της βιομάζας προβλέπεται να αυξηθεί από 2,7 δισεκατομμύρια σήμερα σε 2,8 δισεκατομμύρια το 2030 (Neha & Joon, 2021).

Όλο και περισσότερες χώρες θέτουν στόχους καθαρών μηδενικών εκπομπών, όπου όλοι οι τομείς εκπομπής και απορρόφησης αερίων του θερμοκηπίου (GHG - Greenhouse Gas) συνδυάζονται. Αυτές οι αναλύσεις συνήθως οδηγούν στην απαίτηση απαλλαγής του ενεργειακού συστήματος από CO₂, και στις περισσότερες χώρες, αυτό σημαίνει 100% παροχή ενέργειας από ΑΠΕ. Ήδη, το 2011, η Δανία έθεσε στόχο να επιτύχει το 100% χρήσης των ΑΠΕ σε όλους τους ενεργειακούς τομείς έως το 2050. Το 2016, 48 χώρες δεσμεύτηκαν στη Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή στο Μαρρακές να φτάσουν τουλάχιστον το 100% της αξιοποίησης των ΑΠΕ στον τομέα της ενέργειας (Breyer et al., 2022).

Όλα αυτά αποτελούν ένα είδος παράδοξου, εφόσον πριν από 200 χρόνια όλη η χρησιμοποιούμενη ενέργεια ήταν ανανεώσιμη και βιώσιμη αυτή καθαυτή: η ανθρωπότητα χρησιμοποιούσε τον άνεμο για την κίνηση των πλοίων και την μετακίνηση ανθρώπων, αγαθών ή νερού και για την κίνηση μηχανών όπως οι

νερόμυλοι. Ήταν η πρώτη Βιομηχανική Επανάσταση, που άνοιξε το δρόμο για την ευρεία χρήση των ορυκτών καυσίμων, η οποία, με τη σειρά της, οδήγησε σε μαζική ρύπανση και, ως αποτέλεσμα, στη στροφή προς τις ΑΠΕ, την αειφόρο ανάπτυξη και τελικά την ψηφιοποίηση του ενεργειακού τομέα (Strielkowski et al., 2021).

Ιστορικά, η πρώτη καταγεγραμμένη εμπορική εξόρυξη άνθρακα πραγματοποιήθηκε το 1.750, κοντά στο Ρίτσμοντ της Βιρτζίνια. Εκείνο το διάστημα, ο άνθρακας αναδείχθηκε στο προτιμώμενο καύσιμο για τις ατμομηχανές λόγω της μεγαλύτερης ικανότητας μεταφοράς ενέργειας από αντίστοιχες ποσότητες καυσίμων με βάση τη βιομάζα (καυσόξυλα και κάρβουνο). Είναι αξιοσημείωτο ότι ο άνθρακας ήταν συγκριτικά φθηνότερος και πολύ πιο καθαρός ως καύσιμο τους προηγούμενους αιώνες (Abbasi, Premalatha & Abbasi, 2011). Η κυριαρχία της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα (άνθρακας, πετρέλαιο και αέριο) και η εκθετική αύξηση του πληθυσμού τις τελευταίες δεκαετίες οδήγησαν σε αυξανόμενη ζήτηση για ενέργεια με αποτέλεσμα παγκόσμιες προκλήσεις που σχετίζονται με την ταχεία αύξηση των εκπομπών CO₂ (Asumadu-Sarkodie & Owusu, 2016). Η κλιματική αλλαγή έχει εξελιχτεί σε μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις του 21^{ου} αιώνα. Οι σοβαρές επιπτώσεις της μπορεί να αποφευχθούν εάν καταβληθούν προσπάθειες για τον μετασχηματισμό των σημερινών ενεργειακών συστημάτων. Οι ΑΠΕ διαθέτουν το δυναμικό να εκτοπίσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, που προκύπτουν από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, βασισμένης σε ορυκτά καύσιμα και με αυτόν τον τρόπο να μετριάσουν την κλιματική αλλαγή (Edenhofer et al., 2011).

Η έρευνα για τις ΑΠΕ αναδύθηκε στα τέλη της δεκαετίας του '90 λόγω της εκθετικής αύξησης των τιμών πετρελαίου (Abbasi et al., 2011). Κυβερνήσεις, διακυβερνητικές υπηρεσίες, ενδιαφερόμενα μέρη και ιδιώτες προσβλέπουν στην επίτευξη ενός βιώσιμου μέλλοντος λόγω της ανάπτυξης των ΑΠΕ. Η αειφόρος ανάπτυξη έχει γίνει το επίκεντρο των πρόσφατων εθνικών πολιτικών, στρατηγικών και αναπτυξιακών σχεδίων πολλών χωρών. Η Γενική Συνέλευση των Ηνωμένων Εθνών πρότεινε ένα σύνολο παγκόσμιων Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΣΒΑ), που περιλάμβανε 17 στόχους και 169 υπο-στόχους. Επιπλέον, ένα προκαταρκτικό σύνολο 330 δεικτών εισήχθη τον Μάρτιο του 2015 (Lu et al., 2015). Για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, η παροχή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τροφίμων, υγείας και νερού απαιτεί συντονισμένη παγκόσμια παρακολούθηση και μοντελοποίηση πολλών παραγόντων που είναι κοινωνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά προσανατολισμένοι (Hák, Janoušková, & Moldan, 2016).

Στις αρχές της δεκαετίας του 2000 παρατηρήθηκαν ανοδικές τάσεις στις παγκόσμιες επενδύσεις σε ΑΠΕ. Διάφοροι παράγοντες έθεσαν τα θεμέλια για αυτήν την ταχεία ανάπτυξη. Οι διάφορες ενεργειακές κρίσεις - που ξεκίνησαν τη δεκαετία του 1970 - και οι επακόλουθες οικονομικές κρίσεις υπογράμμισαν τον ρόλο της ενέργειας τόσο για την εθνική, όσο και για την οικονομική ασφάλεια. Ταυτόχρονα, μερικές πρωτοπόρες χώρες -όπως η Γερμανία, η Δανία, η Ισπανία και οι Ηνωμένες Πολιτείες- πραγματοποίησαν αξιοσημείωτες επενδύσεις για την ανάπτυξη των ΑΠΕ, οι οποίες καθοδήγησαν την πρώιμη τεχνολογική πρόοδο και οδήγησαν σε οικονομίες κλίμακας, συμβάλλοντας

στην εκρηκτική επέκταση της αγοράς των ΑΠΕ την τελευταία δεκαετία. Η αυξανόμενη έμφαση στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και των επιπτώσεων της έχει συμβάλει περαιτέρω στη δυναμική των ΑΠΕ, παγκοσμίως (REN21, 2016).

Βάσει εκτιμήσεων, περισσότερο από το 70% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις Ηνωμένες Πολιτείες το 2021 προέρχονταν από ΑΠΕ (με την ηλιακή ενέργεια να αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μερίδιο της ισχύος με 39%, ακολουθούμενη από την αιολική 31%). Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από μεγάλα υδροηλεκτρικά εργοστάσια, τα οποία αντιπροσωπεύουν περίπου το 6% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ορισμένοι αναλυτές θεωρούν την πυρηνική ενέργεια ως μια μορφή ανανεώσιμης ενέργειας, λόγω των χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας, η πυρηνική ενέργεια παράγει περίπου το 10% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας. Το 2015, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί αντιπροσώπευαν το 16,3%, ή περίπου 16 δισεκατομμύρια κιλοβατώρες (kWh), της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο, που με 4,2 δισεκατομμύρια kWh αντιπροσωπεύει το δεύτερο μεγαλύτερο μερίδιο της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Strielkowski et al., 2021).

Η απαλλαγή του ενεργειακού τομέα από τον άνθρακα είναι εφικτή, γεγονός που εξηγεί γιατί τα ορυκτά καύσιμα αντικαθίστανται από ΑΕΠ. Η αξιοποίηση των ΑΠΕ επιτρέπει την παραγωγή ενέργειας μέσω πόρων, που αναπληρώνονται σε μια χρονική περίοδο χωρίς να εξαντλούνται οι φυσικοί πόροι της γης (Nassar & Tvaronavičienė, 2021). Στην Ευρώπη (EE-27 χώρες), οι ΑΠΕ αντιπροσωπεύουν περίπου το 20% της ακαθάριστης τελικής κατανάλωσης ενέργειας, ενώ στην Ασία, οι το 24% (το 18% εκ των οποίων είναι υδροηλεκτρική ενέργεια) (Elavarasan, 2019). Η αιολική ενέργεια περιλαμβάνει την ηλεκτρική ενέργεια, που παράγεται από μικρές ανεμογεννήτριες σε εμπορικά ακίνητα, και παρέχει περισσότερα από 1,3 εκατομμύρια μεγαβάτ (MW) δυναμικότητας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε 41 πολιτείες των ΗΠΑ (Strielkowski et al., 2021).

3.2 Είδη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

3.2.1 Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια βασίζεται απευθείας στην ενέργεια του ήλιου. Η παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας, η ηλιακή ενέργεια, η παραγωγή θερμικής ενέργειας, η παραγωγή άμεσου φωτισμού και θεωρητικά, η παραγωγή καυσίμου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεταφορές και άλλες χρήσεις προέρχονται από τεχνολογίες ηλιακής ενέργειας (Neha & Joon, 2021). Ο ήλιος παράγει την ενέργειά του μέσω μιας θερμοπυρηνικής διαδικασίας, που μετατρέπει περίπου 650.000.000 τόνους υδρογόνου σε ήλιο κάθε δευτερόλεπτο. Η ενέργεια προέρχεται από αντιδράσεις σύντηξης στον πυρήνα του, ενώ η διαδικασία εκλύει θερμότητα και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Αυτές οι αντιδράσεις πραγματοποιούνται εδώ και 4,5 δισεκατομμύρια χρόνια και αναμένεται να συνεχιστούν για άλλα 6,5 δισεκατομμύρια χρόνια. Η συνολική ισχύς, που εκπέμπεται στο διάστημα από τον ήλιο είναι περίπου $3,86 \times 10^{26}$ W. Δεδομένου ότι

ο ήλιος απέχει περίπου $1,5 \times 10^{11}$ m από τη γη και λαμβάνοντας υπόψη ότι η γη έχει ακτίνα περίπου $6,3 \times 10^6$ m, αυτή ανακόπτει μόνο το 0,000000045% αυτής της ισχύος (Kennewell & McDonald, 2015), που ανέρχεται σε $1,75 \times 10^{17}$ W. Η θερμότητα παραμένει στον ήλιο και είναι καθοριστικής σημασίας για τη διατήρηση της θερμοπυρηνικής αντίδρασης. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (συμπεριλαμβανομένου του ορατού φωτός, του υπέρυθρου φωτός και της υπεριώδους ακτινοβολίας) διαχέεται στο διάστημα προς όλες τις κατευθύνσεις (Lakatos et al., 2012; Corkish et al., 2016).

Λόγω της φύσης της ηλιακής ενέργειας, απαιτούνται δύο συστατικά για την αποτελεσματική συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας και την μετατροπή της σε άλλες μορφές ενέργειας (είτε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα είτε μόνο θερμότητα). Η μονάδα αποθήκευσης απαιτείται λόγω της μη σταθερής φύσης της ηλιακής ενέργειας και των σχετικών διακυμάνσεων, π.χ. κατά τη διάρκεια της νύχτας ή έντονης νεφοκάλυψης. Αυτά τα δύο συστατικά περιλαμβάνουν το συλλέκτη και μια μονάδα αποθήκευσης. Η μονάδα αποθήκευσης μπορεί να συγκρατήσει την περίσσεια ενέργειας, που παράγεται κατά τις περιόδους μέγιστης παραγωγικότητας και να την απελευθερώσει σε περιόδους χαμηλής παραγωγικότητας. Στην πράξη, συνήθως προστίθεται ένα εφεδρικό τροφοδοτικό για τις περιπτώσεις όπου η απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας είναι μεγαλύτερη από την παραγόμενη ή από αυτήν που αποθηκεύεται (Keskar, 2013).

Όσον αφορά τα πλεονεκτήματα της ηλιακής ενέργειας, αυτή είναι δωρεάν και απεριόριστη, ενώ δεν ρυπαίνει το περιβάλλον. Η χρήση ηλιακής ενέργειας δεν εκπέμπει αέρια θερμοκηπίου ή επιβλαβή απόβλητα. Περαιτέρω, προσφέρεται για την παραγωγή ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές ή όπου το κόστος επέκτασης του δικτύου κοινής ωφέλειας είναι υψηλό. Χαρακτηρίζεται επίσης από ευελιξία, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές χαμηλής και υψηλής κατανάλωσης: από αριθμομηχανές χειρός, ρολόγια και φωτιστικά κήπου έως θερμοσίφωνες, αυτοκίνητα, κτίρια και δορυφόρους. Επίσης λόγω της απλής κατασκευής και του χαμηλού κόστους συντήρησής τους, τα ηλιακά συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως για σκοπούς παραγωγής (Duranay et al., 2021).

Από την άλλη, η ηλιακή ενέργεια δεν στερείται μειονεκτημάτων. Ειδικότερα, απαιτούνται μεγάλες επιφάνειες για τη συλλογή μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Σε οποιαδήποτε δεδομένη θέση στη γη, η ένταση και το φάσμα του ηλιακού φωτός ποικίλλει τόσο με προβλέψιμο όσο και με λιγότερο προβλέψιμο τρόπο, οδηγώντας σε διαλείπουσα παροχή. Η κλίση του άξονα της γης σημαίνει εποχιακές αλλαγές στη διαθεσιμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας, με αλλαγές στην έκταση του φωτός της ημέρας. Ένα άλλο μειονέκτημα έγκειται στο ότι δεν κατανέμεται ομοιόμορφα γεωγραφικά, εφόσον ορισμένες περιοχές έχουν μεγαλύτερη ηλιοφάνεια από άλλες. Επιπλέον, η εισαγωγή της ηλιακής ενέργειας στα υπάρχοντα συστήματα διανομής ενέργειας πρέπει να συμμορφώνεται με την υπάρχουσα υποδομή, που δημιουργήθηκε με βάση τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Τέλος, υπάρχει μια μεγάλη γκάμα τεχνολογιών μετατροπής ηλιακής ενέργειας, μερικές απλές και άλλες τεχνικά πολύπλοκες, οι οποίες, ενώ ανταγωνίζονται μαζί με την καθιερωμένη ενέργεια που προέρχεται από ορυκτά και την πυρηνική ενέργεια, ανταγωνίζονται επίσης μεταξύ τους (Corkish et al., 2016).

3.2.2 Υδροηλεκτρική ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι μια πηγή ενέργειας, που αξιοποιεί το νερό που κινείται από υψηλότερα σε χαμηλότερα υψομετρικά επίπεδα, κυρίως για την περιστροφή των στροβίλων και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα έργα υδροηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που μεταξύ άλλων περιλαμβάνουν φράγματα με ταμιευτήρες, έργα ρύθμισης της ροής ποταμού και ενδιάμεσα έργα. Οι τεχνολογίες υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι τεχνικά ώριμες, ενώ η λειτουργία των ταμιευτήρων υδροηλεκτρικής ενέργειας προσφέρεται για ποικίλες χρήσεις, π.χ. την άρδευση, τον έλεγχο των πλημμυρών και της ξηρασίας, το πόσιμο νερό και τη ναυσιπλοΐα (Edenhofer et al., 2011). Η πρωτογενής ενέργεια παρέχεται από τη βαρύτητα και το ύψος πτώσης του νερού στον στρόβιλο. Η δυναμική ενέργεια του αποθηκευμένου νερού είναι η μάζα του νερού, ο συντελεστής βαρύτητας ($g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$) και η κεφαλή που ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της στάθμης του φράγματος και της στάθμης του ουραίου νερού. Η στάθμη του ταμιευτήρα μεταβάλλεται σε κάποιο βαθμό προς τα κάτω, όταν απελευθερώνεται νερό και κατά συνέπεια επηρεάζει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Førsund, 2015). Η υδροηλεκτρική ενέργεια δεν εκφορτώνει σχεδόν καθόλου σωματιδιακή ρύπανση, μπορεί να αναβαθμιστεί ταχέως και είναι ικανή να αποθηκεύει ενέργεια για πολλές ώρες (Wu et al., 2018).

Το τεχνικό ετήσιο δυναμικό παραγωγής της υδροηλεκτρικής ανέρχεται σε 14.576 TWh, με εκτιμώμενο συνολικό δυναμικό ισχύος 3.721 GW. Ωστόσο, αυτή τη στιγμή η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς της υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ μικρότερη από το δυναμικό της. Σύμφωνα με την Έκθεση του Παγκόσμιου Συμβουλίου Ενέργειας, περίπου το 50% της εγκατεστημένης ισχύος υδροηλεκτρικής ενέργειας εντοπίζεται σε τέσσερις χώρες, ήτοι την Κίνα, την Βραζιλία, τον Καναδά και τις ΗΠΑ (Asumadu-Sarkodie & Owusu, 2016). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το δυναμικό της υδροηλεκτρικής ενέργειας θα μπορούσε να μεταβληθεί σε βάθος χρόνου λόγω της κλιματικής αλλαγής. Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι αλλαγές που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή στο υπάρχον σύστημα παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας εκτιμάται ότι είναι μικρότερες από 0,1%. Ωστόσο, απαιτείται πρόσθετη έρευνα για την εξακρίβωση των προβλέψεων αυτών (Edenhofer et al., 2011).

Η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας δεν παράγει αέρια θερμοκηπίου και, ως εκ τούτου, χαρακτηρίζεται ως πράσινη πηγή ενέργειας. Ωστόσο, πέραν των πλεονεκτημάτων διαθέτει και μειονεκτήματα. Ενώ δύναται να βελτιώσει την κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη μιας χώρας, έχει και αξιοσημείωτες κοινωνικές προεκτάσεις, εφόσον η δημιουργία υδροηλεκτρικών σταθμών εκτοπίζει πολλούς ανθρώπους από τις εστίες τους. Παρά το γεγονός ότι αυτοί οι εκτοπισμένοι πολίτες αποζημιώνονται, ο κοινωνικός αντίκτυπος παραμένει σημαντικός (Førsund, 2015). Περαιτέρω, η υλοποίηση υδροηλεκτρικών έργων, π.χ. ταμιευτήρων μέσω τεχνητών λιμών, επηρεάζει το φυσικό περιβάλλον. Επιπροσθέτως, οι υδροηλεκτρικές δομές επηρεάζουν την οικολογία του σώματος του ποταμού, προκαλώντας σε μεγάλο βαθμό μια αλλαγή στα υδρολογικά χαρακτηριστικά του και διαταράσσοντας την οικολογική συνέχεια της μεταφοράς ιζημάτων και της μετανάστευσης των ψαριών μέσω της κατασκευής αναχωμάτων και φραγμάτων (Edenhofer et al., 2011). Σε χώρες, όπου

πλημμυρίζονται εκτεταμένες περιοχές με φυτά και δέντρα κατά την κατασκευή ενός φράγματος, υπάρχει το ενδεχόμενο σχηματισμού αερίου μεθανίου είτε κατά την αποσύνθεση των φυτών στο νερό, είτε μέσω της απευθείας απελευθέρωσης του, είτε κατά το στάδιο επεξεργασίας του νερού σε τουρμπίνες (Asumadu-Sarkodie & Owusu, 2016).

3.2.2 Αιολική ενέργεια

Ο άνεμος ως σημαντική πηγή ενέργειας έχει κερδίσει σημαντικό προβάδισμα μεταξύ των ΑΠΕ, παγκοσμίως. Υπάρχει παντού στον κόσμο, σε ορισμένα μέρη με σημαντική ενεργειακή πυκνότητα. Η αιολική ενέργεια αξιοποιεί την κινητική ενέργεια του αέρα. Η πρωταρχική εφαρμογή της για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής έγκειται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μεγάλους στρόβιλους, που βρίσκονται εγκατεστημένοι είτε στην ξηρά, είτε στη θάλασσα. Οι χειρσαίες τεχνολογίες αιολικής ενέργειας ήδη κατασκευάζονται και αναπτύσσονται σε μεγάλη κλίμακα, ενώ οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική (Neha & Joon, 2021).

3.2.3 Γεωθερμική ενέργεια

Η γεωθερμική ενέργεια λαμβάνεται φυσικά από το εσωτερικό της γης. Η προέλευση της θερμότητας συνδέεται με την εσωτερική δομή του πλανήτη και τις φυσικές διεργασίες, που λαμβάνουν χώρα εκεί. Παρά το γεγονός ότι η θερμότητα υπάρχει στον φλοιό της γης σε τεράστιες ποσότητες, καθώς επίσης σε βαθύτερα τμήματα, είναι άνισα κατανομημένη, σπάνια συγκεντρωμένη και συχνά σε πολύ μεγάλα βάθη, που δεν επιτρέπουν την μηχανική της αξιοποίηση (Balcioglu et al., 2017).

Η μέση γεωθερμική κλίση είναι περίπου 30 °C/km. Υπάρχουν περιοχές του εσωτερικού της γης που είναι προσβάσιμες με γεωτρήσεις και όπου η κλίση είναι πολύ μεγαλύτερη της μέσης κλίσης (Barbier, 2022). Η εξόρυξη θερμότητας πραγματοποιείται με γεωθερμικές δεξαμενές μέσω πηγαδιών και άλλων μέσων. Οι δεξαμενές, που διαθέτουν εκ φύσεως επαρκή θερμοκρασία και είναι διαπερατές, ονομάζονται υδροθερμικές δεξαμενές, ενώ οι δεξαμενές που διαθέτουν επαρκή θερμοκρασία, αλλά βελτιώνονται με υδραυλική διέγερση ονομάζονται ενισχυμένα γεωθερμικά συστήματα (ESG - Enhanced Geothermal Systems). Μόλις ανέλθουν στην επιφάνεια, τα ρευστά διαφόρων θερμοκρασιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και άλλους σκοπούς, που απαιτούν τη χρήση θερμικής ενέργειας (Edenhofer et al., 2011).

3.2.4 Ενέργεια από βιομάζα (χημική/θερμική)

Η βιοενέργεια είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, που προέρχεται από βιολογικές πηγές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεταφορά με χρήση βιοντίζελ, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μαγείρεμα και θέρμανση. Η ηλεκτρική ενέργεια από βιοενέργεια προέρχεται από ένα ευρύ φάσμα πηγών,

συμπεριλαμβανομένων των δασικών υποπροϊόντων όπως τα υπολείμματα ξύλου, γεωργικά υπολείμματα όπως απόβλητα ζαχαροκάλαμου και υπολείμματα κτηνοτροφίας όπως κοπριά αγελάδας (Neha & Joon, 2021). Ένα πλεονέκτημα της παραγωγής ηλεκτρισμού με βάση την ενέργεια από βιομάζα, είναι ότι το καύσιμο είναι συχνά υποπροϊόν, υπόλειμμα ή απόβλητο από τις παραπάνω πηγές. Επιπλέον, δεν δημιουργεί ανταγωνισμό μεταξύ της γης για τρόφιμα και της γης για καύσιμα. Επί του παρόντος, η παγκόσμια παραγωγή βιοκαυσίμων είναι συγκριτικά χαμηλή, αλλά συνεχώς αυξάνεται (Asumadu-Sarkodie & Owusu, 2016).

Η βιομάζα έχει μεγάλο δυναμικό, το οποίο ανταποκρίνεται στον στόχο της μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου και θα μπορούσε να εξασφαλίσει την προσφορά καυσίμων στο μέλλον. Επί της παρούσης, πραγματοποιούνται εκτεταμένες έρευνες στον τομέα της τεχνολογίας βιομάζας. Το θεωρητικό δυναμικό της βιοενέργειας στη συνολική επιφάνεια της γης υπολογίζεται σε περίπου 3.500 EJ/έτος. Το μεγαλύτερο μέρος αυτού του δυναμικού βρίσκεται στη Νότια Αμερική και την Καραϊβική (47–221 EJ/έτος), την υποσαχάρια Αφρική (31–317 EJ/έτος), την Κοινοπολιτεία Ανεξάρτητων Κρατών και τα κράτη της Βαλτικής (45–199 EJ/έτος). Η απόδοση της βιομάζας και το δυναμικό της ποικίλλει από χώρα σε χώρα, από μεσαίες αποδόσεις σε θερμοκρασία έως υψηλές επιδόσεις σε υποτροπικές και τροπικές χώρες. Με τη βιομάζα, πολλές έρευνες επικεντρώνονται σε μια περιβαλλοντικά αποδεκτή και βιώσιμη πηγή για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής (Asumadu-Sarkodie & Owusu, 2016; Balcioglu et al., 2017).

