



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

## **ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΝΟΣ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΝΗΣΙ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ**



## **ΔΑΠΟΝΤΑ ΧΡΥΣΟΒΑΛΑΝΤΗ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ**  
**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΑΡ. ΔΙΠΛ. : 49**

**ΧΑΝΙΑ 2015**

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>1. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....</b>	<b>6</b>
1.1 Εισαγωγή .....	6
1.2 Ηλιακή ενέργεια .....	6
1.2.1 Ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα .....	6
1.2.2 Φωτοβολταϊκά πάνελ .....	7
1.2.3 Τύποι φωτοβολταϊκών τεχνολογιών .....	7
1.3