Η χρήση βιολογικών συστατικών (φυτικής και ζωικής πηγής) για την παραγωγή ενέργειας εγείρει ανησυχίες, ιδιαίτερα στο ευρύ κοινό ως προς την επισιτιστική ασφάλεια. Περίπου το 99,7% των τροφίμων προέρχεται από το χερσαίο περιβάλλον, ενώ περίπου το 0,3% προέρχεται από τον υδάτινο τομέα. Το μεγαλύτερο μέρος της γης, που είναι κατάλληλο για παραγωγή βιομάζας χρησιμοποιείται ήδη (Ajanovic, 2011). Η διεθνής βιβλιογραφία έχει υπογραμμίσει τόσο τις θετικές, όσο και τις αρνητικές περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις της βιοενέργειας. Όπως τα παραδοσιακά συστήματα γεωργίας και δασοκομίας, η βιοενέργεια μπορεί να επιδεινώσει την υποβάθμιση του εδάφους και της βλάστησης που σχετίζεται με την υπερεκμετάλλευση των δασών και των αγρών, καθώς επίσης την υπερβολική χρήση νερού. Η εκτροπή των καλλιεργειών ή της γης στην παραγωγή βιοενέργειας μπορεί να προκαλέσει αύξηση στις τιμές των βασικών προϊόντων διατροφής και επισιτιστική ανασφάλεια. Η σωστή επιχειρησιακή διαχείριση, μπορεί να επιφέρει ορισμένα θετικά αποτελέσματα, που περιλαμβάνουν την ενίσχυση της βιοποικιλότητας (Asumadu-Sarkodie & Owusu, 2016; Neha & Joon, 2021).

3.2.5 Κυματική/ Παλιρροϊκή ενέργεια & θερμική ενέργεια από τους ωκεανούς

Τα επιφανειακά κύματα δημιουργούνται όταν ο άνεμος διέρχεται πάνω από το νερό (Ωκεανός). Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου, τόσο περισσότερο διατηρείται ο άνεμος, τόσο μεγαλύτερη απόσταση διανύει, τόσο μεγαλύτερο είναι το ύψος κύματος και τόσο μεγαλύτερη είναι η παραγόμενη ενέργεια. Ο ωκεανός αποθηκεύει αρκετή ενέργεια για την κάλυψη της συνολικής παγκόσμιας ζήτησης

πολλές φορές υπό τη μορφή κυμάτων, παλίρροιας, ρευμάτων και θερμότητας (Balcioglu et al., 2017). Το 2008 αναδύθηκε η πρώτη γενιά εμπορικών συσκευών για την παραγωγή ωκεάνιας ενέργειας, με τις πρώτες μονάδες να εγκαθίστανται στο Ηνωμένο Βασίλειο και την Πορτογαλία. Υπάρχουν επί του παρόντος τέσσερις τρόποι λήψης ενέργειας από θαλάσσιες περιοχές, συγκεκριμένα από τον άνεμο, τις παλίρροιας, τα κύματα και τις θερμικές διαφορές μεταξύ βαθέων και ρηχών θαλάσσιων υδάτων (Esteban & Leary, 2012).

3.3 ΑΠΕ, Βιωσιμότητα & Κλιματική Αλλαγή

Η αειφόρος ενέργεια ορίζεται ως «*μια δυναμική αρμονία μεταξύ της δίκαιης διαθεσιμότητας αγαθών και υπηρεσιών έντασης ενέργειας σε όλους τους ανθρώπους και της διατήρησης της γης για τις μελλοντικές γενιές*» (Carts-Powell, 2007). Όπως προαναφέρθηκε, η εκτεταμένη χρήση των ορυκτών καυσίμων έχει οδηγήσει σε μια σειρά προκλήσεων συμπεριλαμβανομένης της εξάντλησης των πόρων, των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και άλλων περιβαλλοντικών ανησυχιών, γεωπολιτικών και στρατιωτικών συγκρούσεων και των συνεχών διακυμάνσεων των τιμών των καυσίμων. Αυτά τα προβλήματα θα δημιουργήσουν μη βιώσιμες καταστάσεις που τελικά θα οδηγήσουν σε δυνητικά μη αναστρέψιμη απειλή για τις ανθρώπινες κοινωνίες (UNFCCC, 2015). Παρόλα αυτά, οι ΑΠΕ είναι η πιο σημαντική εναλλακτική και η μόνη προφανής λύση για τις αυξανόμενες προκλήσεις. Το 2012, οι ΑΠΕ παρείχαν το 22% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας, κάτι που δεν θα ήταν δυνατό πριν από μια δεκαετία (Neha & Joon, 2021).

Οι ΑΠΕ έχουν άμεση σχέση με τη βιώσιμη ανάπτυξη, που μεσολαβείται από τις άμεσες επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη ανάπτυξη και την οικονομική παραγωγικότητα. Παρέχουν σημαντικές ευκαιρίες σε όρους ενεργειακής ασφάλειας, κοινωνικής και οικονομικής ανάπτυξης, πρόσβασης σε ενέργεια, μετριασμού της κλιματικής αλλαγής και μείωσης των επιπτώσεων στο περιβάλλον και την υγεία (Asumadu-Sarkodie & Owusu, 2016). Η αξιόπιστη παροχή ενέργειας είναι απαραίτητη σε όλες τις οικονομίες για θέρμανση, φωτισμό, βιομηχανικό εξοπλισμό, μεταφορές κ.λπ. Εφόσον οι ΑΠΕ προέρχονται φυσικά από συνεχείς ροές ενέργειας στο περιβάλλον, είναι εύλογο να υποθεθεί ότι είναι βιώσιμες. Προκειμένου να είναι βιώσιμη η ανανεώσιμη ενέργεια, πρέπει να είναι απεριόριστη και να παρέχει αγαθά και υπηρεσίες, που δεν είναι επιβλαβείς για το περιβάλλον. Επί παραδείγματι, ένα βιώσιμο βιοκαύσιμο δεν θα πρέπει να αυξάνει τις καθαρές εκπομπές CO₂, δεν πρέπει να επηρεάζει δυσμενώς την επισιτιστική ασφάλεια, ούτε να απειλεί τη βιοποικιλότητα (Twidell, 2021). Ωστόσο, κάτι τέτοιο σήμερα δεν συμβαίνει (Maradin, 2021).

Επί του παρόντος, ο όρος «κλιματική αλλαγή» παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον και συχνά αποτελεί το επίκεντρο των επιστημονικών και πολιτικών συζητήσεων. Το κλίμα αλλάζει από την απαρχή του πλανήτη, αλλά αυτό που προκαλεί ανησυχία είναι η ταχύτητα της αλλαγής τα τελευταία χρόνια. Η Σύμβαση Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή ορίζει ότι η κλιματική αλλαγή αποδίδεται άμεσα ή έμμεσα σε ανθρώπινες δραστηριότητες, που αλλάζουν τη σύνθεση της παγκόσμιας ατμόσφαιρας και η οποία με τη σειρά της παρουσιάζει μεταβλητότητα στο φυσικό κλίμα που παρατηρείται

σε συγκρίσιμες χρονικές περιόδους (Asumadu-Sarkodie & Owusu, 2017; Strielkowski et al., 2021).

Σε αυτήν την κατεύθυνση, οι ΑΠΕ θεωρούνται καθαρές πηγές ενέργειας και η βέλτιστη χρήση αυτών των πόρων μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, παράγει ελάχιστα δευτερεύοντα απόβλητα και είναι βιώσιμες με βάση τις τρέχουσες και μελλοντικές οικονομικές και κοινωνικές ανάγκες. Οι τεχνολογίες ΑΠΕ παρέχουν μια εξαιρετική ευκαιρία για τον μετριασμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και τη μείωση της υπερθέρμανσης του πλανήτη (Strielkowski et al., 2021).

Εκτός από τα πολλαπλά πλεονεκτήματα της χρήσης ΑΠΕ, υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα και περιορισμοί στην καθημερινή χρήση τους, που συνδέονται κυρίως με τα φυσικά χαρακτηριστικά τους και την εξ ολοκλήρου εξάρτησή τους από τη γεωγραφική θέση και τις καιρικές συνθήκες. Με άλλα λόγια, η αστάθεια και η μη προβλεψιμότητα της ανανεώσιμης πηγής αποτελεί σημαντικό περιορισμό και δυσκολία στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να αμβλυνθεί με τον ποιοτικό σχεδιασμό και την προσεκτική επιλογή τοποθεσίας, καθώς και με τη διεξαγωγή μετρήσεων και την εκπόνηση περιβαλλοντικών μελετών (Maradin, 2021). Ωστόσο, είναι θετικό ότι οι συνεχείς τεχνολογικές εξελίξεις στο υλικό και το λογισμικό υπολογιστών επιτρέπουν στους ερευνητές του πεδίου να χειριστούν αυτές τις δυσκολίες βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας τους ενδεδειγμένους υπολογιστικούς πόρους (Baños et al., 2011). Περαιτέρω, εν συγκρίσει με τις παραδοσιακές ορυκτές πηγές ενέργειας, οι ΑΠΕ δεν είναι σε θέση να παράγουν τόσο μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας. Προκειμένου να περιοριστεί αυτή η ανεπάρκεια, είναι απαραίτητο να γίνουν περαιτέρω επενδύσεις στην ανάπτυξη τεχνολογιών ΑΠΕ (Kayode Agboola, 2014).

Τέλος, ένα ακόμα σημαντικό μειονέκτημα της χρήσης ΑΠΕ είναι αναμφίβολα το σχετικά υψηλό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που σχετίζεται με το υψηλότερο κόστος κατασκευής των ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, που χρησιμοποιούν θαλάσσια ενέργεια, των οποίων η τεχνολογία είναι εξαιρετικά δαπανηρή και λόγω της ιδιαιτερότητας της τοποθεσίας, πολλώ δε μάλλον αν ληφθεί υπόψη η αμελητέα συνεισφορά της στη συνολική παραγωγή ενέργειας. Αντίστοιχη είναι και η εικόνα στην περίπτωση της κατασκευής φωτοβολταϊκών, που συνδέεται και με το υψηλό κόστος της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας και την πολυπλοκότητα της κατασκευής ηλιακών συλλεκτών (Owusu & Asumadu-Sarkodie, 2016; Maradin, 2021).

Κεφάλαιο 4. Χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε Μονάδες Αφαλάτωσης

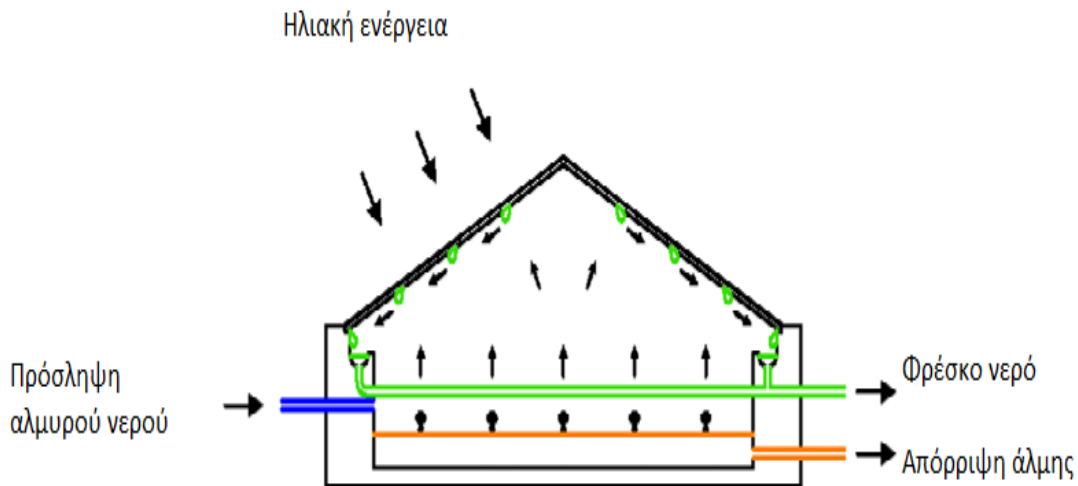
Η όλη διαδικασία αφαλάτωσης απαιτεί ενέργεια για την απομάκρυνση του αλατιού από το θαλασσινό νερό. Εάν η αφαλάτωση πραγματοποιείται με συμβατική τεχνολογία, θα απαιτηθεί η καύση μεγάλων ποσοτήτων ορυκτών καυσίμων (η παραγωγή 1000 m³/ημέρα καθαρού νερού απαιτεί 10.000 τόνους πετρελαίου ετησίως). Καθώς η διαθεσιμότητα αυτών των καυσίμων μειώνεται, απαιτείται ο συνδυασμός της με εφαρμογές ΑΠΕ (Kusumadewi et al., 2021).

4.1 Τεχνικές αφαλάτωσης μέσω ηλιακής ενέργειας

Μια πηγή ενέργειας για την αφαλάτωση είναι η χρήση ηλιακής ενέργειας, που αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη λύση για εξοικονόμηση κόστους. Η ηλιακή αφαλάτωση μπορεί να χωριστεί σε άμεσες και έμμεσες τεχνολογίες. Στην άμεση μέθοδο, ο συλλέκτης ηλιακής ενέργειας και το στοιχείο αφαλάτωσης είναι αναπόσπαστες μονάδες, για παράδειγμα, ένας ηλιακός αποστακτήρας. Στην έμμεση μέθοδο, η ηλιακή ενέργεια απορροφάται από έναν ηλιακό συλλέκτη και στη συνέχεια μεταφέρεται στο αλατούχο νερό τροφοδοσίας (Alnaimat et al., 2018). Ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι η απαίτηση για μεγάλες εκτάσεις για την συλλογή ηλιοφάνειας, κάτι που συνεπάγεται υψηλό κόστος κεφαλαίου (Kusumadewi et al., 2021). Περαιτέρω, η μετάβαση στην ηλιακή αφαλάτωση είναι μια σύνθετη διαδικασία που περιλαμβάνει τεχνικούς (Armin Razmjoo et al., 2019), κοινωνικούς, πολιτικούς και οικονομικούς παράγοντες, καθώς επίσης περιβαλλοντικές πτυχές (Sindhu et al., 2016).

4.1.1 Ηλιακός αποστακτήρας (SSD)

Ο ηλιακός αποστακτήρας (SSD) μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας μια δεξαμενή που περιέχει αλατούχο διάλυμα, νερό και αέρα (Shanon & Reddy, 2015). Η συσκευή καλύπτεται με κεκλιμένο γυαλί. Με αυτόν τον τρόπο η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στο σύστημα, αυξάνοντας τη θερμοκρασία και διευκολύνοντας την εξάτμιση του γλυκού νερού. Η εσωτερική υγρασία συμπυκνώνεται στην επιφάνεια του γυάλινου τμήματος, καθώς αυτό έχει τη χαμηλότερη θερμοκρασία. Το συμπύκνωμα συλλέγεται, λαμβάνοντας γλυκό νερό. Μια πιθανή λύση απεικονίζεται στην Εικόνα 13. Το συμπύκνωμα χαρακτηρίζεται από υψηλή ποιότητα, με ημερήσια παραγωγή περίπου 2–3 l/m². Κατά συνέπεια, αυτό το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε μικρές εφαρμογές (Curto et al., 2021).

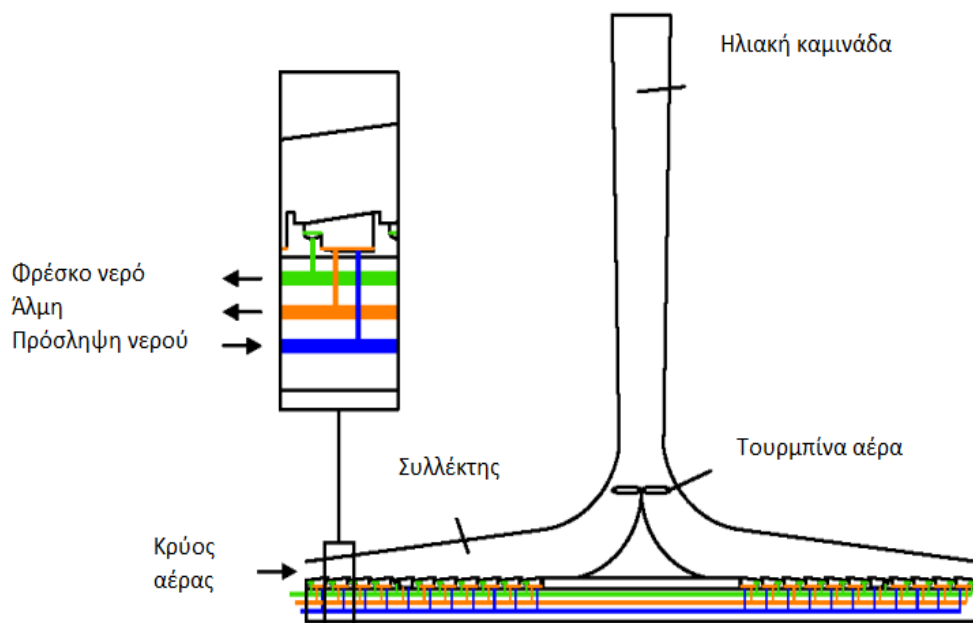


Εικόνα 13. Διάταξη ηλιακού αποστακτήρα(προσαρμοσμένο από Alnaimat et al., 2018)

Οι ηλιακοί αποστακτήρες είναι συνήθως λιγότερο από 50% αποδοτικοί, π.χ. χρησιμοποιούν λιγότερο από το 50% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Ένας γενικός εμπειρικός κανόνας είναι ότι περίπου 1 m² εδάφους συλλογής ηλιακού φωτός παράγει 3-5 L λίτρα γλυκού νερού την ημέρα. Εξαιτίας αυτού, είναι σημαντικό να χρησιμοποιούνται πολύ φθηνά υλικά κατασκευής για την ελαχιστοποίηση του κόστους κεφαλαίου. Ακόμα κι έτσι, το κόστος εγκατάστασης των ηλιακών αποστακτηρών τείνει να είναι σημαντικά υψηλότερο από άλλες μεθόδους (Alnaimat et al., 2018). Επιπλέον, οι αποστακτήρες είναι ευάλωτοι στις βλάβες λόγω καιρικών συνθηκών και απαιτούν μεγάλες εκτάσεις γης για εγκατάσταση, ενώ έχουν χαμηλή απόδοση. Οι τροποποιήσεις στους αποστακτήρες, προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση, όπως οι αισθητήρες για την παρακολούθηση της ηλιοφάνειας, έχουν γενικά αποδειχθεί πολύ ακριβές, ώστε να είναι πρακτικές. Ωστόσο, οι σταθεροί αποστακτήρες με κλίση προς τον ήλιο παρουσιάζουν αύξηση της παραγωγής ενέργειας κατά 16% περίπου. Η κύρια απώλεια ενέργειας από τους ηλιακούς αποστακτήρες είναι η ακτινοβολία χαμηλής ενέργειας από την άλη προς το κάλυμμα, ενώ οι απώλειες θερμότητας προς το έδαφος είναι μικρές (Eltawil et al., 2008).

4.1.2 Ηλιακή καμινάδα

Η διάταξη μιας μονάδας ηλιακής καμινάδας για την αφαλάτωση παρουσιάζεται στην Εικόνα 14 (Shanon & Reddy, 2015). Ένας μεγάλος ηλιακός συλλέκτης χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας στην κινητική ενέργεια του αέρα, χάρη στο σχήμα της καμινάδας, το οποίο είναι κατασκευασμένο από διαφανές υλικό (γυαλί ή πλαστικό). Η ροή αέρα στο εσωτερικό του συστήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εάν εγκατασταθεί μια μικρή ανεμογεννήτρια. Ο ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από πολλές μικρές μονάδες SSD. Με αυτόν τον τρόπο η ηλιακή πηγή χρησιμοποιείται επίσης για την παραγωγή γλυκού νερού. Αυτή η τεχνολογία βρίσκεται επί της παρούσης υπό διερεύνηση (Maia et al., 2019).



Εικόνα 14. Μονάδα αφαλάτωσης ηλιακής καμινάδας (προσαρμοσμένο από Curto et al., 2021)

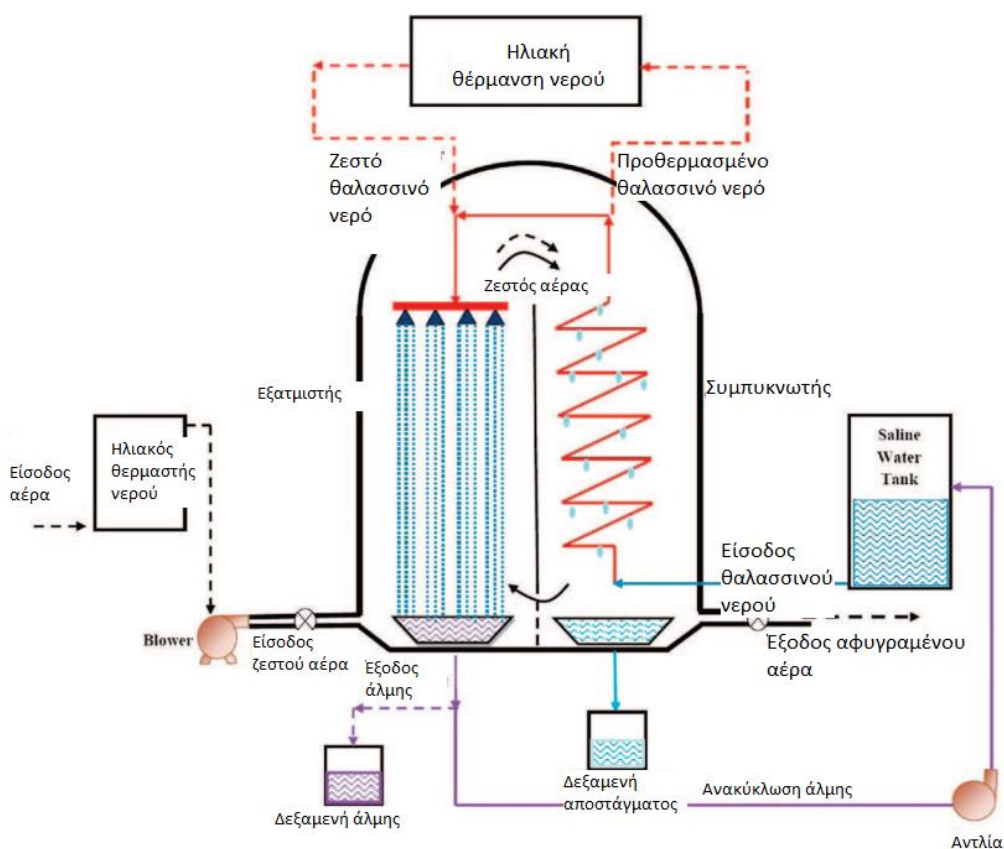
4.1.3 Ηλιακή λίμνη

Η θερμική αφαλάτωση με ηλιακές λίμνες με διαβάθμιση αλατότητας είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία αφαλάτωσης, καθώς είναι λιγότερο δαπανηρή σε σύγκριση με άλλες επιλογές αφαλάτωσης, που βασίζονται στην ηλιακή ενέργεια. Οι ηλιακές λίμνες παρέχουν τη φθηνότερη επιλογή για την αποθήκευση της θερμότητας, η οποία είναι μια σημαντική οικονομική πτυχή των διαδικασιών αφαλάτωσης. Ιδανικά, η θερμική ενέργεια που λαμβάνεται από μια ηλιακή λίμνη με διαβάθμιση αλατότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία συμβατικών τεχνολογιών θερμικής αφαλάτωσης όπως οι MSF, MED και VC (Curto et al., 2021). Η εν λόγω τεχνολογία βρίσκεται ακόμη σε στάδιο ανάπτυξης, καθώς οι πιλοτικές μονάδες, που έχουν κατασκευαστεί αντιμετωπίζουν λειτουργικά προβλήματα. Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι μια ηλιακή λίμνη 70°C με 10 βαθμίδες εκτόνωσης, που λειτουργούν στα 0,9 bar παράγει περίπου 15 m³/ημέρα αποσταγμένου νερού. Η τεχνολογία ηλιακής λίμνης που είναι ενσωματωμένη σε μονάδες αφαλάτωσης MSF έχει βρεθεί ότι είναι πιο οικονομική από οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία αφαλάτωσης με ηλιακή ενέργεια. Προς το παρόν, απαιτείται πρόσθετη έρευνα, προκειμένου να προσδιοριστεί η μακροπρόθεσμη αξιοπιστία των τεχνολογιών θερμικής αφαλάτωσης, που τροφοδοτούνται από ηλιακή λίμνη (Alnaimat et al., 2018).

4.1.4 Ύγρανση/αφύγρανση με ηλιακή ενέργεια

Οι τεχνολογίες αφαλάτωσης με ύγρανση/αφύγρανση με ηλιακή ενέργεια (HDH) έχουν προσελκύσει έντονο ενδιαφέρον, επειδή θεωρούνται αξιόπιστες μέθοδοι αφαλάτωσης για αποκεντρωμένες εφαρμογές μικρής κλίμακας. Η διαδικασία ύγρανσης/αφύγρανσης (HDH) είναι μια διαδικασία θερμικής αφαλάτωσης, που μιμείται τον φυσικό κύκλο καθαρισμού του νερού. Τα ηλιακά συστήματα HDH έχουν

διερευνηθεί εκτενώς και χρησιμοποιούνται ευρέως για πολλές δεκαετίες ως εναλλακτική λύση στα κοινά συστήματα αφαλάτωσης για αποκεντρωμένη παραγωγή νερού, και ως εκ τούτου υπάρχει εκτεταμένη γνώση για το σχεδιασμό τους. Η HDH βασίζεται στην εξάτμιση του θερμαινόμενου αλατούχου νερού σε ένα ρεύμα αέρα και στην επακόλουθη συμπίκνωση του. Οι υδρατμοί μεταφέρονται από ένα κυκλοφορούν ρεύμα αέρα από την πλευρά του αλατούχου νερού, που συνήθως ονομάζεται εξατμιστής ή υγραντήρας, στην πλευρά του συμπυκνωτή όπου οι ατμοί συμπυκνώνονται ως πόσιμο νερό όπως φαίνεται στην Εικόνα 15. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση του αλατούχου νερού μέσω επίπεδης επιφάνειας ή ηλιακών συλλεκτών, εφοδιασμένων με σωληνώσεις εκκένωσης, το οποίο στη συνέχεια κατευθύνεται διαδοχικά στον εξατμιστή. Όσον αφορά τη χρήση της ηλιακής ενέργειας, το νερό ή ο αέρας που κυκλοφορεί θερμαίνεται, προκειμένου να υποστηρίξει τη διαδικασία της ηλιακής HDH (Alnaimat et al., 2018; Curto et al., 2021).



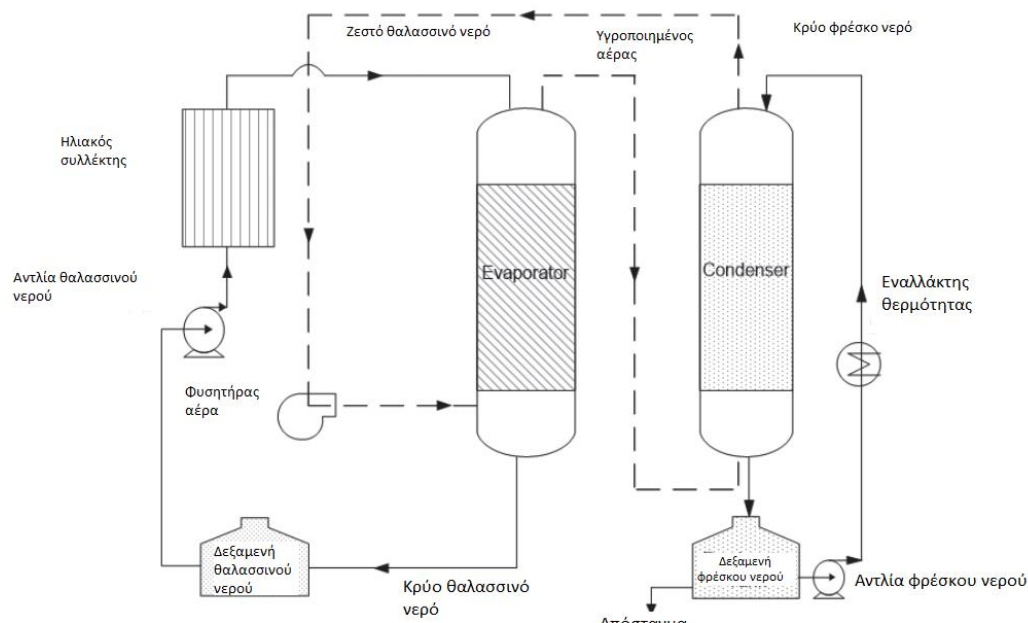
Εικόνα 15. Ηλιακή αφύγραση (προσαρμοσμένο από Alnaimat et al., 2018)

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της διαδικασίας HDH είναι ότι συνήθως λειτουργεί σε ένα εύρος χαμηλής θερμοκρασίας, το οποίο της επιτρέπει να τροφοδοτείται από ηλιακή ενέργεια ή χαμηλής ποιότητας πηγή θερμότητας. Τα συστήματα HDH είναι απλά στο σχεδιασμό και τη λειτουργία. Ωστόσο, η χαμηλή θερμική ενεργειακή απόδοση είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα τους. Η χαμηλή θερμική απόδοση, που σχετίζεται με τα συστήματα HDH οφείλεται συνήθως στη χαμηλή θερμοδυναμική διαθεσιμότητα της χαμηλής ποιότητας θερμότητας. Η συμπίκνωση πάνω από μεταλλικούς σωλήνες

χρησιμοποιείται συνήθως για τη συμπύκνωση των υδρατμών στο ρεύμα αέρα και την ανάκτηση της λανθάνουσας συμπύκνωσης. Λόγω του χαμηλού ρυθμού μεταφοράς θερμότητας, συνήθως απαιτείται μεγάλη μεταλλική επιφάνεια, που αυξάνει το κόστος του συστήματος. Οι τεχνολογίες ηλιακής HDH είναι πολλά υποσχόμενες για αποκεντρωμένες εφαρμογές παραγωγής νερού μικρής κλίμακας, αν και απαιτούνται πρόσθετες βελτιώσεις στην απόδοση του συστήματος για τη μείωση του κόστους κεφαλαίου (Sharon & Reddy, 2015; Alnaimat et al., 2018).

4.1.4 Αφαλάτωση μέσω ηλιακής διάχυσης

Η αφαλάτωση μέσω ηλιακής διάχυσης (DDD) είναι μια διαδικασία θερμικής απόσταξης παρόμοια με την HDH, όπου χρησιμοποιείται ηλιακός συλλέκτης για την παροχή της θερμικής ενέργειας. Ένα απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας αφαλάτωσης μέσω ηλιακής διάχυσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 16. Η εγκατάσταση αποτελείται από δύο κύρια στοιχεία: τον εξατμιστή και τον συμπυκνωτή. Αυτά τα στοιχεία επιτρέπουν την άμεση επαφή μεταξύ αέρα και νερού και αποτελούνται κυρίως από ειδικό υλικό, που χαρακτηρίζεται από υψηλή αναλογία επιφάνειας προς όγκο και βελτιώνει την περιοχή επαφής νερού και αέρα. Ένα μόνο ακροφύσιο είναι τοποθετημένο στην κορυφή της διάταξης στον εξατμιστή και στον συμπυκνωτή, προκειμένου να ψεκάσει αλατούχο νερό στον εξατμιστή και να ψεκάσει το νερό ψύξης στον συμπυκνωτή. Ένα δοχείο τοποθετείται στο κάτω μέρος του εξατμιστή και χρησιμοποιείται για τη συλλογή του αλατούχου νερού και ένα άλλο τοποθετείται στο κάτω μέρος του συμπυκνωτή για τη συλλογή του γλυκού νερού (Alnaimat et al., 2018; Bundschuh et al., 2021).



Εικόνα 16. Αφαλάτωση μέσω ηλιακής διάχυσης (προσαρμοσμένο από Alnaimat et al., 2018)

Η αφαλάτωση μέσω ηλιακής διάχυσης λειτουργεί με βάση την αρχή της ύγρανσης και της αφύγρανσης ενός ρεύματος αέρα. Η ύγρανση του αέρα συμβαίνει στον εξατμιστή, όπου εισέρχεται

θερμαινόμενο αλατούχο νερό, θερμοκρασίας έως και 45°C, και ψεκάζεται στο επάνω μέρος της διάταξης μέσω του ακροφυσίου. Ο αέρας χαμηλής υγρασίας προωθείται μέσω ενός ανεμιστήρα στο κάτω μέρος του εξατμιστή, προκειμένου να κυκλοφορήσει στο σύστημα. Με αυτή τη διάταξη, ο αναρροφούμενος αέρας κινείται αντίθετα προς το νερό, γεγονός που αυξάνει την άμεση μεταφορά θερμότητας και μάζας μεταξύ αέρα και νερού. Αυτό οδηγεί σε ύγρανση του αέρα και αυξάνει τη θερμοκρασία του αέρα, που εξέρχεται από τον εξατμιστή. Ο υγροποιημένος αέρας αφήνει τον εξατμιστή στην κορυφή ως πλήρως κορεσμένο και στη συνέχεια εισέρχεται στον συμπυκνωτή. Στον συμπυκνωτή, ψεκάζεται κρύο γλυκό νερό στο επάνω μέρος της διάταξης. Καθώς ο υγροποιημένος αέρας κινείται ανοδικά, έρχεται σε άμεση επαφή με το ψεκασμένο κρύο γλυκό νερό, οδηγώντας σε αφύγρανση του αέρα και μείωση της θερμοκρασίας του. Στη διαδικασία αφύγρανσης, η θερμότητα θα μεταφερθεί από τους ατμούς αέρα στο κρύο γλυκό νερό με αποτέλεσμα τη συμπύκνωση υδρατμών, που οδηγεί στην παραγωγή γλυκού νερού. Το γλυκό νερό συλλέγεται στο δοχείο του συμπυκνωτή και αποστέλλεται σε ένα δοχείο παραγωγής γλυκού νερού ή σε έναν εναλλάκτη θερμότητας, προκειμένου να ψυχθεί και να ανακυκλωθεί ξανά (ibid).

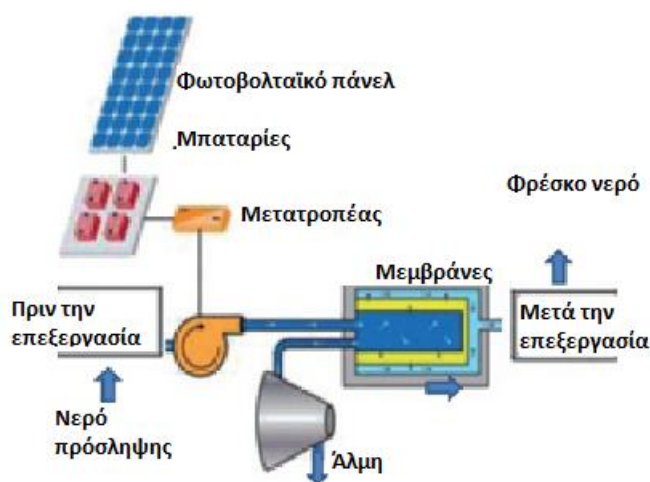
4.1.5 Ηλιακή απόσταξη μέσω μεμβρανών

Η απόσταξη μέσω μεμβρανών (MD) είναι ένα υβρίδιο μεταξύ θερμικής απόσταξης και διεργασιών μεμβράνης. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της είναι ότι λειτουργεί σε ένα εύρος χαμηλής θερμοκρασίας σε σύγκριση με τις συμβατικές διαδικασίες θερμικής απόσταξης και σε χαμηλή πίεση σε σύγκριση με την αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση. Λόγω αυτού του εύρους λειτουργίας χαμηλής θερμοκρασίας, είναι κατάλληλη για θέρμανση με ηλιακή ενέργεια. Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται είναι υδρόφοβες και συνήθως κατασκευάζονται από πολυπροπυλένιο (PP), φθοριούχο πολυβινυλιδένιο (PVDF), πολυαιθυλένιο (PE) ή πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE). Υπάρχουν διαφορετικές διαμορφώσεις δομοστοιχείων μεμβράνης όπως πλαίσιο, κοίλη ίνα, σωληνοειδές και σπειροειδές τυλιγμένο δομοστοιχείο μεμβράνης. Οι υδρόφοβες μικροπορώδεις μεμβράνες λειτουργούν ως φυσικό στήριγμα, που διαχωρίζει έναν θάλαμο ζεστού αλατούχου νερού από έναν θάλαμο κρύου διηθήματος (Alkhudhiri et al., 2012).

Στην αφαλάτωση με ηλιακή μεμβράνη, το αλμυρό νερό ή το υφάλμυρο νερό θερμαίνεται χρησιμοποιώντας ηλιακή ενέργεια και στη συνέχεια κατευθύνεται σε έναν ζεστό αλατούχο θάλαμο. Η κινητήρια δύναμη στη διαδικασία ηλιακής MD είναι η διαφορά πίεσης του ατμού κατά μήκος όλης της μεμβράνης. Υπάρχουν διαφορετικές μέθοδοι για τη δημιουργία διαφοράς πίεσης του ατμού σε όλη τη μεμβράνη. Επομένως, η MD μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως προς τη δημιουργία διαφοράς πίεσης στα ακόλουθα: απόσταξη με μεμβράνη άμεσης επαφής (DCMD), απόσταξη μεμβράνης με διάκενο αέρα (AGMD), απόσταξη με μεμβράνη σαρωτικού αερίου (SGMD) και απόσταξη με μεμβράνη κενού (VMD). Οι υδρατμοί μεταφέρονται μέσω των πόρων της μεμβράνης από την πλευρά τροφοδοσίας υψηλής πίεσης ατμών στην πλευρά διαπερατότητας χαμηλής πίεσης ατμών (Alnaimat et al., 2018).

4.1.6 Φωτοβολταϊκά/ Αντίστροφη ώσμωση

Έχουν κατασκευαστεί πολλές μονάδες αφαλάτωσης, που συνδέουν συστήματα RO με ηλιακή φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος είναι η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος από τα φωτοβολταϊκά πάνελ μέσω ενός μετατροπέα, για την παραγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος, που χρησιμοποιείται άμεσα στις αντλίες. Επιπλέον, οι συστοιχίες μπαταριών προστίθενται στο σύστημα για αποθήκευση ενέργειας κατά τη διάρκεια της νύχτας, προκειμένου να επιτραπεί η συνεχής λειτουργία της RO. Πιλοτικά έχουν εγκατασταθεί συστήματα PV-RO χωρητικότητας από 0,5 έως 50 m³/d. Όσον αφορά το κόστος, το κόστος επένδυσης είναι υψηλότερο από την συμβατική RO, αλλά ποικίλλει επίσης ανάλογα με την τοποθεσία, την ποιότητα του αλατούχου νερού και τη χωρητικότητα της μονάδας. Το κόστος διαφοροποιείται από τη μια περιοχή στην άλλη και κυμαίνεται από 30 US\$/m³ έως και 3 US\$/m³ (Eltawil et al., 2008; Muthafer, 2016).



Εικόνα 17. Μονάδα αφαλάτωσης με Φωτοβολταϊκά/ Αντίστροφη ώσμωση (προσαρμοσμένο από Comrain, 2012)

4.1.7 Παραβολικοί Συλλέκτες/MSF

Η τεχνολογία MSF ως θερμική διαδικασία μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει ηλιακή ενέργεια με παραβολικούς συλλέκτες. Ο ατμός, που παράγεται από αυτούς χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας. Ένα σύστημα θερμικής αποθήκευσης μπορεί να προστεθεί στο σύστημα για την ομαλή μεταβολή της παροχής θερμικής ενέργειας και τη διασφάλιση της συνεχούς παραγωγής γλυκού νερού (κατά τη διάρκεια της νύχτας ή την περίοδο χαμηλής ακτινοβολίας). Μια αντίστοιχη εφαρμογή στο Κουβέιτ είχε χωρητικότητα 10 m³/d, για έναν επιφανειακό παραβολικό συλλέκτη 220 m², που αντιστοιχεί στο μέσο όρο 10-60 l/m²/ημέρα για τις μονάδες MSF, που λειτουργούν με ηλιακή ενέργεια. Υπάρχουν εμπορικά διαθέσιμες μονάδες μικρής κλίμακας, που συνδυάζουν την τεχνολογία MSF με παραβολικούς συλλέκτες παραγωγής ατμού, των οποίων το κατά προσέγγιση κόστος είναι 7-9 US \$/m³ παραγόμενου γλυκού νερού (Comrain, 2012).

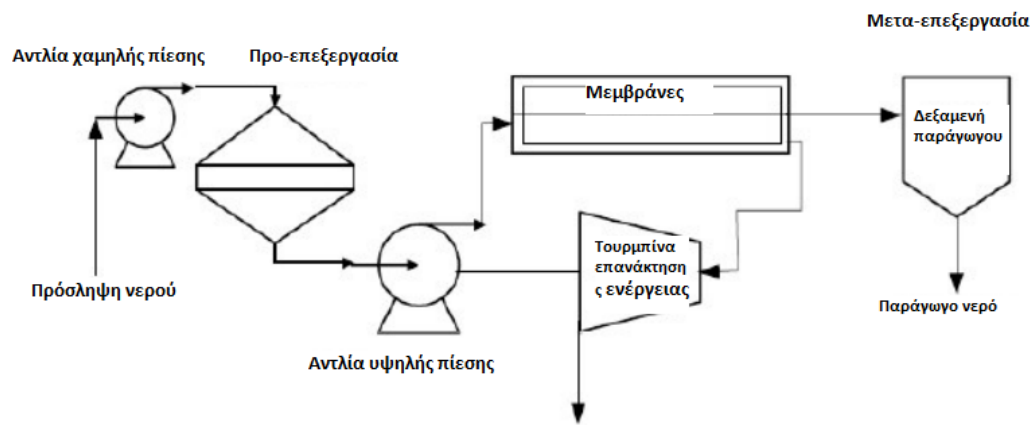
4.1.8 Παραβολικοί Συλλέκτες/ MED

Υπάρχει πληθώρα εγκαταστάσεων MED παγκοσμίως, σε συνδυασμό με ηλιακή ενέργεια από διαφορετικές τεχνολογίες. Το κόστος παραγωγής νερού μέσω αφαλάτωσης MED σε συνδυασμό με παραβολικούς συλλέκτες έχει αποδειχθεί ότι εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη χωρητικότητα των εγκαταστάσεων: για μεγάλες εγκαταστάσεις (5000 m³/ημέρα), το κόστος είναι περίπου 2 US \$/m³ και αυξάνεται έως και 3.2 US\$/m³ για μικρότερες (500 m³/ημέρα) (Eltawil et al., 2008; Muthaheer, 2016).

4.2 Τεχνικές αφαλάτωσης μέσω αιολικής ενέργειας

Οι απομακρυσμένες περιοχές με πιθανούς αιολικούς πόρους, όπως τα νησιά, μπορούν να χρησιμοποιούν συστήματα αιολικής ενέργειας για την τροφοδοσία της αφαλάτωσης θαλασσινού νερού και την παραγωγή γλυκού νερού. Το πλεονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι το μειωμένο κόστος παραγωγής του νερού σε σύγκριση με το κόστος μεταφοράς του ή με τη χρήση συμβατικών καυσίμων ως πηγή ενέργειας. Είναι δυνατές διαφορετικές προσεγγίσεις για συστήματα αιολικής αφαλάτωσης. Αρχικά, τόσο οι ανεμογεννήτριες, όσο και το σύστημα αφαλάτωσης συνδέονται σε ένα σύστημα δικτύου. Σε αυτήν την περίπτωση, ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα βέλτιστα μεγέθη του συστήματος ανεμογεννητριών και του συστήματος αφαλάτωσης, καθώς και η εξοικονόμηση του κόστους από τη χρήση ορυκτών καυσίμων. Η δεύτερη επιλογή βασίζεται σε μια περισσότερο ή λιγότερο άμεση σύζευξη της(των) ανεμογεννήτριας(ών) και του συστήματος αφαλάτωσης. Σε αυτή την περίπτωση, το σύστημα αφαλάτωσης επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις ισχύος και τις διακοπές, που προκαλούνται από την πηγή ισχύος (άνεμος) (Ghaffour et al., 2015).

Αυτές οι διακυμάνσεις ισχύος, ωστόσο, έχουν αρνητική επίδραση στην απόδοση και τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού αφαλάτωσης. Ως εκ τούτου, εφεδρικά συστήματα, όπως μπαταρίες, γεννήτριες ντίζελ ή σφόνδυλοι ενδέχεται να ενσωματωθούν στο σύστημα. Το κύριο ζήτημα σε αυτόν τον τομέα σχετίζεται με την ανάλυση της αιολικής εγκατάστασης και της συνολικής απόδοσης του συστήματος, καθώς και με την ανάπτυξη κατάλληλων αλγορίθμων ελέγχου για την ανεμογεννήτρια(ες) το συνολικό σύστημα. Όσον αφορά την αφαλάτωση, υπάρχουν διάφορες επιλογές τεχνολογίας, π.χ. ηλεκτροδιάλυση ή συμπίεση ατμών. Ωστόσο, η αντίστροφη ώσμωση είναι η προτιμώμενη τεχνολογία λόγω της χαμηλής ειδικής κατανάλωσης ενέργειας (Eltawil et al., 2008; Ma & Lu, 2011).



Εικόνα 18. Διαγραμματική απεικόνιση μονάδας αφαλάτωσης με συνδυασμό αιολικής ενέργειας & RO (προσαρμοσμένο από Eltawil et al., 2008)

4.3 Τεχνικές αφαλάτωσης μέσω γεωθερμικής ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικούς πόρους υψηλής ενθαλπίας ($>150^{\circ}\text{C}$) αποτελεί μια ώριμη τεχνολογία, που έχει αναπτυχθεί και εφαρμοστεί εκτεταμένα τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες. Είναι προφανές ότι αυτή η πηγή ενέργειας είναι μια κατάλληλη επιλογή για τεχνολογίες αφαλάτωσης, που βασίζονται στην ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, οι άμεσες εφαρμογές γεωθερμικής θερμότητας, συχνά από πόρους χαμηλής ενθαλπίας ($50-150^{\circ}\text{C}$) δεν έχουν προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον στο παρελθόν λόγω της κακής οικονομικής απόδοσης, εάν οι θερμοκρασίες είναι μικρότερες από 120°C . Ωστόσο, οι δυαδικές τεχνολογίες βελτιώνονται συνεχώς και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται ολοένα και πιο οικονομική σε όλο και χαμηλότερες θερμοκρασίες. Αυτοί οι πόροι χρησιμοποιούνται κυρίως σε μικρή κλίμακα στη βιομηχανία, τη γεωργία, τα νοικοκυριά και σε εγκαταστάσεις κολύμβησης (Ghaffour et al., 2015).

Σε σύγκριση με άλλες πηγές ΑΠΕ, το τεράστιο πλεονέκτημα της γεωθερμικής ενέργειας είναι ότι παρέχει σταθερή ενέργεια. Αντίθετα, η ηλιακή και η αιολική ενέργεια είναι διαλείπουσες και ως εκ τούτου απαιτούν τεχνικά πιο σύνθετες συσκευές συλλογής και δαπανηρές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες είναι περαιτέρω περιορισμένες σε μέγεθος, παρεμποδίζοντας την κλιμάκωση μεγάλων μονάδων. Όλες αυτές οι αρνητικές επιπτώσεις δεν υφίστανται στην περίπτωση της γεωθερμικής ενέργειας. Ωστόσο, το υψηλό κόστος έρευνας, ο υψηλός επενδυτικός κίνδυνος και το υψηλό κόστος εγκατάστασης αποτελούν σημαντικά μειονεκτήματα της. Αυτό το υψηλό κόστος μπορεί να αντισταθμιστεί από την ελεύθερα διαθέσιμη γεωθερμική παραγωγή θερμότητας κατά τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης (σε αντίθεση με τη θερμότητα που παράγεται από ορυκτά καύσιμα, η οποία απαιτεί μόνιμα την αγορά καυσίμων, εάν δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί απορριπτόμενη θερμότητα). Επιπλέον, υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις όπου το υψηλό κόστος έρευνας και ο επενδυτικός κίνδυνος μπορούν να εξαιρεθούν. Η παροχή ενέργειας από γεωθερμικούς πόρους είναι γενικά χαμηλότερη εν συγκρίσει με το κόστος της ηλιακής ενέργειας και, ως εκ τούτου, μπορεί να είναι εξαιρετικά επωφέλης σε περιοχές, όπου υπάρχουν διαθέσιμοι κατάλληλοι γεωθερμικοί πόροι. Επίσης, ο συνδυασμός ηλιακής ενέργειας και γεωθερμίας σε υβριδικά συστήματα μπορεί να προσφέρει μια πιθανή επιλογή, που θα πρέπει να αξιολογηθεί (Eltawil et al., 2008; Ghaffour et al., 2015).

Η ενέργεια από βιομάζα είναι η μόνη πηγή ενέργειας, που δεν έχει χρησιμοποιηθεί σε διαδικασίες αφαλάτωσης νερού μέχρι στιγμής. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, δημοσιεύθηκαν αποτελέσματα αρκετών μελετών, που ανέλυσαν τις δυνατότητες χρήσης ενέργειας από βιομάζα σε υβριδικά συστήματα σε συνδυασμό με άλλες ανανεώσιμες και μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Bundschuh et al., 2021).

Οι Sahoo et al. (2017) εξέτασαν ένα υβριδικό σύστημα που συνδυάζει ηλιακή ενέργεια και βιομάζα και ανέλυσαν τη δυνατότητα χρήσης ενός τέτοιου συστήματος τόσο για την παραγωγή ενέργειας, όσο και για την ψύξη. Η εγκατάσταση έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε ένα σύστημα παραβολικού συλλέκτη να παρέχει μια πηγή ενέργειας, που προθερμαίνει το μέσο εργασίας πριν κατευθυνθεί στον εναλλάκτη του συστήματος βιομάζας και εξατμιστεί. Η θερμοκρασία του ατμού που κατευθύνεται στον στρόβιλο είναι 500 °C στα 60 bar, με ρυθμό ροής μάζας 5 kg/s. Η θερμοδυναμική ανάλυση έχει καταδείξει ότι αυτός ο συνδυασμός διαφορετικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επιτρέπει την επίτευξη ενεργειακής απόδοσης της τάξεως του 49,35%.

Οι Behzadi et al. (2019) διερεύνησαν την περίπτωση της αεριοποίησης της βιομάζας. Ειδικότερα, προσθέτοντας έναν αεριοστρόβιλο στο σύστημά τους, τροφοδότησαν μια μονάδα αφαλάτωσης νερού με βάση την RO. Οι συγγραφείς διεξήγαγαν επιπλέον συγκριτικές μελέτες αναφορικά με τις μεταβλητές παραμέτρους λειτουργίας του συστήματος, προκειμένου να προσδιορίσουν τις οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις του. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι η ενεργειακή απόδοση ήταν 27,07% με κόστος παραγωγής ενέργειας 66,46 USD/GJ και η μείωση των εκπομπών ανήλθε σε 0,2837 t/MWh στη βέλτιστη παραλλαγή του συστήματος.

4.4 Τεχνικές αφαλάτωσης μέσω ωκεάνιας ενέργειας

Οι θάλασσες διαθέτουν απεριόριστη κινητική ενέργεια. Ένα μέσο κύμα 4 ποδιών και 10 δευτερολέπτων, που χτυπά μια ακτή αποδίδει περισσότερους από 35.000 ίππους ανά μίλι ακτής. Στο μέλλον, η χρήση υδροηλεκτρικής ενέργειας σε διαδικασίες αφαλάτωσης μπορεί να προσφέρει μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση στις ΑΠΕ, που χρησιμοποιούνται σήμερα. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η αφαλάτωση του θαλασσινού νερού απαιτεί την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στις παράκτιες περιοχές. Η παλιρροιακή, η κυματική ή η ωκεάνια θερμική ενέργεια φαίνεται να αποτελεί μια φυσική λύση. Μεταξύ αυτών των μεθόδων, εκείνες που μετατρέπουν την παλιρροιακή και την κυματική ενέργεια σε ηλεκτρική είναι οι μακράν δημοφιλέστερες (Bundschuh et al., 2021). Όπως αναφέρουν οι Lehmann et al. (2017), το πλεονέκτημα αυτού του τύπου ΑΠΕ σε σύγκριση με την ασταθή παραγωγή με χρήση αιολικής ή ηλιακής ενέργειας είναι η προβλεψιμότητα και η συνεχής διαθεσιμότητά του.

4.5 Η αφαλάτωση με χρήση ΑΠΕ στην Ελλάδα και τον κόσμο

Σήμερα, ένας εκτιμώμενος αριθμός 15.906 μονάδων αφαλάτωσης λειτουργούν σε 177 χώρες, με συνολική ικανότητα αφαλάτωσης περίπου 95,35 εκατομμύρια m³/ημέρα (34,81 δισεκατομμύρια m³/έτος). Ο αριθμός αυτός αναμένεται να αυξηθεί ταχέως λόγω της εγκατάστασης μεγάλων μονάδων σε όλο τον κόσμο (Jones et al., 2019). Επιπλέον, η δυναμικότητα των μονάδων αφαλάτωσης, που είχαν εγκατασταθεί έως το 2019 ήταν περίπου 4 εκατομμύρια m³/ημέρα (Nassrullah et al., 2020). Σε σύγκριση με τη συνολική

ικανότητα αφαλάτωσης παγκοσμίως, η αφαλάτωση που βασίζεται στις ΑΠΕ έχει περιορισμένη εφαρμογή, παρά την πληθώρα πλεονεκτημάτων των ΑΠΕ (Delyannis & Belessiotis, 2020). Αυτό αποδίδεται σε πολλούς παράγοντες, όπως οι ακόλουθοι:

- i. Ορισμένες περιοχές με σοβαρή έλλειψη νερού δεν διαθέτουν ΑΠΕ.
- ii. Παρά την αμφισβητούμενη μείωση του κόστους, το κόστος εγκατάστασης της αρχικής επένδυσης κεφαλαίου εξακολουθεί να είναι υψηλό.
- iii. Δεν είναι εύκολο να βρεθεί ο τεχνολογικός σχεδιασμός που συνδυάζει συστήματα μετατροπής ενέργειας και αφαλάτωσης, τα οποία ενισχύουν την απόδοση και μειώνουν το κόστος.
- iv. Η εναρμόνιση των τεχνολογιών με τις υποδομές χαμηλού επιπέδου, που υπάρχουν στις περισσότερες περιοχές με σοβαρή λειψυδρία, δεν είναι πάντα δυνατή. Έχει καταδειχθεί, ότι σε πολλές περιπτώσεις, η εφαρμογή τεχνολογιών αφαλάτωσης σε απομακρυσμένες περιοχές απέτυχε λόγω έλλειψης εξειδικευμένης τεχνικής υποστήριξης (Lotfy et al., 2022).

Η Παγκόσμια Συμμαχία Αφαλάτωσης Καθαρού Νερού (Global Clean Water Desalination Alliance) έχει θέσει ως στόχο το 20% των νέων μονάδων αφαλάτωσης να τροφοδοτούνται από ΑΠΕ μεταξύ 2020-2025. Η εν λόγω συμμαχία περιλαμβάνει βιομηχανίες ενέργειας και αφαλάτωσης, επιχειρήσεις κοινής ωφελείας, κυβερνήσεις, χρηματοδοτικούς οργανισμούς, ακαδημαϊκούς και ερευνητές «με στόχο τη μείωση των εκπομπών CO₂ από τις υπάρχουσες μονάδες αφαλάτωσης νερού και την κλιμάκωση της χρήσης καθαρών τεχνολογιών αφαλάτωσης μέσω συντονισμένων ενεργειών». Σε παγκόσμιο επίπεδο, το σημερινό μερίδιο της ανανεώσιμης ενέργειας, που χρησιμοποιείται για αφαλάτωση είναι περίπου 1%. Ορισμένες πρωτοπόρες κυβερνήσεις επιχειρούν να επωφεληθούν από αυτό το αναξιοποίητο δυναμικό. Επί παραδείγματι, η Σαουδική Αραβία έχει προωθήσει τον στόχο της για παραγωγή 9,5 GW ανανεώσιμης ενέργειας έως το 2023. Στη Δυτική Αυστραλία, όλες οι νέες μονάδες αφαλάτωσης πρέπει να χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Από την Ευρώπη μέχρι την Ινδία, την Κίνα, πολλές άλλες κυβερνήσεις ακολουθούν το παράδειγμά τους. Αυτά τα έθνη ενδέχεται να υποχρεωθούν να μειώσουν τις εκπομπές τους στο πλαίσιο της Συμφωνίας του Παρισιού για την Κλιματική Αλλαγή, ενώ σίγουρα επηρεάζονται από την ανθρωπιστική και οικονομική κρίση, που επιφέρει η λειψυδρία. Θα πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι μια ακριβής εκτίμηση των υφιστάμενων μονάδων αφαλάτωσης, που βασίζονται στις ΑΠΕ δεν είναι εφικτή, εφόσον η λειτουργία αρκετών μονάδων βρίσκεται σε πιλοτική φάση (Abdul Latif Jameel, 2020).

Η σημαντική ανισότητα στην κατανομή των μονάδων αφαλάτωσης και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ σε διάφορες περιοχές αναδεικνύει ένα σημαντικό δυναμικό για την εφαρμογή συστημάτων αφαλάτωσης με βάση τις ΑΠΕ σε περιοχές όπως η Μέση Ανατολή, όπου υπάρχει υψηλή συγκέντρωση μονάδων αφαλάτωσης αλλά χαμηλή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Στην περιοχή αυτή, για παράδειγμα, όπου βρίσκεται το 39 % των παγκόσμιων μονάδων αφαλάτωσης, μόνο το 1 % της ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει σημαντικό δυναμικό για την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη

διαδικασία αφαλάτωσης. Ομοίως, σε άλλες περιοχές με υψηλή συγκέντρωση εγκαταστάσεων αφαλάτωσης, όπως η Ασία, το δυναμικό των συστημάτων αφαλάτωσης που τροφοδοτούνται από ΑΠΕ είναι σημαντικό. Διαθέτοντας το 21 % των παγκόσμιων εγκαταστάσεων αφαλάτωσης, η Ασία κατέχει το υψηλότερο μερίδιο εγκαταστάσεων αφαλάτωσης μετά τη Μέση Ανατολή. Ταυτόχρονα, είχε το υψηλότερο ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, 42%, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα συστήματα αφαλάτωσης που τροφοδοτούνται από ΑΠΕ θα μπορούσαν να αποτελέσουν μια βιώσιμη επιλογή στην περιοχή αυτή (Alawad et al., 2023).

Η ηλιακή ενέργεια θεωρείται ευρέως ότι διαθέτει το μεγαλύτερο δυναμικό ως μακροπρόθεσμη, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας για τη βιώσιμη αφαλάτωση (Huang et al., 2019). Δεδομένου ότι τα συστήματα φωτοβολταϊκών μπορούν να συνδεθούν απευθείας με τις μονάδες αφαλάτωσης με μεμβράνες, η προσέγγιση αυτή φαίνεται να είναι μια από τις πιο υποσχόμενες οδούς προς την αφαλάτωση χωρίς άνθρακα - ιδίως για μεσαία και μεγάλα συστήματα - μειώνοντας ή εξαλείφοντας την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το τοπικό δίκτυο, ανάλογα με το μέγεθος της μονάδας αφαλάτωσης (IRENA, 2020). Σήμερα, η RO σε συνδυασμό με την ηλιακή ενέργεια είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική για την παραγωγή γλυκού νερού από θαλασσινό νερό. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται στην ταχεία πρόοδο αυτής της τεχνολογίας, η οποία θεωρείται μια από τις πιο αποτελεσματικές τεχνικές για την αφαλάτωση νερού με υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων (πάνω από 35.000 ppm) (Alawad et al., 2023). Επί παραδείγματι, στη Μεσόγειο Θάλασσα, έχει αποδειχθεί ότι για την παραγωγή ενός κυβικού μέτρου (m^3) πόσιμου νερού ανά ημέρα απαιτείται η εγκατάσταση 0,71 kW ηλιακών φωτοβολταϊκών. Λαμβάνοντας υπόψη μια ημερήσια κατανάλωση της τάξεως του 0,20 m^3 ανά άτομο και έναν κυμαινόμενο αριθμό ατόμων μεταξύ 100 και 200 εκατομμυρίων, τότε η ισχύς 14,2 GW έως 28,4 GW θα μπορούσε να τροφοδοτήσει αρκετές μονάδες αντίστροφης όσμωσης για την κάλυψη των αναγκών σε γλυκό νερό στην περιοχή της Μεσογείου (Ganora et al., 2019).

Τα περισσότερα έργα ηλιακής αφαλάτωσης είναι μικρής έως μεσαίας κλίμακας, αλλά γίνονται όλο και μεγαλύτερα. Η μεγαλύτερη φωτοβολταϊκή μονάδα αφαλάτωσης βρίσκεται στη Σαουδική Αραβία. Το Al Khafji τέθηκε σε λειτουργία το 2017 και παράγει 60.000 κυβικά μέτρα πόσιμου νερού την ημέρα μέσω αντίστροφης όσμωσης. Το εργοστάσιο Meitito που κατασκευάζεται στην οικονομική πόλη King Abdullah Economic City (KAEC) θα ξεκινήσει με τη δυνατότητα παραγωγής 30.000 κυβικών μέτρων πόσιμου νερού την ημέρα, με δυνατότητα επέκτασης σε 60.000 κυβικά μέτρα την ημέρα. Το Al Shuqaiq 3IWP, μια από τις μεγαλύτερες μονάδες αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση στον κόσμο, που ολοκληρώθηκε το 2021 και βρίσκεται κοντά στην πόλη Al Shuqaiq στη Νεκρά Θάλασσα, εκτιμάται ότι παράγει 450.000 m^3 πόσιμου νερού σε καθημερινή βάση (Abdul Latif Jameel, 2020). Πολλά μικρά συστήματα αφαλάτωσης με βάση τα φωτοβολταϊκά έχουν αναπτυχθεί σε όλο τον κόσμο, ιδίως σε απομακρυσμένες περιοχές και νησιά, όπως τα Gran Canaria, Κανάρια Νησιά (φωτοβολταϊκά -RO, θαλασσινό νερό, 1-5 m^3/d), το Riyadh, Σαουδική Αραβία (φωτοβολταϊκό -RO, υφάλμυρο νερό, 5 m^3/d) και το νησί Ohshima, Ιαπωνία (φωτοβολταϊκό - ηλεκτροδιάλυση, θαλασσινό νερό, 10 m^3/d). (Lotfy et al., 2022).

Οι παράκτιες περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό αποτελούν ιδανικές τοποθεσίες για τη σύζευξη της αιολικής τεχνολογίας με την αφαλάτωση, εφόσον η αιολική ενέργεια αποτελεί πρόσφορη λύση για την κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια των μονάδων αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης και ηλεκτροδιάλυσης. Η αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση νερού με αιολική ενέργεια συναντάται κυρίως σε εφαρμογές μικρής κλίμακας. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (IRENA), αξιοσημείωτες μονάδες αφαλάτωσης με αιολική ενέργεια εντοπίζονται Gran Canaria (αιολική ενέργεια -RO, θαλασσινό νερό, 5-50 m³/d) και η Fuerteventura (υβριδικό σύστημα αιολική ενέργεια - diesel, θαλασσινό νερό, 56 m³/d), αμφότερες στις ισπανικές Κανάριες Νήσους (IRENA, 2020). Περαιτέρω, στο Ηνωμένο Βασίλειο έχει αναπτυχθεί ένας αιολικός σταθμός ισχύος 12 m³ /ημέρα, όπου η μηχανική ενέργεια του ανέμου θα μπορούσε επίσης να αξιοποιηθεί άμεσα σε εγκαταστάσεις μηχανικής συμπίεσης ατμών κατά τη φάση της συμπίεσης ατμών (IRENA and IEA-ETSAP, 2012).

Στην Αυστραλία, η μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού του Περθ, η πρώτη του είδους της στη χώρα, τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το αιολικό πάρκο Emu Downs ισχύος 80 μεγαβάτ. Το αιολικό πάρκο συνεισφέρει 270 γιγαβατώρες ετησίως στο δίκτυο, υπερκαλύπτοντας την απαίτηση των 180 γιγαβατωρών ετησίως από τη μονάδα αφαλάτωσης. Ομοίως, η μονάδα αφαλάτωσης του Σίδνεϊ τροφοδοτείται εξ ολοκλήρου από αιολικό πάρκο, το οποίο έχει επίσης αυξήσει την παροχή αιολικής ενέργειας στη Νέα Νότια Ουαλία κατά πάνω από 700% (Abdul Latif Jameel, 2020). Στην Ελλάδα, λειτουργεί μια μονάδα αφαλάτωσης στη Μήλο, βασισμένη στην αιολική ενέργεια από το 2007. Η εν λόγω μονάδα, που βασίζεται στην τεχνολογία της αντίστροφης ώσμωσης, παράγει 4.500 m³/d πόσιμο νερό, μετά από δύο διαδοχικές επεκτάσεις, που πραγματοποιήθηκαν καλύπτοντας τη ζήτηση του νησιού ακόμη και σε περίοδο αιχμής, καθώς πρόκειται για μια άκρως τουριστική περιοχή (itagroup.gr, 2021).



Εικόνα 19. Μονάδα αφαλάτωσης βασισμένη στην αιολική ενέργεια & στην τεχνολογία της αντίστροφης ώσμωσης στη Μήλο (itagroup.gr, 2021)

Όσον αφορά τη γεωθερμική ενέργεια, αυτή μπορεί να παράγει ηλεκτρισμό και θερμότητα, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη τόσο για τη θερμική αφαλάτωση, όσο και για την αντίστροφη ώσμωση. Η πρώτη γεωθερμική μονάδα αφαλάτωσης κατασκευάστηκε το 1972 στις ΗΠΑ, ενώ

ακολούθησαν μονάδες στην Τυνησία, τη Γαλλία και την Ελλάδα. Παρά ταύτα, η χρήση γεωθερμικής ενέργειας για την τροφοδοσία της αφαλάτωσης δεν είναι τόσο διαδεδομένη όσο η χρήση ηλιακής ή αιολικής ενέργειας, αν και πρόκειται για μια ώριμη τεχνολογία με ανταγωνιστικό κόστος (Lotfy et al., 2022; Alawad et al., 2023). Μια αντίστοιχη μονάδα έχει αναπτυχθεί στο νησί της Μήλου, παράγοντας 1.920 m³/ημέρα γλυκού νερού με πολύ χαμηλό κόστος (IRENA, 2020). Το έργο αυτό χρησιμοποιεί ένα γεωθερμικό πηγάδι για τη λειτουργία ενός στροβίλου οργανικού κύκλου Rankine 470 kWe, καθώς και μιας μονάδα αφαλάτωσης MED (Climate-ADAPT, 2023).¹

Εν γένει, η κυματική ενέργεια είναι δύσκολο να αξιοποιηθεί, αλλά έχει υλοποιηθεί μια πολλά υποσχόμενη πιλοτική εφαρμογή της στη Δυτική Αυστραλία. Το 2014, το Garden Island έγινε το πρώτο εμπορικής κλίμακας έργο με κυματική ενέργεια στον κόσμο, που παρήγαγε ταυτόχρονα ενέργεια και πόσιμο νερό. Ένα σύστημα αφαλάτωσης με κυματική ενέργεια σχεδιάζεται επίσης για το Πράσινο Ακρωτήριο, στα ανοιχτά της δυτικής ακτής της Αφρικής. Η εταιρεία ανάπτυξης, Resolute Marine Energy, ισχυρίζεται ότι η μονάδα Wave20 θα παράγει πόσιμο νερό στο ένα τρίτο της τιμής των συμβατικών συστημάτων. Το σύστημα αξιοποιεί την κυματική ενέργεια, προκειμένου να αντλήσει το θαλασσινό νερό σε μια μονάδα επεξεργασίας στην ξηρά, ενώ τα κύματα χρησιμοποιούνται εν συνεχεία για την παράγωγή ηλιακής ενέργειας για την απόσταξη του θαλασσινού νερού (Abdul Latif Jameel, 2020).

Στην Ελλάδα, που διαθέτει μεγάλο σύμπλεγμα νησιών, που αντιμετωπίζουν προβλήματα υδροδότησης, το μεγαλύτερο μέρος του νερού τροφοδοτείται από ιδιωτικά και δημοτικά πηγάδια (κυρίως νερό πολύ χαμηλής ποιότητας και υψηλής αλατότητας) σε συνδυασμό με συλλογή όμβριων υδάτων (αναξιόπιστη λόγω της διαλείπουσας βροχόπτωσης). Ωστόσο, το σημαντικότερο μέρος του νερού, που τροφοδοτεί τα νησιά μεταφέρεται δια θαλάσσης, επιφέροντας σημαντικό κόστος. Το κόστος για το Ελληνικό Υπουργείο Ναυτιλίας είναι σημαντικό, π.χ. 7,3 V/m για το σύμπλεγμα Δωδεκανήσων 26 νησιών και 9,3 V/m³ για το σύμπλεγμα των Κυκλάδων με 33 νησιά, ενώ το κόστος υδροδότησης στην Αθήνα είναι μικρότερο από 0,70 V/m³, όπου η τιμή για την οικιακή κατανάλωση ανέρχεται σε 5-20 m³ το μήνα (Mentis et al., 2016). Υπάρχουν επίσης αρκετές μονάδες αφαλάτωσης σε λειτουργία, που απορροφούν τεράστιες ποσότητες ενέργειας σε ήδη υπερφορτωμένα νησιωτικά ενεργειακά συστήματα (Karagiannis & Soldatow, 2007). Οι μονάδες αφαλάτωσης λειτουργούν κατά κύριο λόγο από δήμους, οι οποίοι, λόγω ελλείψεων σε εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό, αντιμετωπίζουν προβλήματα με την αποτελεσματική και αποδοτική λειτουργία τους (Mentis et al., 2016).

Οι απόπειρες για την εισαγωγή της αφαλάτωσης στα ελληνικά νησιά ξεκίνησαν τη δεκαετία του 1960 με την πρώτη μονάδα RO για δημόσια ύδρευση, που κατασκευάστηκε στη Μύκονο μεταξύ 1981 και 1982. Έκτοτε, η RO κυριαρχεί στις εφαρμογές αφαλάτωσης στην Ελλάδα. Χρησιμοποιείται εκτενώς για πάνω από 40 χρόνια τόσο για την δημόσια ύδρευση, όσο και για την παροχή νερού σε ξενοδοχεία και πολυτελείς βίλες. Στην Ελλάδα, λειτουργούν περισσότερες από 160 μονάδες αφαλάτωσης με συνολική παραγωγή άνω των 150.000 m³/ημέρα (Zotalis et al., 2014). Όσον αφορά το νερό παροχής, το 56% είναι

¹ Για περισσότερες λεπτομέρειες βλ. <https://cordis.europa.eu/project/id/NE5-41-1999>

θαλασσινό, ενώ το 41% είναι υφάλμυρο. Περαιτέρω, το 48% του παραγόμενου αφαλατωμένου νερού στην Ελλάδα, καλύπτει τις ανάγκες δήμων, το 31% βιομηχανικές ανάγκες, το 16% τουριστικές ανάγκες και το υπόλοιπο 5% τις ανάγκες των μονάδων παραγωγής ενέργειας και τις ανάγκες του ελληνικού στρατού (Kyriakarakos et al., 2022).

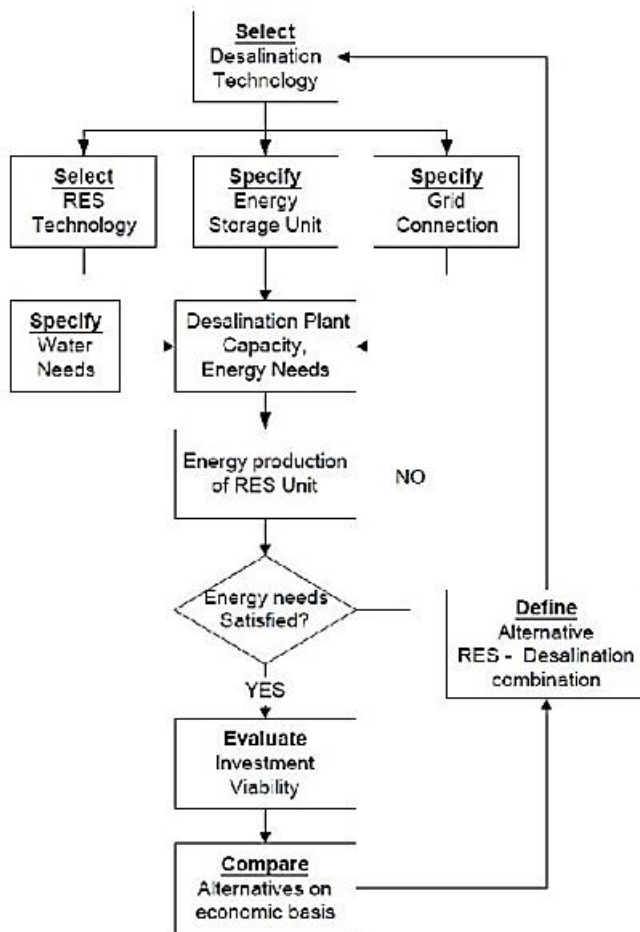
Η αντίστροφη ώσμωση είναι η πιο δημοφιλής διαδικασία αφαλάτωσης στην Ελλάδα, καθώς το 75% του αφαλατωμένου νερού παράγεται από μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης. Οι μονάδες αφαλάτωσης στα νησιά είναι μικρής δυναμικότητας, που κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες κυβικά μέτρα την ημέρα έως μερικές χιλιάδες κυβικά μέτρα την ημέρα (Kartalidis et al., 2015). Η πλειονότητα των συστημάτων αφαλάτωσης λειτουργεί σε νησιά, που εξυπηρετούνται από απομονωμένα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά τα δίκτυα στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων τροφοδοτούνται από γεννήτριες ντίζελ/πετρελαίου. Τα υπόλοιπα είναι εγκατεστημένα σε διασυνδεδεμένα νησιά. Η διασύνδεση πραγματοποιείται με τη χρήση υποθαλάσσιων καλωδίων (Kyriakarakos et al., 2022).

Το κόστος του αφαλατωμένου νερού στην Ελλάδα κυμαίνεται από 0,5–3,5 EUR/m³, με τις περισσότερες περιπτώσεις να παρουσιάζουν κόστος άνω του 1,2 EUR/m³, το οποίο είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σύγκριση με μεγάλες μονάδες αφαλάτωσης, οι οποίες συνήθως παρουσιάζουν κόστος κάτω του 1 EUR/m³. Ο κύριος λόγος για το υψηλό κόστος είναι το μικρότερο μέγεθος των ελληνικών μονάδων, καθώς και η ηλικία τους (Worlds Bank, 2019). Ορισμένες πιλοτικές μονάδες αφαλάτωσης, που τροφοδοτούνται από ΑΠΕ έχουν αναπτυχθεί στην Σύμη, την Κίμωλο, την Μήλο, την Ίο και την Ηρακλεία, ορισμένες από τις οποίες εξακολουθούν να λειτουργούν και σήμερα. Στην Ελλάδα, τα ορυκτά καύσιμα κυριαρχούν στο μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας (61,9%) για το έτος 2020. Σήμερα, η Ελλάδα βιώνει μια στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η οποία ξεκίνησε πριν από περίπου 10 χρόνια και συνεχίζει να σημειώνει σημαντική πρόοδο (Kyriakarakos et al., 2022).

Κεφάλαιο 5. Σχεδιασμός & Υλοποίηση Μονάδων Αφαλάτωσης μεγάλης κλίμακας με ΑΠΕ

5.1 Προσέγγιση & αρχικό στάδιο σχεδιασμού

Επί της παρούσης, δεν υπάρχει κάποιος κοινά αποδεκτός τρόπος, προκειμένου να επιλεγεί ο ενδεδειγμένος συνδυασμός τεχνολογίας ΑΠΕ και τεχνικής αφαλάτωσης. Σε κάθε περίπτωση ο σχεδιασμός μιας μονάδας αφαλάτωσης με ΑΠΕ μεγάλης κλίμακας θα πρέπει να βασίζεται στην εξισορρόπηση μεταξύ της κάλυψης της ζήτησης για νερό και της οικονομικής βιωσιμότητας της μονάδας. Η διαδικασία λήψης αποφάσεων επηρεάζεται από μια σειρά παραγόντων συμπεριλαμβανομένης της ποιότητας και ποσότητας του νερού τροφοδοσίας, των προδιαγραφών του αφαλατωμένου νερού, του τύπου της τεχνολογίας και του μεγέθους της μονάδας ΑΠΕ, καθώς επίσης της εμπορικής ωριμότητας της τεχνολογίας, που θα χρησιμοποιηθεί. Οι παραπάνω παράμετροι, που αναλύονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια κατωτέρω, αποτελούν την βάση για την επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού. Επιπρόσθετα, αναγκαία κρίνεται η συμπερίληψη υπολογισμών αναφορικά με τα ειδικά χαρακτηριστικά της τοποθεσίας, όπου θα εγκατασταθεί η μονάδα και υπολογισμών επί των οικονομικών απαιτήσεων της υλοποίησης του έργου. Στην Εικόνα 19 παρατίθεται ένας αλγόριθμος για τον σχεδιασμό μιας μονάδας αφαλάτωσης με την χρήση ΑΠΕ (Voivontas et al., 2001; Malisovas & Koutroulis, 2020).



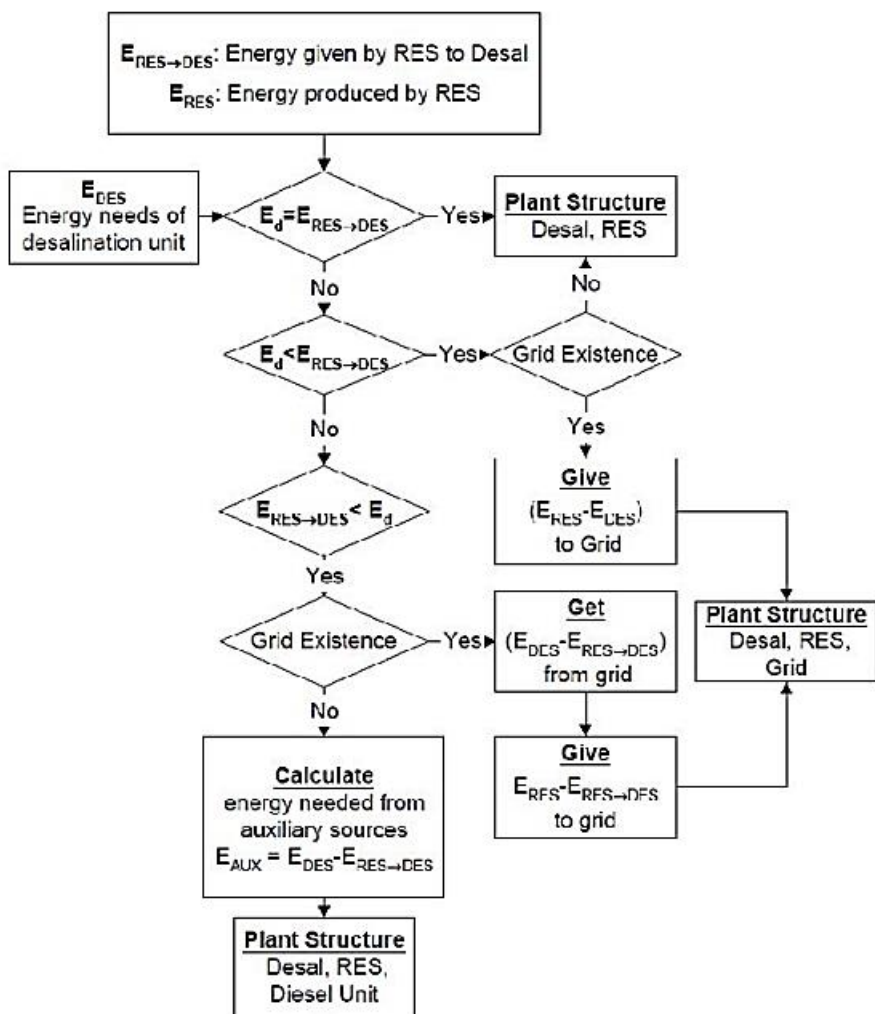
Εικόνα 20. Αλγόριθμος για το σχεδιασμό μιας μονάδας αφαλάτωσης με τη χρήση ΑΠΕ (Voivontas et al., 2001).

Η προτεινόμενη προσέγγιση αποτελείται από 4 διακριτά στάδια. Στο πρώτο στάδιο προσδιορίζονται οι τεχνολογίες, οι οποίες είναι σε θέση να καλύψουν τις απαιτήσεις του έργου ως προς την παροχή νερού. Το δεύτερο στάδιο συνίσταται στην διερεύνηση και μελέτη της κάθε επιλογής για τον προσδιορισμό της χωρητικότητας της μονάδας, της δομής και των λειτουργικών χαρακτηριστικών της. Κατά το τρίτο στάδιο πραγματοποιείται η οικονομική αξιολόγηση και ανάλυση της επένδυσης βάσει του συνδυασμού της τεχνολογίας ΑΠΕ και της τεχνικής αφαλάτωσης. Πραγματοποιείται ειδικότερα η αξιολόγηση του συνολικού κόστους της επένδυσης και της λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης με ΑΠΕ, προκειμένου να αξιολογηθεί η τιμή πώλησης του νερού, που παράγεται. Η τελευταία λαμβάνεται ως μέτρο σύγκρισης, προκειμένου να αξιολογηθούν οι πιθανοί συνδυασμοί των διαφόρων τεχνολογιών και να επιλεγεί ο βέλτιστος (Voivontas et al., 2001).

Κατά το σχεδιασμό της μονάδας αφαλάτωσης το σημαντικότερο ζήτημα είναι η εξεύρεση του βέλτιστου συνδυασμού ανάμεσα στην ισχύ εξόδου της επιλεγείσας ανανεώσιμης πηγής ενέργειας και την ζήτηση της διαδικασίας αφαλάτωσης για σταθερή παροχή ενέργειας. Οι λύσεις, που προσφέρονται

για τα ζητήματα αυτά συνίστανται στη διαχείριση της ενέργειας και της ζήτησης. Στο πλαίσιο της διαχείρισης της ενέργειας, πραγματοποιείται η επιλογή της κατάλληλα ελεγχόμενης υβριδικής μονάδας με ΑΠΕ, που έχει τη δυνατότητα παροχής μια σταθερής παραγωγής ενέργειας, ενώ το μέγεθος αυτής επαρκεί για την κάλυψη της ονομαστικής ζήτησης ισχύος για την διαδικασία της αφαλάτωσης. Στο πλαίσιο της διαχείρισης της ζήτησης, απαραίτητη προϋπόθεση για τη λειτουργία της διαδικασίας αφαλάτωσης είναι η κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης από την απόδοση της σχεδιαζόμενης μονάδας ΑΠΕ (Malisovas & Koutroulis, 2020).

Στην εξεύρεση της βέλτιστης λύσης συμβάλει σημαντικά η ανάλυση του κόστους από κοινού με τη σύγκριση ανάμεσα στους εναλλακτικούς συνδυασμούς των τεχνολογιών ΑΠΕ και των τεχνικών αφαλάτωσης, ενώ για τον προσδιορισμό της χωρητικότητας απαραίτητος είναι ο προσδιορισμός της ενεργειακής ισορροπίας ανάμεσα στην παραγομένη ενέργεια από την επιλεγείσα ΑΠΕ και τις ενεργειακές απαιτήσεις της διεργασίας της αφαλάτωσης (Bourouni et al., 2011). Στην Εικόνα 20 αποτυπώνεται ο αλγόριθμος εκτίμησης των ροών ενέργειας σε ετήσια βάση & μέγεθος μονάδας. Η μέγιστη χωρητικότητα και η παράγωγή ενέργειας καθορίζεται από το δυναμικό, καθώς επίσης από τον διαθέσιμο χώρο εγκατάσταση της μονάδας. Η παραγόμενη ενέργεια από την ΑΠΕ διαφοροποιείται στη βάση του τύπου της ΑΠΕ. Περαιτέρω, σε περίπτωση που παράγεται μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας από τις καθορισμένες ανάγκες, είναι δυνατόν η περίσσεια της να πωληθεί εν συνεχεία στο δίκτυο. Σε περίπτωση που η παραγόμενη από τις ΑΠΕ ενέργεια δεν επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών των διεργασιών της αφαλάτωσης, είναι απαραίτητη η χρήση εξωτερικών πηγών ενέργειας συμπεριλαμβανομένου του δικτύου, των γεννητριών, των μπαταριών κ.λπ. Επίσης, είναι πιθανή η χρήση ενός βοηθητικού συστήματος παροχής ενέργειας για την αντιστάθμιση των περιόδων χαμηλής διαθεσιμότητας ενέργειας από ΑΠΕ (π.χ. χαμηλή ηλιοφάνεια κ.λπ.) (Voivontas et al., 2001).



Εικόνα 21. Αλγόριθμος εκτίμησης των ροών ενέργειας σε ετήσια βάση & μέγεθος μονάδας (Voivontas et al., 2001)

5.2 Σημαντικοί παράμετροι σχεδιασμού & διαστασιολόγησης

Όπως προαναφέρθηκε, ο υπολογισμός και η διαστασιολόγηση μιας μονάδας αφαλάτωσης, που τροφοδοτείται με ενέργεια από ΑΠΕ θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη μια σειρά παραμέτρων συμπεριλαμβανομένου του είδους του νερού (αν πρόκειται για θαλασσινό ή υφάλμυρο), των αναγκών για πόσιμο νερό, της διαθεσιμότητας της ΑΠΕ, που αποτελεί συνάρτηση της τοποθεσίας και των οικονομικών περιορισμών, που με τη σειρά τους προσδιορίζονται από τους ανωτέρω παράγοντες. Σε κάθε περίπτωση, ο απώτερος στόχος είναι ο σχεδιασμός ενός οικονομοτεχνικά βέλτιστου συστήματος, που χαρακτηρίζεται από αξιοπιστία και είναι απαλλαγμένο από δυσλειτουργίες, που συνδέονται με την ανεπαρκή παροχή ενέργειας λόγω αστοχιών στη μελέτη υπολογισμού του δυναμικού της ευρύτερης περιοχής εγκατάστασης (Subiela et al., 2020).

Η ενδεδειγμένη διαστασιολόγηση θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον πληθυσμό της περιοχής εγκατάστασης, τις ιδιαίτερες ανάγκες του, αλλά και τα στοιχεία του νερού, που θα αφαλατωθεί. Η επιλογή της βέλτιστης ΑΠΕ για την τροφοδοσία της μονάδας αφαλάτωσης και την ικανοποίηση των απαιτήσεων σε νερό εξαρτάται από το σύνολο των χαρακτηριστικών της περιοχής εγκατάστασης και δη των κλιματολογικών συνθηκών. Αντίστοιχα, οι απαιτήσεις σε νερό αποτελούν την βάση για τον υπολογισμό

του μεγέθους της μονάδας. Σε συνέχεια του προσδιορισμού του μεγέθους της μονάδας και των αναγκών αυτής σε ενέργεια, υπολογίζεται η απαιτούμενη ισχύς λειτουργίας και η απαιτούμενη ενέργεια. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, όπου τίθενται οικονομικής φύσεως περιορισμοί, ενδείκνυται η αντιστροφή της μεθοδολογίας, ενώ πραγματοποιούνται συμβιβασμοί σε όρους τελικού προϊόντος. Επί παραδείγματι, σε ορισμένες αναπτυσσόμενες χώρες, όπου πέραν της λειψυδρίας υπάρχει ένδεια, είναι πιθανή η εγκατάσταση μονάδων, οι οποίες δεν επαρκούν για την κάλυψη του συνόλου των αναγκών σε νερό (Koroneos et al., 2007; Koutroulis et al., 2021).

Παρακάτω παρατίθενται οι παράμετροι σχεδιασμού και διαστασιολόγησης που αφορούν τόσο την μονάδα αφαλάτωσης, όσο και την τεχνολογία ΑΠΕ.

5.2.1 Παράμετροι μονάδας αφαλάτωσης

Μια σημαντική παράμετρος για την ελαχιστοποίηση του κόστους είναι η επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας εγκατάστασης στη βάση των ακόλουθων κριτηρίων (Petraakis et al., 2020; Malisovas & Koutroulis, 2020).

1. Εγγύτητα στον προς υδροδότηση οικισμό.
2. Εγγύτητα σε παράκτια περιοχή για την αποφυγή της διέλευσης αγωγών με θαλασσίνο νερό μέσα από γεωργικές και άλλες εκτάσεις και την αποτροπή κινδύνου μόλυνσης.
3. Παροχή καλής ποιότητας ροής στη θαλάσσια περιοχή, όπου δεν υπάρχει ενδεχόμενο μόλυνσης ή ρύπανσης του νερού από όμορες βιομηχανίες ή άλλου τύπου εγκαταστάσεις.
4. Εγγύτητα σε δίκτυο υδροδότησης και αντλιοστάσιο για τη διασφάλιση της εύκολης και γρήγορης σύνδεσης της μονάδας αφαλάτωσης με το κεντρικό σύστημα μεταφοράς και την αποφυγή πρόσθετου κόστους.
5. Η περιοχή εγκατάστασης να μην βρίσκεται εντός περιοχών, προστατευμένων από διεθνή και εθνικά νομοθετικά κείμενα, καθώς επίσης και εντός περιοχών, όπου είναι συχνή η παρουσία του ανθρώπου, εξαιτίας του παράγοντα της απόρριψης της άλμης.

5.2.2 Παράμετροι μονάδας ΑΠΕ

Δεδομένου ότι οι ενεργειακές απαιτήσεις της διαδικασίας της αφαλάτωσης καλύπτονται από την εγκατεστημένη μονάδα ΑΠΕ, είναι εύλογο ότι αυτή ανάγεται σε κεντρικό στοιχείο, εφόσον η λειτουργία του όλου συστήματος είναι αυτόνομη. Για το λόγο αυτό εξετάζονται τα παρακάτω:

1. Επάρκεια σε όρους δυναμικού ΑΠΕ (αιολικού, ηλιακού, γεωθερμικού) για τη διασφάλιση της κάλυψης των αναγκών ηλεκτροδότησης της μονάδας αφαλάτωσης, καθώς επίσης της διασφάλισης της σταθερότητας του συστήματος.
2. Εγγύτητα στην μονάδα αφαλάτωσης για την μείωση του κόστους μεταφοράς και των ενδεχόμενων

ενεργειακών απωλειών. Είναι δυνατή η χρήση του υφιστάμενου δικτύου διανομής, εφόσον διαθέτει την ενδεδειγμένη ικανότητα φόρτισης και είναι παρακείμενο στη μονάδα αφαλάτωσης.

3. Αποφυγή της αστάθειας του δικτύου λόγω της χρήσης ΑΠΕ μέσω της σύνδεσης της μονάδας ΑΠΕ στο δίκτυο διανομής.
4. Συμμόρφωση με την κείμενη νομοθεσία αναφορικά με τα όρια των οικισμών, την ύπαρξη προστατευμένων περιοχών κ.λπ.
5. Ενημέρωση και εμπλοκή της τοπικής κοινωνίας για την αποφυγή δυνητικών αντιδράσεων λόγω έλλειψη επαρκούς πληροφόρησης (Bourouni et al., 2011; Malisovas & Koutroulis, 2020; Koutroulis et al., 2021).

5.3 Οικονομική αξιολόγηση μονάδας αφαλάτωσης

Όπως προαναφέρθηκε, οι εκτιμήσεις κόστους για το αφαλατωμένο νερό εξαρτώνται από την τοποθεσία και μια σειρά σχεδιαστικών και λειτουργικών παραγόντων, ως ακολούθως (Voivontas et al., 2001; Ghaffour et al., 2013; Malisovas & Koutroulis, 2020):

- **Διαθεσιμότητα ηλεκτρικής ενέργειας** (όπως αναλύθηκε ανωτέρω).
- **Επιλεγμένη τεχνολογία και σχεδιασμός εξαρτημάτων:** το κόστος επένδυσης ποικίλλει ευρέως μεταξύ των θερμικών μονάδων αφαλάτωσης και των μονάδων αφαλάτωσης μέσω μεμβρανών. Για παρόμοια παραγωγική ικανότητα, οι θερμικές διεργασίες απαιτούν μεγαλύτερο ενεργειακό αποτύπωμα, υψηλότερη ειδική ενέργεια (ηλεκτρική και θερμική) και έχουν ακριβότερο εξοπλισμό από τις διεργασίες RO με θαλασσινό νερό τροφοδοσίας. Από την άλλη πλευρά, το απόσταγμα, που παράγεται με θερμικές διεργασίες έχει υψηλότερη ποιότητα σε σύγκριση με εκείνο, που προκύπτει από RO και δεν απαιτεί προεπεξεργασία.
- **Μέγεθος εγκατάστασης:** γενικά όσο μεγαλύτερο είναι το δυναμικό της μονάδας, τόσο χαμηλότερο είναι το συνολικό κόστος του νερού και το κόστος της επένδυσης ανά όγκο νερού.
- **Γεωγραφική θέση και συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τοποθεσίας:** κόστος γης και μεταφοράς νερού.
- **Ποιότητα του νερού τροφοδοσίας:** η αλατότητα, η θερμοκρασία, η διάταξη της τροφοδοσίας και η απαιτούμενη ποιότητα παραγόμενου νερού επηρεάζουν το τελικό κόστος, καθώς αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν την προεπεξεργασία και τη μετεπεξεργασία, το κόστος λειτουργίας και διαχείρισης, καθώς επίσης το προσδόκιμο ζωής των εξαρτημάτων.
- **Ανθρώπινο δυναμικό με την κατάλληλη κατάρτιση:** η κατάλληλη κατάρτιση του εμπλεκόμενου προσωπικού διασφαλίζει την βελτίωση της λειτουργίας και συντήρησης του συστήματος, καθώς επίσης της δυναμικότητας παραγωγής.
- **Διάρκεια ζωής της μονάδας & απόσβεση:** όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια ζωής του έργου, τόσο μειώνεται το κόστος κεφαλαίου.

Οι επενδύσεις κεφαλαίου και το συνολικό κόστος νερού είναι πρωταρχικές παράμετροι, που χρησιμοποιούνται από τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων για την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας

αφαλάτωσης. Επί του παρόντος, οι μονάδες MSF απαιτούν υψηλότερο κόστος κεφαλαίου, ενώ οι μονάδες RO απαιτούν υψηλότερο κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Το κόστος αφαλάτωσης μειώνεται σταδιακά για όλες τις τεχνολογίες, με τη μεγαλύτερη μείωση κόστους να έχει επιτευχθεί στην τεχνολογία RO, γεγονός που την καθιστά την προτιμώμενη τεχνολογία. Ωστόσο, οι ερευνητές πιστεύουν ότι αυτό το κόστος δεν θα συνεχίσει να μειώνεται με τους ίδιους ρυθμούς στο εγγύς μέλλον, με την αύξηση του κόστους ενέργειας και των πρώτων υλών (Ghaffour et al., 2013).

Το κόστος επένδυσης για μονάδα RO κυμαίνεται μεταξύ \$600-2.000 ανά m^3/d παραγωγικής ικανότητας. Το αναφερόμενο εύρος κόστους παραγωγής για μια μεγάλης κλίμακας μονάδα συμβατική αφαλάτωση είναι \$1 - \$2/ m^3 . Η αφαλάτωση RO με θαλασσινό νερό απαιτεί μόνο ηλεκτρική ενέργεια, ενώ η θερμική αφαλάτωση (MSF, MED) απαιτεί τόσο ηλεκτρική, όσο και θερμική ενέργεια και έχει χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με τις θερμικές τεχνολογίες. Η ανάλυση του κόστους για την αφαλάτωση RO με θαλασσινό νερό έδειξε ότι η ενέργεια αντιπροσωπεύει περίπου το 43% του συνολικού κόστους παραγωγής νερού, σε σύγκριση με το 59% για μια μεγάλης κλίμακας μονάδα θερμικής αφαλάτωσης (Shouman et al., 2016).

Όσον αφορά το κόστος της αφαλάτωσης με ΑΠΕ, η υπάρχουσα βιβλιογραφία υποδηλώνει ότι το κόστος είναι υψηλότερο από τα συστήματα που χρησιμοποιούν συμβατική ενέργεια. Το συνολικό κόστος του ηλιακού συστήματος μπορεί να κυμαίνεται από 17,4% έως 76,7% του συνολικού συστήματος αφαλάτωσης, ανάλογα με τις διαφορετικές διαμορφώσεις του συστήματος. Μελέτες έχουν δείξει ότι σε ένα σύστημα RO με φωτοβολταϊκά συστήματα, το σύστημα αφαλάτωσης από μόνο του αντιπροσωπεύει το 27-39% του συνολικού κόστους του συστήματος (Li et al., 2013). Οι τυπικές αναφερόμενες δυναμικότητες και το κόστος του αφαλατωμένου γλυκού νερού από τις περισσότερες κοινές διαδικασίες αφαλάτωσης, που βασίζονται σε ΑΠΕ φαίνονται στον Πίνακα 1. Οι περισσότερες από αυτές τις τεχνολογίες κατέδειξαν ταχεία μείωση του κόστους των ΑΠΕ, ενώ έχουν σημειώσει σημαντικές τεχνικές προόδους. Το μελλοντικό αναμενόμενο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας από το έτος 2020 και εντεύθεν για τα συνηθέστερα ηλιακά συστήματα έχει αναφερθεί ότι είναι 0,04-0,1 \$/kwh και περίπου 0,04/kwh για τα ηλιακά θερμικά και φωτοβολταϊκά συστήματα, αντίστοιχα, για ετήσια ενεργειακή απομόνωση ύψους 2.500 kw/m^3 . Οι πιο αισιόδοξες προβλέψεις για το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα, ειδικά σε χώρες με ηλιακή ενέργεια υψηλής ακτινοβολίας, αναφέρουν ότι το κόστος της αφαλάτωσης RO, που τροφοδοτείται από από φωτοβολταϊκά συστήματα θα μειωθεί σημαντικά στο μέλλον (Shouman et al., 2016).

Πίνακας 1. Χωρητικότητα και κόστος για τις συνηθέστερες επιλογές αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με ηλιακή και αιολική ενέργεια (Shouman et al., 2016)

Τεχνολογία	Δυναμικό m^3 /d	Κατανάλωση ενέργειας	Κόστος νερού (\$/ m^3)
Ηλιακοί συλλέκτες	<0.1	-	1.3-6.5

Υγρανση		Ηλεκτρική: 1.5	
Συγκεντρωτική Ηλιακή Ενέργεια (CSP)	>5.000	Θερμική: 60-70	2.3-2.9
Απόσταξη		Ηλεκτρική: 1.5-2	
Φωτοβολταϊκά/ RO	<100	Ηλεκτρική: 4-5	11.7-15.6
Αιολική/ RO	50-2.000	Ηλεκτρική: 4-5	6.5-9.5 (δυναμικό < 100 m ³ /d) 2-5.2 (δυναμικό 1.000 m ³ /d)
Αιολική VPC	<100	Ηλεκτρική: 11-14	5.2-7.8

Το τελικό κόστος της αφαλάτωσης με ΑΠΕ θα εξαρτηθεί από μια σειρά παραμέτρων. Για την εφαρμογή ενός συστήματος ΑΠΕ απαιτούνται εκτιμήσεις για πολλές παραμέτρους όπως η τοποθεσία, ο σχεδιασμός της εγκατάστασης, η αποθήκευση ενέργειας ή η έλλειψή της, η προβλεπόμενη ενεργειακή απόδοση και η ωριαία κατανομή της. Η άμεση σύνδεση συστημάτων παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ μεγάλης κλίμακας με μεγάλες μονάδες αφαλάτωσης έχει πολλά υποσχόμενες δυνατότητες και υλοποιείται ήδη σε βασικές αγορές όπως η Σαουδική Αραβία και η Αυστραλία. Οι βασικές πηγές χρηματοδότησης τέτοιων έργων είναι οι κρατικοί προϋπολογισμοί και οι συμπράξεις δημόσιου και ιδιωτικού τομέα (Hossam-Eldin et al., 2012; Shouman et al., 2016).

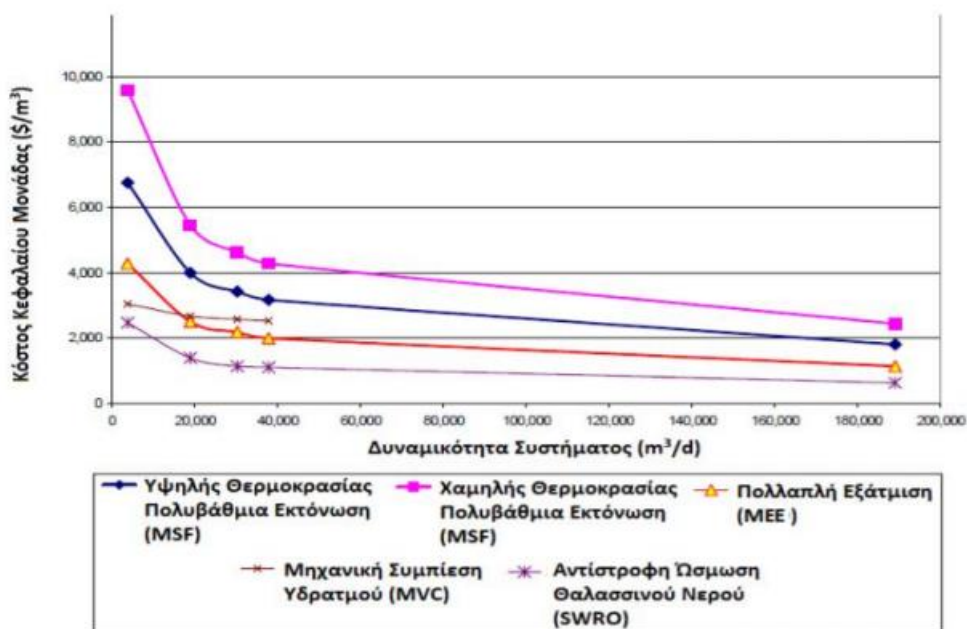
5.4 Κόστος για την εγκατάσταση της μονάδας αφαλάτωσης ΑΠΕ

5.4.1 Άμεσο κόστος για την εγκατάσταση της μονάδας αφαλάτωσης ΑΠΕ

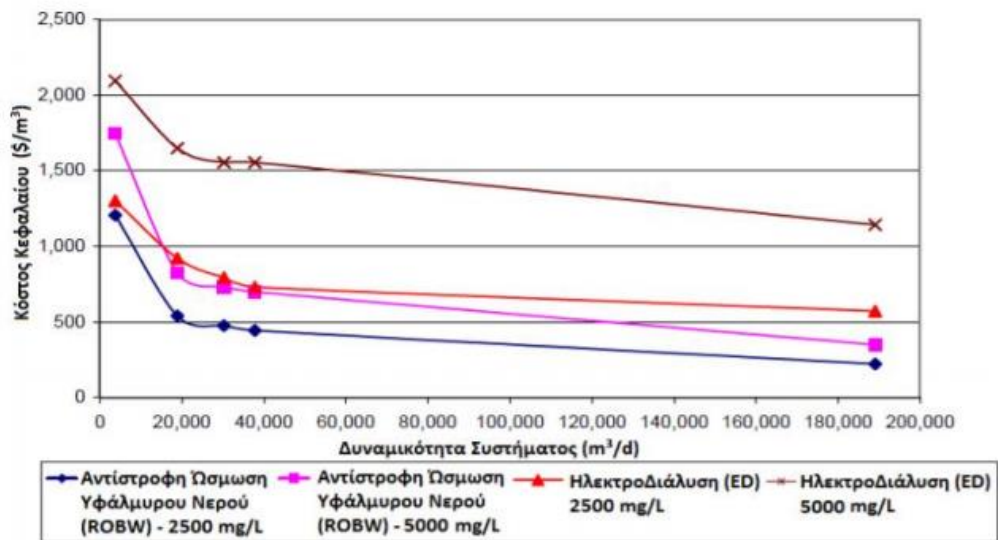
Το άμεσο κόστος του κεφαλαίου αφορά το κόστος για την αγορά των διαφορετικών μηχανημάτων και εξοπλισμού, καθώς επίσης και το κόστος για την έκταση, την κατασκευή και την οικοδόμηση της μονάδας. Παρατίθενται συνοπτικά οι περιγραφές μερικών σημαντικών συστατικών του άμεσου κόστους για τις μονάδες αφαλάτωσης, που βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (El-Dessouky & Ettouney, 2002).

- Το **κόστος της έκτασης** ενδέχεται να είναι και μηδενικό και εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής εγκατάστασης. Επί παραδείγματι, τα συστήματα αφαλάτωσης, που είναι δημόσια και δεν επιβάλλουν κάποια χρέωση. Επιπλέον, έργα, τα οποία χρηματοδοτούνται από κυβερνητικούς ή τοπικούς παράγοντες ενδέχεται να επιτύχουν την επιβολή μειωμένων ή ακόμα και μηδενικών επιβαρύνσεων αναφορικά με το κόστος της εκμετάλλευσης της γης (Ghaffour et al., 2013).
- Ένα σημαντικό κόστος αφορά και το **κόστος παροχής από κάποιο πηγάδι**. Βάσει εκτιμήσεων απαιτούνται 650\$ ανά μέτρο βάθους και για την κατασκευή ενός πηγαδιού, ενώ η μέση δυναμικότητα τους υπολογίζεται στα 500 m³/d (Voivontas et al., 2001; Ghaffour et al., 2013).

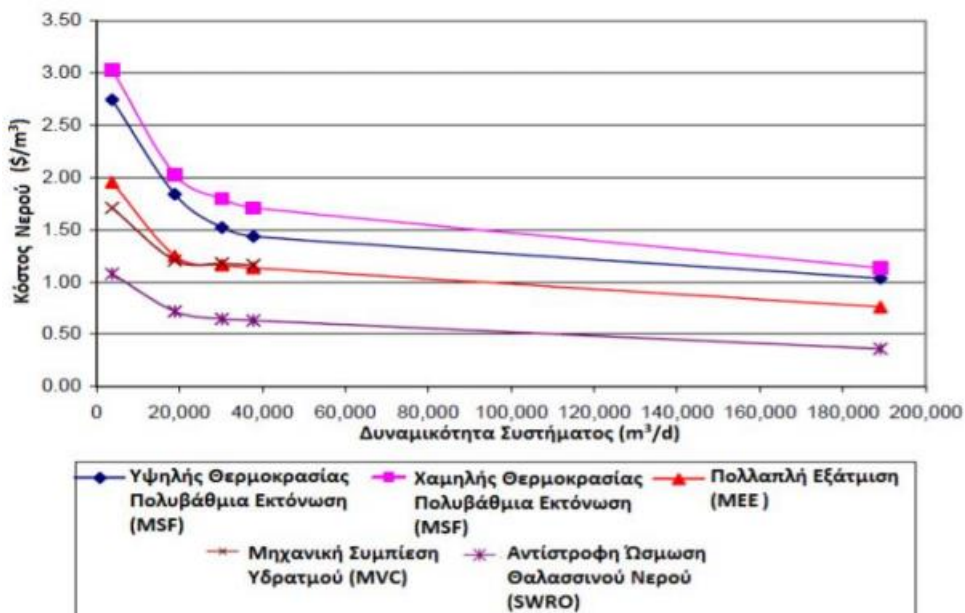
- Σημαντικό είναι και το **κόστος του εξοπλισμού**, που αποτελεί συνάρτηση του τύπου διεργασίας αφαλάτωσης και της συνολικής δυναμικότητας, από τον τύπο της διεργασίας και την δυναμικότητα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το κόστος του εξοπλισμού για την εγκατάσταση μιας μονάδας RO με παραγωγή της τάξεως των 100.000 m³/d ανέρχεται σε \$50×10⁶. Εν αντιθέσει το κόστος εξοπλισμού των μονάδων MSF και MED είναι υψηλότερο και βάσει εκτιμήσεων ενδέχεται να αγγίξει τα \$40×10⁶ στην περίπτωση ενός συστήματος με συνολική δυναμικότητα 27.000 m³/d (Ghaffour et al., 2013). Ο εξοπλισμός και τα εξαρτήματα, το κόστος των οποίων εμπίπτει σε αυτήν την κατηγορία, περιλαμβάνουν τον εξοπλισμό για τη διεργασία αφαλάτωσης, τις ηλεκτρικές καλωδιώσεις, τα όργανα ελέγχου, τις αντλίες, συστήματα καθαρισμού, χλωρίωσης, αλλά και επεξεργασίας πριν από την πραγματοποίηση αλλά και κατόπιν της αφαλάτωσης, αντλίες, γραμμές δικτύου για την πρόσληψη θαλασσινού νερού και την απόρριψη άλμης, καθώς και βοηθητικό εξοπλισμό (Wittholz et al., 2008).
- Το **κόστος για την οικοδόμηση των βοηθητικών εγκαταστάσεων**, που παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση (\$100-1.000/m²) ανάλογα με την περιοχή εγκατάστασης και το είδος των εγκαταστάσεων, που θα οικοδομηθούν (Wittholz et al., 2008; Ghafour et al., 2013).
- Το κόστος αγοράς των μεμβρανών, το οποίο διαφοροποιείται στη βάση της δυναμικότητας του συστήματος και δύναται να κυμανθεί μεταξύ \$500-1.000/ μονάδα με παραγωγή 50-100m³/d (Ghafour et al., 2013; Shouman et al., 2016). Στις Εικόνες 21, 22, 23, 24 παρατίθενται πληροφορίες για το μοναδιαίο κόστος κεφαλαίου σε μια μονάδα αφαλάτωσης με θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό τροφοδοσίας (Tzen, 2003).



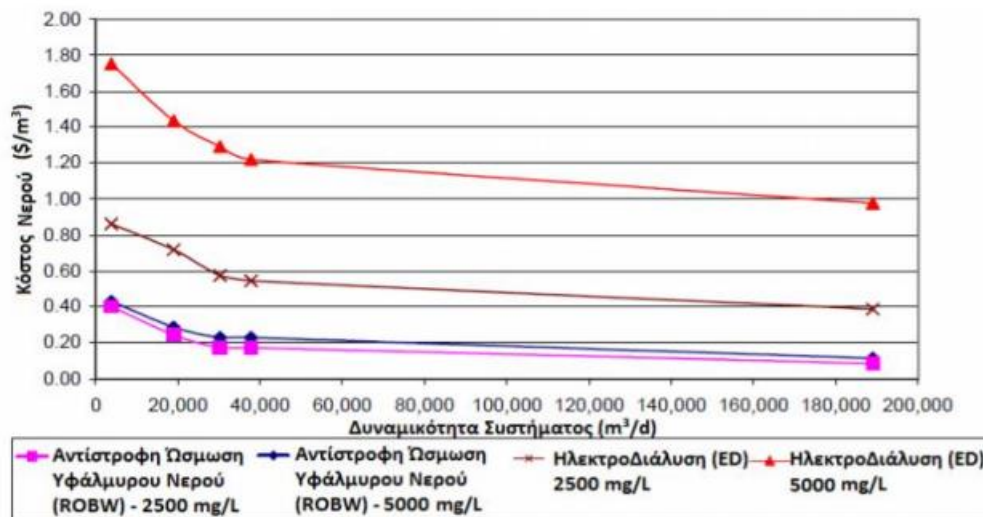
Εικόνα 22. Ενδεικτικό κόστος κεφαλαίου για την εγκατάσταση μονάδας αφαλάτωσης με χρήση θαλασσινού νερού (Tzen, 2003)



Εικόνα 23. Ενδεικτικό κόστος κεφαλαίου για την εγκατάσταση μονάδας αφαλάτωσης με χρήση υφάλμυρου νερού (Tzen, 2003)



Εικόνα 24. Ενδεικτικό κόστος νερού για μια μονάδα αφαλάτωσης με θαλασσινό νερό τροφοδοσίας (Tzen, 2003)



Εικόνα 25. Ενδεικτικό κόστος νερού για μια μονάδα αφαλάτωσης με υφάλμυρο νερό τροφοδοσίας (Tzen, 2003)

5.4.2 Έμμεσο κόστος για την εγκατάσταση της μονάδας αφαλάτωσης ΑΠΕ

Το έμμεσο κόστος κεφαλαίου αποτελεί ένα ποσοστό του συνολικού άμεσου κόστους κεφαλαίου και μεταξύ άλλων περιλαμβάνει (El-Dessouky & Ettouney, 2002; Mohammadi et al., 2020):

- Το **κόστος ναύλων και ασφάλισης** ανέρχεται σε ένα ποσοστό της τάξεως του 5% επί του συνολικού άμεσου κόστους κεφαλαίου μιας μονάδας αφαλάτωσης.
- Το **κόστος των γενικών εξόδων για την κατασκευή** αντιπροσωπεύει το 15% του συνολικού άμεσου κόστους συμπεριλαμβανομένων των πρόσθετων παροχών, της εργασίας, των αμοιβών των επιβλεπόντων, των προσωρινών εγκαταστάσεων, του κατασκευαστικού εξοπλισμού, των λοιπών εργαλείων και των κερδών της αναδόχου κατασκευαστικής εταιρείας.
- Το **κόστος των εξόδων του ιδιοκτήτη**, που αντιπροσωπεύει το 10% του συνολικού άμεσου κόστους από υλικά και εργασία, συμπεριλαμβανομένων των νομικών και μηχανικών εξόδων.
- Έκτακτα έξοδα, που αντιστοίχα αντιπροσωπεύουν το 10% του συνολικού άμεσου κόστους κεφαλαίου.

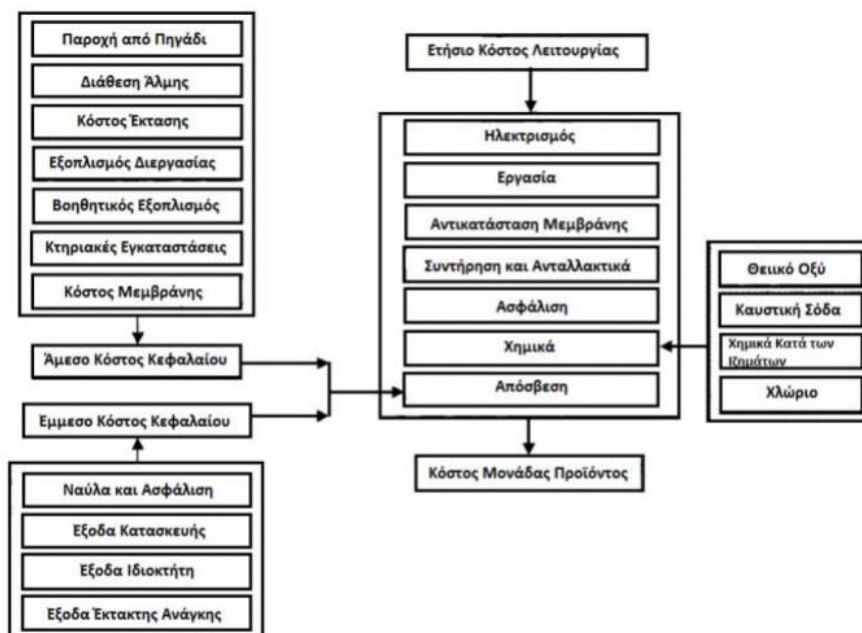
5.4.3 Λειτουργικό κόστος μονάδας αφαλάτωσης ΑΠΕ

Στο λειτουργικό κόστος της μονάδας αφαλάτωσης με ΑΠΕ περιλαμβάνεται το σύνολο των δαπανών, που πραγματοποιούνται σε συνέχεια της ανάθεσης των συστημάτων, αλλά και καθόλη τη διάρκεια της λειτουργίας της συμπεριλαμβανομένης της εργασίας, της ενέργειας, των χημικών, των ανταλλακτικών μερών, καθώς επίσης άλλων δαπανών, που κατά καιρούς προκύπτουν. Αυτό το κόστος περιλαμβάνει μεταξύ άλλων (El-Dessouky & Ettouney, 2002; Ghaffour et al., 2013):

- Το **κόστος ηλεκτρισμού**, το οποίο κατά προσέγγιση ανέρχεται σε 0.04 kWh για τις χώρες του

Κόλπου και σε 0.09 kWh για τις ευρωπαϊκές χώρες.

- Το **κόστος εργασίας**, που εξαρτάται από την περιοχή εγκατάστασης και το ιδιοκτησιακό καθεστώς του έργου (ιδιωτικό ή δημόσιο).
- Το **κόστος αντικατάστασης** των μεμβρανών, που αντιστοιχεί σε 5-20% ανά έτος. Το κατώτατο κόστος (5%) ισχύει στην περίπτωση μονάδων, όπου το νερό τροφοδοσίας είναι υφάλμυρο και διαθέτει χαμηλή περιεκτικότητα σε αλάτι, υποστηριζόμενο από την αποτελεσματική λειτουργία της διεργασίας και την προκατεργασία της. Το ανώτατο κόστος (20%) αφορά την περίπτωση μονάδων με θαλασσινό νερό τροφοδοσίας με υψηλή αλατότητα, αντίστοιχο με εκείνο που υπάρχει στις χώρες του Κόλπου.
- Το **κόστος συντήρησης και ανταλλακτικών**, που αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό < 2% του συνολικού κόστους του κεφαλαίου.
- Τα **ασφαλιστικά έξοδα** αντιπροσωπεύουν ένα 0,5% του συνολικού ετήσιου κόστους του κεφαλαίου.
- Οι **αποσβέσεις και τα πάγια τέλη** αντιπροσωπεύουν τις ετήσιες πληρωμές, που καλύπτουν το σύνολο του άμεσου και έμμεσου κόστους. Έχει καταδειχθεί ότι στο πλαίσιο της οικονομικής ανάλυσης των μονάδων αφαλάτωσης, οι αποσβέσεις υπολογίζονται σε βάθος 30 ετών, ενώ το μέσο επιτόκιο ανέρχεται σε 5%.
- Το κόστος των χημικών, που χρησιμοποιούνται στο στάδιο προπεξεργασίας και καθαρισμού του νερού τροφοδοσίας, συμπεριλαμβανομένου του θειικού οξέος, της καυστικής σόδας, του χλωρίου και των διαφόρων χημικών έναντι της ιζηματοποίησης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το κόστος χημικής επεξεργασίας διαφέρει μεταξύ θερμικών διεργασιών και διεργασιών μεμβράνης. Σημειώνεται ότι το κόστος χημικής επεξεργασίας είναι υψηλότερο για την περίπτωση μονάδων αφαλάτωσης με μεμβράνες. Εν γένει, το κόστος της χημικής επεξεργασίας καθορίζεται επίσης και από τις υψηλότερες θερμοκρασίες της άλμης, καθώς επίσης τα επίπεδα συγκέντρωσης άλατος στο νερό τροφοδοσίας (El-Dessouky & Ettouney, 2002; Ghaffour et al., 2013).



Εικόνα 26. Διαγραμματική απεικόνιση του κόστους εγκατάστασης & λειτουργίας μιας μονάδας αφαλάτωσης ΑΠΕ (Voivontas et al., 2001)

5.5 Χρήση εξειδικευμένου λογισμικού για επιλογή κατάλληλης τεχνολογίας αφαλάτωσης με ΑΠΕ

Τέλος, η χρήση εξειδικευμένου λογισμικού μπορεί να αποβεί ιδιαίτερα χρήσιμη για την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας αφαλάτωσης σε συνδυασμό με ΑΠΕ, εφόσον εξετάζει τις εναλλακτικές λύσεις σχεδιασμού στη βάση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της περιοχής εγκατάστασης, του επίπεδου αλατότητας του νερού τροφοδοσίας κ.λπ. Τέτοια προγράμματα, εξετάζουν τις ειδικές παραμέτρους για το εκάστοτε έργο και παρέχει προτάσεις για τον βέλτιστο συνδυασμό τεχνολογιών για τη διασφάλιση της κάλυψης των ενεργειακών απαιτήσεων της διαδικασίας της αφαλάτωσης, παρέχοντας τη δυνατότητα σύγκρισης όλων των επιλογών στη βάση οικονομικών δεδομένων και αναλύσεων (Pietrasanta et al., 2023). Ορισμένα από τα γνωστότερα λογισμικά για το σχεδιασμό μονάδων αφαλάτωσης σε συνδυασμό με ΑΠΕ περιγράφονται ακολούθως:

- **HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables):** χρησιμοποιείται για ανάλυση και τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού συστημάτων ΑΠΕ εκτός δικτύου και συνδεδεμένων στο δίκτυο.²
- **+ (Desalination Plus):** ολοκληρωμένο πακέτο λογισμικού ειδικά σχεδιασμένο για το σχεδιασμό και την ανάλυση μονάδων αφαλάτωσης. Περιλαμβάνει ενότητες για σχεδιασμό συστήματος, πρόβλεψη απόδοσης, εκτίμηση κόστους και εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων.³
- **Solar-Desalination Plant Designer (SPD):** αναπτύχθηκε από τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής

² Για περισσότερα βλ. <https://www.homerenergy.com/>

³ Για περισσότερα βλ. <https://www.desalinationlab.com/>

Ενέργειας (ΙΑΕΑ) για το σχεδιασμό μονάδων αφαλάτωσης με ηλιακή ενέργεια. Επιτρέπει στους χρήστες να βελτιστοποιήσουν τη διαμόρφωση του συστήματος λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα ηλιακών πόρων, η χωρητικότητα της εγκατάστασης και η ζήτηση νερού (Marimuthu et al., 2017).

- **Polysun:** λογισμικό προσομοίωσης που χρησιμοποιείται ευρέως για το σχεδιασμό συστημάτων ΑΠΕ. Προσφέρει ολοκληρωμένες δυνατότητες μοντελοποίησης και επιτρέπει την ενσωμάτωση διαφορετικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως ηλιακών φωτοβολταϊκών (PV), αιολικών και ηλιακών θερμικών τεχνολογιών.⁴
- **RETScreen:** δωρεάν εργαλείο λογισμικού που αναπτύχθηκε από την κυβέρνηση του Καναδά που επιτρέπει το σχεδιασμό, την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση έργων ΑΠΕ και ενεργειακής απόδοσης. Αν και δεν έχει σχεδιαστεί ειδικά για την αφαλάτωση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της σκοπιμότητας και της απόδοσης των συστημάτων αφαλάτωσης με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.⁵
- **Water Application Value Engine (WAVE):** λογισμικό που επιτρέπει το σχεδιασμό μονάδων αφαλάτωσης με κυματική ενέργεια, έχει σχεδιαστεί από την εταιρεία DuPont.⁶
- **AQUASIM:** εργαλείο λογισμικού ειδικά σχεδιασμένο για μοντελοποίηση και προσομοίωση διεργασιών αφαλάτωσης. Επιτρέπει στους χρήστες να αναλύουν διάφορες τεχνολογίες αφαλάτωσης και να προσομοιώνουν την απόδοσή τους υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένης της ενσωμάτωσης με ανανεώσιμες πηγές.⁷

⁴ Για περισσότερα βλ. <https://www.velasolaris.com/>

⁵ Για περισσότερα βλ. <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>

⁶ Για περισσότερα βλ. <https://www.dupont.com/water/resources/design-software.html>

⁷ Για περισσότερα βλ. <https://www.eawag.ch/en/departement/siam/software/>

Συμπεράσματα – Προτάσεις

Τις τελευταίες δεκαετίες, η αύξηση του πληθυσμού από κοινού με τις ανάγκες οικονομικής ανάπτυξης, έχουν οδηγήσει στην αυξημένη ζήτηση για νερό. Περαιτέρω, πέραν του ζητήματος της ραγδαίας αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού, ορισμένοι παράγοντες όπως η κλιματική αλλαγή και η παγκοσμιοποίηση εντείνουν την εκμετάλλευση των υδάτινων πόρων. Ωστόσο, οι υδάτινοι πόροι του πλανήτη παραμένουν σταθεροί, γεγονός που εγείρει ανησυχίες για την εξάντληση τους. Πολλές περιοχές του κόσμου πλήττονται από σημαντική έλλειψη νερού. Η αφαλάτωση έχει αναδυθεί ως μια τεχνολογικά και οικονομικά βιώσιμη λύση για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων.

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι τεχνολογίες αφαλάτωσης με βάση τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν προσελκύσει αυξημένο ενδιαφέρον. Η τεχνολογική πρόοδος και η ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις προόδους στις διαδικασίες αξιοποίησης ενέργειας, την εξεύρεση του βέλτιστου συνδυασμού ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τεχνικών αφαλάτωσης, τις εξελίξεις σε αναβαθμισμένες συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, την ανάπτυξη βελτιωμένων ρυθμιστών ισχύος και τη διαθεσιμότητα μεμβρανών υψηλής απόδοσης. Η παραγωγή ενέργειας έχει αποτελέσει τον κύριο στόχο της έρευνας αναφορικά με τις ΑΠΕ, με αποτέλεσμα να δίνεται ουσιαστικά λιγότερη εστίαση στο σχεδιασμό και τη διαμόρφωση των διαδικασιών αφαλάτωσης, που βασίζονται στις ΑΠΕ.

Ένα σημαντικό εμπόδιο για την κλιμάκωση των μονάδων αφαλάτωσης, που βασίζονται σε ΑΠΕ είναι η διαλείπουσα λειτουργία αυτών των πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια. Αυτό το ζήτημα υποδεικνύει επίσης την ανάγκη για ανάπτυξη αποτελεσματικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Περαιτέρω, σημαντικά αυξημένο είναι και κόστος τους εν συγκρίσει με τα συστήματα, που χρησιμοποιούν συμβατική ενέργεια, γεγονός που υπογραμμίζει την ανάγκη βελτίωσης των υφιστάμενων συστημάτων για τη διασφάλιση της οικονομικής αποτελεσματικότητάς τους.

Η κύρια πρόκληση στην εφαρμογή μονάδων αφαλάτωσης μεγάλης κλίμακας, βασισμένων στην ηλιακή ενέργεια είναι η απώλεια ενέργειας κατά τις διαδικασίες μετατροπής ενέργειας. Ωστόσο, αυτές οι απώλειες είναι δυνατό να μειωθούν με απευθείας χρήση αυτής της ενέργειας σε μονάδες αφαλάτωσης. Συνεπώς απαιτείται η εκπόνηση περαιτέρω ερευνών για την ανάπτυξη προσαρμοσμένων ηλιακών μονάδων παραγωγής ενέργειας για την υλοποίηση μιας ποικιλίας εφαρμογών αφαλάτωσης. Μια άλλη πρόκληση είναι η απόδοση και η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας των εμπορικά διαθέσιμων συσκευών και μονάδων ηλιακής ενέργειας. Επιπλέον, η απόδοση των συστημάτων ηλιακής ενέργειας επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις γεωγραφικές συνθήκες, επομένως είναι σημαντικό να εντοπιστούν οι κατάλληλες τοποθεσίες για μονάδες αφαλάτωσης, προκειμένου να αξιοποιηθεί στο έπακρο η ηλιακή ενέργεια.

Οι χώρες με μεγάλες ακτογραμμές, όπως η Ελλάδα, έχουν μεγάλες δυνατότητες για την παραγωγή κυματικής ενέργειας. Είναι πολύ σημαντικό να πραγματοποιηθεί μια ενδελεχής ανάλυση σκοπιμότητας πριν από την εγκατάσταση μιας μονάδας ενέργειας κυμάτων με βάση τη χωρική και χρονική

μεταβλητότητα της πηγής ισχύος. Η λειτουργία μονάδων αφαλάτωσης με κυματική ενέργεια μπορεί να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές CO².

Η εφαρμογή της γεωθερμικής ενέργειας για αφαλάτωση στερείται εμπορικής ανάπτυξης, και ως εκ τούτου υπάρχει πολύς χώρος για έρευνα και ανάπτυξη στο σχεδιασμό και τη διαμόρφωση αντίστοιχων συστημάτων. Απαιτούνται μελέτες για την ανάπτυξη και κλιμάκωση μονάδων αφαλάτωσης με γεωθερμική ενέργεια, που χρησιμοποιούν συμβατικές και αναδυόμενες τεχνολογίες.

Η τεχνολογία ύγρανσης-αφύγρανσης προσφέρει ορισμένα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά, που είναι κατάλληλα για την αιολική ενέργεια, συμπεριλαμβανομένου του απλού σχεδιασμού, της οικονομικά προσιτής τεχνολογίας, της συγκριτικά υψηλής απόδοσης σε σύγκριση και κυρίως, της δυνατότητας ενσωμάτωσης με ΑΠΕ χαμηλής θερμοκρασίας. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις της σύζευξης της διεπαφής της μονάδας αφαλάτωσης με την αιολική ενέργεια, ο σχεδιασμός, η διαμόρφωση, η βελτιστοποίηση της διαδικασίας και οι δομικοί περιορισμοί, καθώς και τα σχέδια εκτίμησης κόστους. Η επιλογή της κατάλληλης προσέγγισης στη διαχείριση της άλμης εξαρτάται ουσιαστικά από τον τύπο του νερού τροφοδοσίας και τη θέση της εγκατάστασης. Επίσης, είναι πολύ σημαντικό να αναπτύσσονται τακτικά σχέδια παρακολούθησης, ιδίως για μεθόδους με δυνητικές αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Τέλος, η τεχνητή νοημοσύνη (AI – Artificial Intelligence), αποτελεί μια αναδυόμενη προσέγγιση, η οποία λόγω της μεγάλης αποτελεσματικότητας και ακρίβειάς της, εφαρμόζεται για την βελτιστοποίηση και τον έλεγχο διεργασιών σε διαδικασίες αφαλάτωσης. Η εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης στην αφαλάτωση βασίζεται σε τέσσερα χαρακτηριστικά της: επάρκεια στη λήψη αποφάσεων, βελτιστοποίηση, πρόβλεψη και έλεγχος. Επί του παρόντος, η εφαρμογή εργαλείων AI δεν έχει οδηγήσει σε ένα πλήρες πλαίσιο και αρχιτεκτονική για τη διαδικασία σχεδιασμού της αφαλάτωσης. Οι αλγόριθμοι κλίνουν προς διαφορετικές επιδόσεις στην πρόβλεψη και τη βελτιστοποίηση, γεγονός που δημιουργεί ζητήματα. Ενδεχομένως, θα ήταν σημαντικό να τεθεί ένα πλαίσιο για την εφαρμογή τεχνητής νοημοσύνης στις διεργασίες αφαλάτωσης.

Βιβλιογραφία

- Abbasi, T., Premalatha, M., & Abbasi, S. A. (2011). The return to renewables: Will it help in Global Warming Control? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(1), 891–894. doi: 10.1016/j.rser.2010.09.048
- Ajanovic, A. (2011). Biofuels versus food production: Does biofuels production increase food prices? *Energy*, *36*(4), 2070–2076. doi: 10.1016/j.energy.2010.05.01
- Alawad, S. M., Mansour, R. B., Al-Sulaiman, F. A., & Rehman, S. (2023). Renewable Energy Systems for Water Desalination Applications: A comprehensive review. *Energy Conversion and Management*, *286*, 117035. doi: 10.1016/j.enconman.2023.117035
- Alcamo, J. M., Vörösmarty, C. J., Naiman, R. J., Lettenmaier, D. P., & Pahl-Wostl, C. (2008). A Grand Challenge for freshwater research: Understanding the global water system. *Environmental Research Letters*, *3*(1), 010202. doi: 10.1088/1748-9326/3/1/010202
- Alkaisi, A., Mossad, R., & Sharifian-Barforoush, A. (2017). A review of the water desalination systems integrated with Renewable Energy. *Energy Procedia*, *110*, 268–274. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.138
- Al-Karaghoul, A., & Kazmerski, L. L. (2013). Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *24*, 343–356. doi: 10.1016/j.rser.2012.12.064
- Alkudhiri, A., Darwish, N., & Hilal, N. (2012). Membrane distillation: A comprehensive review. *Desalination*, *287*, 2–18. doi: 10.1016/j.desal.2011.08.027
- Alnaimat, F., Klausner, J., & Mathew, B. (2018). Solar desalination. *Desalination and Water Treatment*. doi: 10.5772/intechopen.76981
- Al-Zubari, W., Al-Turbak, A., Zahid, W., Al-Ruwis, K., Al-Tkhais, A., Al-Muataz, I., Abdelwahab, A., Murad, A., Al-Harbi, M., & Al-Sulaymani, Z. (2017). An overview of the GCC Unified Water Strategy (2016-2035). *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, *81*, 1–18. doi: 10.5004/dwt.2017.20864
- Angelakis, A. N., Valipour, M., Choo, K. H., Ahmed, A. T., Baba, A., Kumar, R., Toor, G. S., & Wang, Z. (2021). Desalination: From Ancient to Present and Future. *Water*, *13*, 2222. doi: 10.3390/w13162222
- Armin Razmjoo, A., Sumper, A., & Davarpanah, A. (2019). Energy Sustainability Analysis based on sdgs for developing countries. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental*

Effects, 42(9), 1041–1056. doi: 10.1080/15567036.2019.1602215

- Asumadu-Sarkodie, S., & Owusu, P. A. (2017). The impact of Energy, agriculture, macroeconomic and human-induced indicators on environmental pollution: Evidence from Ghana. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(7), 6622–6633. doi: 10.1007/s11356-016-8321-6
- Bahar, R., Hawlader, M. N. A., & Woei, L. S. (2004). Performance evaluation of a mechanical vapor compression desalination system. *Desalination*, 166, 123–127. doi: 10.1016/j.desal.2004.06.066
- Ballesteros, E. (2004). Inter-basin water transfer public agreements: A decision approach to quantity and price. *Water Resources Management*, 18(1), 75–88. doi: 10.1023/b:warm.0000015390.39862.b9
- Banafe, A., & Macleod, R. (2017). Background to Saudi Arabia's financial challenges. *The Saudi Arabian Monetary Agency, 1952-2016*, 1-14. doi: 10.1007/978-3-319-55218-7_1
- Baños, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Gil, C., Alcayde, A., & Gómez, J. (2011). Optimization methods applied to renewable and Sustainable Energy: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1753–1766. doi: 10.1016/j.rser.2010.12.008
- Barbier, E. B. (2022). The economics of managing water crises. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 380(2238). doi: 10.1098/rsta.2021.0295
- Behzadi, A., Habibollahzade, A., Zare, V., & Ashjaee, M. (2019). Multi-objective optimization of a hybrid biomass-based SOFC/GT/double effect absorption chiller/ro desalination system with CO2 Recycle. *Energy Conversion and Management*, 181, 302–318. doi: 10.1016/j.enconman.2018.11.053
- Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2000). The history of renewable energies for water desalination. *Desalination*, 128(2), 147–159. doi: 10.1016/s0011-9164(00)00030-8
- Blagin, E. V., Shimanov, A. A., & Gorshkalev, A. A. (2019). Determination of the criteria for Comparative Analysis of Desalination Plant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 264, 012024. doi: 10.1088/1755-1315/264/1/012024
- Bleischwitz, R., Spataru, C., VanDeveer, S. D., Obersteiner, M., van der Voet, E., Johnson, C., Andrews-Speed, P., Boersma, T., Hoff, H., & van Vuuren, D. P. (2018). Resource Nexus Perspectives towards the United Nations Sustainable Development Goals. *Nature Sustainability*, 1(12), 737–743. doi: 10.1038/s41893-018-0173-2
- Borsani, R., & Rebagliati, S. (2005). Fundamentals and costing of MSF desalination plants and comparison with other technologies. *Desalination*, 182(1-3), 29-37. doi:10.1016/j.desal.2005.03.007
- Bourouni, K., Ben M'Barek, T., & Al Taei, A. (2011). Design and optimization of desalination reverse

- osmosis plants driven by renewable energies using genetic algorithms. *Renewable Energy*, 36(3), 936–950. doi: 10.1016/j.renene.2010.08.039
- Breitenmoser, L., Cuadrado Quesada, G., N, A., Bassi, N., Dkhar, N. B., Phukan, M., Kumar, S., Naga Babu, A., Kierstein, A., Campling, P., & Hooijmans, C. M. (2022). Perceived drivers and barriers in the governance of wastewater treatment and reuse in India: Insights from a two-round Delphi Study. *Resources, Conservation and Recycling*, 182, 106285. doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106285
- Breyer, C., Khalili, S., Bogdanov, D., Ram, M., Oyewo, A. S., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Solomon, A. A., Keiner, D., Lopez, G., Ostergaard, P. A., Lund, H., Mathiesen, B. V., Jacobson, M. Z., Victoria, M., Teske, S., Pregger, T., Fthenakis, V., Raugei, M., ... Sovacool, B. K. (2022). On the history and future of 100% Renewable Energy Systems Research. *IEEE Access*, 10, 78176–78218. doi: 10.1109/access.2022.3193402
- Bundschuh, J., Kaczmarczyk, M., Ghaffour, N., & Tomaszewska, B. (2021). State-of-the-art of renewable energy sources used in water desalination: Present and future prospects. *Desalination*, 508, 115035. doi: 10.1016/j.desal.2021.115035
- Carts-Powell, Y. (2007). Sustainable energy: Choosing among options (tester, J.W., et al.; 2005) [Book review]. *IEEE Technology and Society Magazine*, 26(99), 7–44. doi: 10.1109/mtas.2007.4384619
- Chen, J., Shi, H., Sivakumar, B., & Peart, M. R. (2016). Population, water, food, energy and dams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 18–28. doi: 10.1016/j.rser.2015.11.043
- Chew, N. G., Zhao, S., & Wang, R. (2019). Recent advances in membrane development for treating surfactant- and oil-containing feed streams via membrane distillation. *Advances in Colloid and Interface Science*, 273, 102022. doi: 10.1016/j.cis.2019.102022
- Cipollina, A., Micale, G., & Rizzuti, L. (2005). A critical assessment of desalination operations in Sicily. *Desalination*, 182(1–3), 1–12. doi: 10.1016/j.desal.2005.03.004
- Cipollina, A., Micale, G., Rizzuti, L., & Cipollina, A. (eds.) (2009). *Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes*. Berlin/Heidelberg: Springer.
- Climate ADAPT (2023). *Desalinisation*. Διαθέσιμο στο: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/adaptation-options/desalinisation> [τελευταία πρόσβαση 23.06.2023].
- Compain, P. (2012). Solar Energy for water desalination. *Procedia Engineering*, 46, 220–227. doi: 10.1016/j.proeng.2012.09.468
- Corkish, R., Lipiński, W., & Patterson, R. J. (2016). Introduction to solar energy. *Solar Energy*, 1–29. doi: 10.1142/9789814689502_0001

- Curto, D., Franzitta, V., & Guercio, A. (2021). A review of the Water Desalination Technologies. *Applied Sciences*, *11*(2), 670. doi: 10.3390/app11020670
- D'Odorico, P., Carr, J., Dalin, C., Dell'Angelo, J., Konar, M., Laio, F., Ridolfi, L., Rosa, L., Suweis, S., Tamea, S., & Tuninetti, M. (2019). Global Virtual Water Trade and the hydrological cycle: Patterns, drivers, and socio-environmental impacts. *Environmental Research Letters*, *14*(5), 053001. doi: 10.1088/1748-9326/ab05f4
- Daghari, I., El Zarroug, M. R., Muanda, C., Kompany, J. R., Kanzari, S., & Mimoun, A. B. (2020). Feasibility of water desalination for irrigation: The case of the coastal irrigated area of Dyyar-al-Hujjej, Tunisia. *Water Supply*, *21*(1), 24-45. doi:10.2166/ws.2020.218
- Demetropoulou, L., Lilli, M. A., Petousi, I., Nikolaou, T., Fountoulakis, M., Kritsotakis, M., Panakoulia, S., Giannakis, G. V., Manios, T., & Nikolaidis, N. P. (2019). Innovative methodology for the prioritization of the program of measures for Integrated Water Resources Management of the region of Crete, Greece. *Science of the Total Environment*, *672*, 61–70. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.397
- Di Baldassarre, G., Wanders, N., AghaKouchak, A., Kuil, L., Rangelcroft, S., Veldkamp, T. I., Garcia, M., van Oel, P. R., Breinl, K., & Van Loon, A. F. (2018). Water shortages worsened by reservoir effects. *Nature Sustainability*, *1*(11), 617–622. doi: 10.1038/s41893-018-0159-0
- Döll, P., Fiedler, K., & Zhang, J. (2009). Global-scale analysis of river flow alterations due to water withdrawals and reservoirs. *Hydrology and Earth System Sciences*, *13*(12), 2413–2432. doi: 10.5194/hess-13-2413-2009
- Droogers, P., Immerzeel, W. W., Terink, W., Hoogeveen, J., Bierkens, M. F., Van Beek, L. P., & Debele, B. (2012). Water resources trends in Middle East and North Africa towards 2050. *Hydrology and Earth System Sciences*, *16*(9), 3101-3114. doi:10.5194/hess-16-3101-2012
- Duranay, M., Turmus, A., & Tanyildizi, V. (2021). Experimental Efficiency Analysis of a solar panel electricity generation system using Planar Reflection. *IET Renewable Power Generation*, *15*(3), 521–531. doi: 10.1049/rpg2.12012
- Edenhofer, O. , Pichs-Madruga, R. , Sokona, Y. , Seyboth, K. , Matschoss, P. , Kadner, S. , ... von Stechow, C. (2011). *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9781139151153
- Egbueri, J. C., & Agbasi, J. C. (2022). Data-driven soft computing modeling of groundwater quality parameters in southeast Nigeria: Comparing the performances of different algorithms. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(25), 38346–38373. doi: 10.1007/s11356-022-18520-8

- Elavarasan, R. M. (2019). The motivation for renewable energy and its comparison with other energy sources: A Review. *European Journal of Sustainable Development Research*, 3(1). doi: 10.20897/ejosdr/4005
- El-Dessouky, H. T., & Ettouney, H. M. (2002). Multi-stage flash desalination. *Fundamentals of Salt Water Desalination*, 271–407. doi: 10.1016/b978-044450810-2/50008-7
- El-Ghonemy, A. M. K. (2018). Performance test of a sea water multi-stage flash distillation plant: Case study. *Alexandria Engineering Journal*, 57(4), 2401–2413. doi: 10.1016/j.aej.2017.08.019
- Eltawil, M. A., Zhengming, Z., & Yuan, L. (2008). Renewable energy powered desalination systems: Technologies and economics-state of the art. In *Twelfth International Water Technology Conference, IWTC12* (pp. 1099-1136). Alexandria, Egypt.
- Esteban, M., & Leary, D. (2012). Current developments and future prospects of offshore wind and Ocean Energy. *Applied Energy*, 90(1), 128–136. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.06.011
- Evans, A. E., Mateo-Sagasta, J., Qadir, M., Boelee, E., & Ippolito, A. (2019). Agricultural Water Pollution: Key knowledge gaps and research needs. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 36, 20–27. doi: 10.1016/j.cosust.2018.10.003
- Famiglietti, J. S. (2014). The Global Groundwater Crisis. *Nature Climate Change*, 4(11), 945–948. doi: 10.1038/nclimate2425
- Fiorenza, G., Sharma, V., & Braccio, G. (2003). Techno-economic evaluation of a solar powered water desalination plant. *Energy Conversion and Management*, 44(14), 2217-2240. doi:10.1016/s0196-8904(02)00247-9
- Førsund, F. R. (2015). Hydropower economics. *International Series in Operations Research & Management Science*. doi: 10.1007/978-1-4899-7519-5
- Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., & Melin, T. (2007). State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination*, 216(1–3), 1–76. doi: 10.1016/j.desal.2006.12.009
- Ganora, D., Dorati, C., Huld, T. A., Udias, A., & Pistocchi, A. (2019). An assessment of energy storage options for large-scale PHOTOVOLTAICS-ro desalination in the extended Mediterranean Region. *Scientific Reports*, 9(1).
- García-Rodríguez, L. (2002). Seawater desalination driven by renewable energies: A Review. *Desalination*, 143(2), 103–113. doi: 10.1016/s0011-9164(02)00232-1
- Gaupp, F., Hall, J., & Dadson, S. (2015). The role of storage capacity in coping with intra- and inter-annual water variability in large river basins. *Environmental Research Letters*, 10(12), 125001. doi: 10.1088/1748-9326/10/12/125001

- Ghaffour, N., Bundschuh, J., Mahmoudi, H., & Goosen, M. F. (2015). Renewable energy-driven desalination technologies: A comprehensive review on challenges and potential applications of Integrated Systems. *Desalination*, 356, 94-114. doi:10.1016/j.desal.2014.10.024
- Ghaffour, N., Missimer, T. M., & Amy, G. L. (2013). Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability. *Desalination*, 309, 197–207. doi: 10.1016/j.desal.2012.10.015
- Ghanim, A. (2019). Water Resources Crisis in Saudi Arabia, Challenges and Possible Management Options: An Analytic Review. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, 13(2), pp. 51-56.
- Gillespie, D. (2007). Unwanted fertility among the Poor: An Inequity? *Bulletin of the World Health Organization*, 85(2), 100–107. <https://doi.org/10.2471/blt.06.033829>
- Gleick, P. H., & Palaniappan, M. (2010). Peak water limits to freshwater withdrawal and use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(25), 11155–11162. doi: 10.1073/pnas.1004812107
- Global Commission on the Economics of Water (2023). *The What, Why and How of the World Water Crisis*. Paris: OECD. Διαθέσιμο στο: <https://watercommission.org/wp-content/uploads/2023/03/Why-What-How-of-Water-Crisis-Web.pdf> [τελευταία πρόσβαση 01.02.2023].
- Global Water Partnership (2021). *Storing water: A new integrated approach for resilient development*. Stockholm: Global Water Partnership. Διαθέσιμο στο: <https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/perspective-papers/perspective-paper-on-water-storage.pdf> [τελευταία πρόσβαση 23.03.2023].
- Gohari, A., Eslamian, S., Mirchi, A., Abedi-Koupaei, J., Massah Bavani, A., & Madani, K. (2013). Water transfer as a solution to water shortage: A fix that can backfire. *Journal of Hydrology*, 491, 23–39. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.03.021
- Goosen, M. F., Mahmoudi, H., & Ghaffour, N. (2014). Today's and future challenges in applications of renewable energy technologies for desalination. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(9), 929-999. doi:10.1080/10643389.2012.741313
- Greiter, M., Novalin, S., Wendland, M., Kulbe, K.-D., & Fischer, J. (2004). Electrodialysis versus Ion Exchange: Comparison of the cumulative energy demand by means of two applications. *Journal of Membrane Science*, 233(1–2), 11–19. doi: 10.1016/j.memsci.2003.11.027
- Gupta, J., & Lebel, L. (2020). Access and allocation in Earth System Governance: Lessons learnt in the context of the Sustainable Development Goals. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 20(2), 393–410. doi: 10.1007/s10784-020-09486-4

- Gwenzi, W., Dunjana, N., Pisa, C., Tauro, T., & Nyamadzawo, G. (2015). Water quality and public health risks associated with roof rainwater harvesting systems for potable supply: Review and Perspectives. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 6, 107–118. doi: 10.1016/j.swaqe.2015.01.006
- Ha, M., & Schleiger, R. (2020). *Water Scarcity and Solutions*. Διαθέσιμο στο: [https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Ecology/Environmental_Science_\(Ha_and_Schleiger\)/04%3A_Humans_and_the_Environment/4.02%3A_Water_Resources/4.2.03%3A_Water_Scarcity_and_Solutions](https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Ecology/Environmental_Science_(Ha_and_Schleiger)/04%3A_Humans_and_the_Environment/4.02%3A_Water_Resources/4.2.03%3A_Water_Scarcity_and_Solutions) [τελευταία πρόσβαση 23.03.2023].
- Hák, T., Janoušková, S., & Moldan, B. (2016). Sustainable development goals: A need for relevant indicators. *Ecological Indicators*, 60, 565–573. doi: 10.1016/j.ecolind.2015.08.003
- Hassan Rashid, M. A., Manzoor, M. M., & Mukhtar, S. (2018). Urbanization and its effects on Water Resources: An exploratory analysis. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 15(1), 67–74. doi: 10.3233/ajw-180007
- Helfer, F., Lemckert, C., & Anissimov, Y. G. (2014). Osmotic power with pressure retarded osmosis: Theory, performance and trends – A Review. *Journal of Membrane Science*, 453, 337–358. doi: 10.1016/j.memsci.2013.10.053
- Hobbie, S. E., Finlay, J. C., Janke, B. D., Nidzgorski, D. A., Millet, D. B., & Baker, L. A. (2017). Contrasting nitrogen and phosphorus budgets in urban watersheds and implications for managing urban water pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(16), 4177–4182. doi: 10.1073/pnas.1618536114
- Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2006). Water Footprints of Nations: Water Use by people as a function of their consumption pattern. *Integrated Assessment of Water Resources and Global Change*, 35–48. doi: 10.1007/978-1-4020-5591-1_3
- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(9), 3232–3237. doi: 10.1073/pnas.1109936109
- Hossam-Eldin, A., El-Nashar, A. M., & Ismaiel, A. (2012). Investigation into economical desalination using optimized hybrid renewable energy system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43(1), 1393–1400. doi: 10.1016/j.ijepes.2012.05.019
- Huang, L., Jiang, H., Wang, Y., Ouyang, Z., Wang, W., Yang, B., Liu, H., & Hu, X. (2020). Enhanced water yield of solar desalination by thermal concentrated multistage distiller. *Desalination*, 477, 114260.
- Hutchinson, C. F., Varady, R. G., & Drake, S. (2009). Old and new: Changing paradigms in arid lands water management. *Water and Sustainability in Arid Regions*, 311–332. doi: 10.1007/978-90-481-

- IRENA (2020). *Fostering a blue economy: Offshore renewable energy*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Ismail, Z., & Go, Y. I. (2021). Fog-to-water for water scarcity in climate-change hazards hotspots: Pilot study in Southeast Asia. *Global Challenges*, 5(5), 2000036. doi: 10.1002/gch2.202000036
- Itagroup.gr (2021). *Milo's Desalination*. Διαθέσιμο στο: <https://itagroup.gr/en/milo-s-desalination/> [τελευταία πρόσβαση 23.06.2023].
- Jin, Y., Behrens, P., Tukker, A., & Scherer, L. (2019). Water use of electricity technologies: A global meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109391. doi: 10.1016/j.rser.2019.109391
- Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T. H., Smakhtin, V., & Kang, S. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of The Total Environment*, 657, 1343–1356. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.076
- Jury, W. A., & Vaux, H. (2005). The role of science in solving the world's emerging water problems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(44), 15715–15720. doi: 10.1073/pnas.0506467102
- Karagiannis, I. C., & Soldatos, P. G. (2007). Current status of water desalination in the Aegean Islands. *Desalination*, 203(1–3), 56–61. doi: 10.1016/j.desal.2006.04.006
- Karagiannis, I. C., & Soldatos, P. G. (2008). Water desalination cost literature: Review and assessment. *Desalination*, 223(1–3), 448–456. doi: 10.1016/j.desal.2007.02.071
- Kartalidis, A., Tzen, E., Kampragkou, E., & Assimacopoulos, D. (2015). Responding to water challenges in Greece through desalination: Energy Considerations. *International Journal of Water Resources Development*, 32(3), 428–441. doi: 10.1080/07900627.2015.1091290
- Katic, P., & Grafton (2023). *Towards Operationalising the Water-Energy-Food Nexus (Technical Report)*. Paris: Global Commission on the Economics of Water.
- Kaygusuz, K. (2012). Energy for Sustainable Development: A case of developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1116–1126. doi: 10.1016/j.rser.2011.11.013
- Kayode Agboola, A. (2014). Public sensitisation on the adoption of renewable energy in Nigeria: Communicating the way forward. *IOSR Journal of Humanities and Social Science*, 19(5), 74–81. doi: 10.9790/0837-19547481
- Kennewell, J., & McDonald, A. (2015). *The Solar Constant*. Διαθέσιμο στο: <http://www.ips.gov.au/Educational/2/1/12> [τελευταία πρόσβαση 23.03.2023].

- Keskar, V.N. (2013). Electricity Generation Using Solar Power. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2(2), 1-5.
- Koroneos, C., Dompros, A., & Roubas, G. (2007). Renewable Energy Driven Desalination Systems modelling. *Journal of Cleaner Production*, 15(5), 449–464. doi: 10.1016/j.jclepro.2005.07.017
- Koutroulis, E., Petrakis, G., Agou, V., Malisovas, A., Hristopulos, D., Partsinevelos, P., Tripolitsiotis, A., Halouani, N., Ailliot, P., Boutigny, M., Monbet, V., Allard, D., Cuzol, A., Kolokotsa, D., Varouchakis, E., Kokolakis, K., & Mertikas, S. (2021). Site selection and system sizing of desalination plants powered with renewable energy sources based on a web-GIS platform. *International Journal of Energy Sector Management*, 16(3), 469–492. doi: 10.1108/ijesm-04-2021-0018
- Kuddus, M. A., Tynan, E., & McBryde, E. (2020). Urbanization: A problem for the rich and the poor? *Public Health Reviews*, 41(1). doi: 10.1186/s40985-019-0116-0
- Kujawa, J., Cerneaux, S., Kujawski, W., & Knozowska, K. (2017). Hydrophobic ceramic membranes for water desalination. *Applied Sciences*, 7(4), 402. doi: 10.3390/app7040402
- Kusumadewi, R. A., Wijayanti, Y., & Fittkow, M. (2021). Saline water desalination using solar energy: Performance Analysis and Implementation Barriers. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 894(1), 012020. doi: 10.1088/1755-1315/894/1/012020
- Kyriakarakos, G., Papadakis, G., & Karavitis, C. A. (2022). Renewable energy desalination for island communities: Status and future prospects in Greece. *Sustainability*, 14(13), 8176. doi:10.3390/su14138176
- Kyriakarakos, G., Papadakis, G., & Karavitis, C. A. (2022). Renewable energy desalination for island communities: Status and future prospects in Greece. *Sustainability*, 14(13), 8176. doi: 10.3390/su14138176
- Lakatos, L., Hevessy, G., & Kovács, J. (2011). Advantages and disadvantages of solar energy and wind-power utilization. *World Futures*, 67(6), 395–408. doi: 10.1080/02604020903021776
- Landrigan, P. J., Stegeman, J. J., Fleming, L. E., Allemand, D., Anderson, D. M., Backer, L. C., Brucker-Davis, F., Chevalier, N., Corra, L., Czerucka, D., Bottein, M.-Y. D., Demeneix, B., Depledge, M., Deheyn, D. D., Dorman, C. J., Fénichel, P., Fisher, S., Gaill, F., Galgani, F., ... Rampal, P. (2020). Human health and ocean pollution. *Annals of Global Health*, 86(1), 151. doi: 10.5334/aogh.2831
- Lattemann, S., & Höpner, T. (2008). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination*, 220(1–3), 1–15. doi: 10.1016/j.desal.2007.03.009
- Lehmann, M., Karimpour, F., Goudey, C. A., Jacobson, P. T., & Alam, M.-R. (2017). Ocean Wave Energy in the United States: Current status and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy*

Reviews, 74, 1300–1313. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.101

- Li, C., Goswami, Y., & Stefanakos, E. (2013). Solar Assisted Sea Water Desalination: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 136–163. doi: 10.1016/j.rser.2012.04.059
- Ling, T. (2022). A global study about water crisis. *Advances in Social Science, Education and Humanities Research*. doi: 10.2991/assehr.k.220105.148
- Lotfy, H. R., Staš, J., & Roubík, H. (2022). Renewable energy powered membrane desalination - review of recent development. *Environmental science and pollution research international*, 29(31), 46552–46568.
- Lu, Y., Nakicenovic, N., Visbeck, M., & Stevance, A.-S. (2015). Policy: Five priorities for the UN Sustainable Development Goals. *Nature*, 520(7548), 432–433. doi: 10.1038/520432a
- Lund, J. W., Freeston, D. H., & Boyd, T. L. (2011). Direct utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review. *Geothermics*, 40(3), 159–180. doi: 10.1016/j.geothermics.2011.07.004
- Ma, Q., & Lu, H. (2011). Wind Energy Technologies integrated with desalination systems: Review and state-of-the-art. *Desalination*, 277(1–3), 274–280. doi: 10.1016/j.desal.2011.04.041
- Macedo, Y. M., Troleis, A. L., & de Almeida, L. Q. (2022). *Water Shortage: Assessment and Analysis on a Regional Scale*. doi: 10.5194/nhess-2022-86
- Maia, C. B., Silva, F. V. M., Oliveira, V. L. C., & Kazmerski, L. L. (2019). An overview of the use of solar chimneys for desalination. *Solar Energy*, 183, 83–95. doi: 10.1016/j.solener.2019.03.007
- Malisovas, A., & Koutroulis, E. (2020). Design optimization of RES-based desalination systems cooperating with smart grids. *IEEE Systems Journal*, 14(4), 4706–4717. doi: 10.1109/jsyst.2020.2968842
- Maradin, D. (2021). Advantages and disadvantages of renewable energy sources utilization. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 11(3), 176–183. doi: 10.32479/ijeeep.11027
- Marchioni, M., Raimondi, A., Di Chiano, M. G., Sanfilippo, U., Mambretti, S., & Becciu, G. (2023). Costs-benefit analysis for the use of shallow groundwater as non-conventional water resource. *Water Resources Management*, 37(5), 2125–2142. doi: 10.1007/s11269-023-03483-3
- Marimuthu, T., Mekbib At naw, S., Mardarveran, P., Shu Yi, S., Binti Usop, M. A., Bin Gapar, M. K., Binti Rusdan, S. A., Binti M Ramli, R., & Sulaiman, S. A. (2017). Design and development of Solar Desalination Plant. *MATEC Web of Conferences*, 131, 02004. doi: 10.1051/mateconf/201713102004
- Mekonnen, M. M., & Gerbens-Leenes, W. (2020). The water footprint of Global Food Production. *Water*, 12(10), 2696. doi: 10.3390/w12102696

- Mentis, D., Karalis, G., Zervos, A., Howells, M., Taliotis, C., Bazilian, M., & Rogner, H. (2016). Desalination using renewable energy sources on the arid islands of South Aegean Sea. *Energy*, *94*, 262–272. doi: 10.1016/j.energy.2015.11.003
- Mirza, S. (2008). Reduction of energy consumption in process plants using nanofiltration and reverse osmosis. *Desalination*, *224*(1–3), 132–142. doi: 10.1016/j.desal.2007.04.084
- Mohammad, A. W., Teow, Y. H., Ang, W. L., Chung, Y. T., Oatley-Radcliffe, D. L., & Hilal, N. (2015). Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects. *Desalination*, *356*, 226–254. doi: 10.1016/j.desal.2014.10.043
- Mohammadi, F., Sahraei-Ardakani, M., Al-Abdullah, Y., & Heydt, G. T. (2020). Cost-benefit analysis of desalination: A power market opportunity. *Electric Power Components and Systems*, *48*(11), 1091–1101. doi: 10.1080/15325008.2020.1829188
- Mohanty, A., & Wadhawan, S. (2021). Mapping India's Climate Vulnerability: A District-Level Assessment. New Delhi: Council on Energy, Environment and Water. Διαθέσιμο στο: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212420919309537> [τελευταία πρόσβαση 11.02.2023].
- Molle, F., López-Gunn, E., & van Steenberg, F. (2018). The local and national politics of groundwater overexploitation. *Water Alternatives*, *11*(3), 445–457.
- Muller, M., Biswas, A., Martin-Hurtado, R., & Tortajada, C. (2015). Built infrastructure is essential. *Science*, *349*(6248), 585–586. doi: 10.1126/science.aac7606
- Nair, M., & Kumar, D. (2013). Water desalination and challenges: The middle east perspective: A Review. *Desalination and Water Treatment*, *51*(10–12), 2030–2040. doi: 10.1080/19443994.2013.734483
- Nassar, N., & Tvaronavičienė, M. (2021). A systematic theoretical review on sustainable management for Green Competitiveness. *Insights into Regional Development*, *3*(2), 267–281. doi: 10.9770/ird.2021.3.2(7)
- Nassrullah, H., Anis, S. F., Hashaikeh, R., & Hilal, N. (2020). Energy for desalination: A state-of-the-art review. *Desalination*, *491*, 114569. doi: 10.1016/j.desal.2020.114569
- Neha, & Joon, R. (2021). Renewable energy sources: A Review. *Journal of Physics: Conference Series*, *1979*(1), 012023. doi: 10.1088/1742-6596/1979/1/012023
- Okampo, E. J., & Nwulu, N. (2021). Optimisation of renewable energy powered reverse osmosis desalination systems: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *140*, 110712. doi:10.1016/j.rser.2021.110712
- Owusu, P. A., & Asumadu-Sarkodie, S. (2016). A review of renewable energy sources, sustainability

issues and climate change mitigation. *Cogent Engineering*, 3(1), 1167990. doi: 10.1080/23311916.2016.1167990

Perry, C. J., Allen, R., Droogers, P., Kilic, A., & Grafton R. Q. (2023). *Water Consumption, Measurements and Sustainable Water Use (Technical Report)*. Paris: Global Commission on the Economics of Water. Διαθέσιμο στο: <https://www.waterjusticehub.org/water-consumption-measurements-and-sustainable-water-use/> [τελευταία πρόσβαση 23.03.2023].

Petrakis, G., Tripolitsiotis, A., Koutroulis, E., Hristopulos, D., Halouani, N., Naceur, A. B., & Partsinevelos, P. (2020). Geo-Informatics for optimal design of desalination plants using renewable energy sources: The DES2iRES Platform Paradigm. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(19). doi: 10.1007/s12517-020-06026-x

Pietrasanta, A. M., Shaaban, M. F., Aguirre, P. A., Mussati, S. F., & Hamouda, M. A. (2023). Simulation and Optimization of Renewable Energy-Powered Desalination: A Bibliometric Analysis and Highlights of Recent Research. *Sustainability*, 15(12), 9180.

Pokhrel, Y., Felfelani, F., Satoh, Y., Boulange, J., Burek, P., Gädeke, A., Gerten, D., Gosling, S. N., Grillakis, M., Gudmundsson, L., Hanasaki, N., Kim, H., Koutroulis, A., Liu, J., Papadimitriou, L., Schewe, J., Müller Schmied, H., Stacke, T., Telteu, C.-E., ... Wada, Y. (2021). Global terrestrial water storage and drought severity under climate change. *Nature Climate Change*, 11(3), 226–233. doi: 10.1038/s41558-020-00972-w

Quandt, A., O’Shea, B., Oke, S., & Ololade, O. O. (2022). Policy interventions to address water security impacted by climate change: Adaptation strategies of three case studies across different geographic regions. *Frontiers in Water*, 4. doi: 10.3389/frwa.2022.935422

Rammelt, C. F., Gupta, J., Liverman, D., Scholtens, J., Ciobanu, D., Abrams, J. F., Bai, X., Gifford, L., Gordon, C., Hurlbert, M., Inoue, C. Y., Jacobson, L., Lade, S. J., Lenton, T. M., McKay, D. I., Nakicenovic, N., Okereke, C., Otto, I. M., Pereira, L. M., ... Zimm, C. (2022). Impacts of meeting minimum access on Critical Earth systems amidst the great inequality. *Nature Sustainability*, 6(2), 212–221. doi: 10.1038/s41893-022-00995-5

REN21 (2016). *The First Decade: 2004 – 2014*. Paris: REN21. Διαθέσιμο στο: https://www.ren21.net/Portals/0/documents/activities/Topical%20Reports/REN21_10yr.pdf [τελευταία πρόσβαση 01.02.2023].

Rising, J., Josset, L., Troy, T., & Lall, U. (2022). The importance of infrastructure and national demand to represent constraints on water supply in the United States. *Global Environmental Change*, 73, 102468. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2022.102468

Sahoo, U., Kumar, R., Pant, P. C., & Chaudhary, R. (2017). Development of an innovative polygeneration process in hybrid solar-biomass system for combined power, cooling and desalination. *Applied*

Thermal Engineering, 120, 560–567. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.034

- Satoh, Y., Yoshimura, K., Pokhrel, Y., Kim, H., Shiogama, H., Yokohata, T., Hanasaki, N., Wada, Y., Burek, P., Byers, E., Schmied, H. M., Gerten, D., Ostberg, S., Gosling, S. N., Boulange, J. E., & Oki, T. (2022). The timing of unprecedented hydrological drought under climate change. *Nature Communications*, 13(1). doi: 10.1038/s41467-022-30729-2
- Sharon, H., & Reddy, K. S. (2015). A review of Solar Energy Driven Desalination Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1080–1118. doi: 10.1016/j.rser.2014.09.002
- Shatat, M., & Riffat, S. B. (2012). Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 9(1), 1–19. doi: 10.1093/ijlct/cts025
- Shatat, M., Riffat, S. and Ghabayen, S. (2012),. State of Art Water Desalination Technologies using Conventional and Sustainable Energy Sources. In *The 4th International Engineering Conference–Towards Engineering of the 21st Century; IEC: Geneve, Switzerland*, pp. 1–16.
- Shouman, E., Sorour, M., & Abulnour, A. (2016). Economics of Renewable Energy for water desalination in developing countries. *International Journal of Economics & Management Sciences*, 05(01). doi: 10.4172/2162-6359.1000305
- Sindhu, S., Nehra, V., & Luthra, S. (2016). Identification and analysis of barriers in implementation of solar energy in Indian rural sector using integrated ISM and Fuzzy Micmac approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 70–88. doi: 10.1016/j.rser.2016.04.033
- Sommariva, C., Hogg, H., & Callister, K. (2003). Cost reduction and design lifetime increase in thermal desalination plants: Thermodynamic and corrosion resistance combined analysis for heat exchange tubes material selection. *Desalination*, 158(1-3), 17-21. doi:10.1016/s0011-9164(03)00427-2
- Srinivasan, V., Lambin, E. F., Gorelick, S. M., Thompson, B. H., & Rozelle, S. (2012). The nature and causes of the global water crisis: Syndromes from a meta-analysis of coupled human-water studies. *Water Resources Research*, 48(10). doi: 10.1029/2011wr011087
- Strielkowski, W., Civín, L., Tarkhanova, E., Tvaronavičienė, M., & Petrenko, Y. (2021). Renewable energy in the Sustainable Development of Electrical Power Sector: A Review. *Energies*, 14(24), 8240. doi: 10.3390/en14248240
- Subiela, V. J., Peñate, B., & García-Rodríguez, L. (2020). Design recommendations and cost assessment for non-stop off-grid plants of seawater desalination based on PHOTOVOLTAICS-driven with wind/diesel energy backup. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 181, 80–100. doi: 10.5004/dwt.2020.25091

- Suleiman, L., Olofsson, B., Saurí, D., & Palau-Rof, L. (2020). A breakthrough in urban rain-harvesting schemes through planning for Urban Greening: Case Studies from Stockholm and Barcelona. *Urban Forestry & Urban Greening*, *51*, 126678. doi: 10.1016/j.ufug.2020.126678
- Talaeipour, M., Nouri, J., Hassani, A. H., & Mahvi, A. H. (2017). An investigation of desalination by nanofiltration, reverse osmosis and integrated (hybrid NF/RO) membranes employed in brackish water treatment. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, *15*(1). doi: 10.1186/s40201-017-0279-x
- Tenno, R., & Nguyen, P. (2016). Multistage flash evaporator control in PDE representation. *IFAC-PapersOnLine*, *49*(24), 70–75. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.10.757
- Trieb, F., & Müller-Steinhagen, H. (2008). Concentrating solar power for seawater desalination in the Middle East and North Africa. *Desalination*, *220*(1–3), 165–183. doi: 10.1016/j.desal.2007.01.030
- Twidell, J. (2021). *Renewable energy resources*. Routledge.
- Tzanakakis, V. A., Paranychianakis, N. V., & Angelakis, A. N. (2020). Water Supply and Water Scarcity. *Water*, *12*(9), 9, 685. doi:10.3390/w12092347. 2020
- Tzen, E. (2003). *Desalting Handbook for Planners, 3rd Edition*. Athens: Bureau of Reclamation, Water Treatment Engineering and Research Group. Διαθέσιμο στο: <http://www.cres.gr/kape/publications/xrisima.htm> [τελευταία πρόσβαση 23.03.2023].
- Ucal, M., & Xydis, G. (2020). Multidirectional relationship between energy resources, climate changes and Sustainable Development: Technoeconomic analysis. *Sustainable Cities and Society*, *60*, 102210. doi: 10.1016/j.scs.2020.102210
- UNEP (2019). *Progress on Integrated Water Resources Management: Global Baseline for SDG 6 Indicator 6.5.1 - Degree of IWRM Implementation*. Nairobi: United Nations Environment Programme. Διαθέσιμο στο: www.unep.org/resources/report/progress-integrated-water-resources-management-global-baseline-sdg-6-indicator-0 [τελευταία πρόσβαση 01.02.2023].
- UNFCCC (2015). *Adoption of the Paris Agreement*. Διαθέσιμο στο: https://www.ren21.net/Portals/0/documents/activities/Topical%20Reports/REN21_10yr.pdf [τελευταία πρόσβαση 01.02.2023].
- Voivontas, D., Misirlis, K., Manoli, E., Arampatzis, G., & Assimacopoulos, D. (2001). A tool for the design of desalination plants powered by renewable energies. *Desalination*, *133*(2), 175–198. doi: 10.1016/s0011-9164(01)00096-0
- Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. B. (2000). Global Water Resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science*, *289*(5477), 284–288. doi: 10.1126/science.289.5477.284

- Wada, Y., van Beek, L. P., & Bierkens, M. F. (2012). Nonsustainable groundwater sustaining irrigation: A global assessment. *Water Resources Research*, 48(6). doi: 10.1029/2011wr010562
- Wittholz, M. K., O'Neill, B. K., Colby, C. B., & Lewis, D. (2008). Estimating the cost of desalination plants using a cost database. *Desalination*, 229(1–3), 10–20. doi: 10.1016/j.desal.2007.07.023
- World Bank (2019). *The role of desalination in an increasingly water-scarce world*. Washington, DC, USA: World Bank.
- Wu, M., Li, Y., Guo, L., & Cai, C. (2018). Coordinated optimal operation of photovoltaic Generation with Cascade Small Hydropower Generation. 2018 Chinese Automation Congress (CAC). doi: 10.1109/cac.2018.8623647
- Xu, T. (2005). Ion Exchange Membranes: State of their development and perspective. *Journal of Membrane Science*, 263(1–2), 1–29. doi: 10.1016/j.memsci.2005.05.002
- Yannopoulos, S., Giannopoulou, I., & Kaiafa-Saropoulou, M. (2019). Investigation of the current situation and prospects for the development of rainwater harvesting as a tool to confront water scarcity worldwide. *Water*, 11(10), 2168. doi: 10.3390/w11102168
- Zhang, H., & Xu, H. (2021). Investigation and research on the status quo of informatization development at home and abroad. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 692(2), 022040. doi: 10.1088/1755-1315/692/2/022040
- Zhang, H., & Xu, H. (2021). Investigation and research on the status quo of informatization development at home and abroad. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 692(2), 022040. doi: 10.1088/1755-1315/692/2/022040
- Zimmermann, A., Benda, J., Webber, H., & Jafari, Y. (2018). *FAO's Work on Climate Change : United Nations Climate Change Conference 2018 / Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*. doi: 10.29171/azu_acku_pamphlet_qc903_w675_2018
- Zisopoulou, K., & Panagoulia, D. (2021). An in-depth analysis of physical blue and green water scarcity in agriculture in terms of causes and events and perceived amenability to economic interpretation. *Water*, 13(12), 1693. doi: 10.3390/w13121693
- Zotalis, K., Dialynas, E., Mamassis, N., & Angelakis, A. (2014). Desalination Technologies: Hellenic experience. *Water*, 6(5), 1134–1150. doi: 10.3390/w6051134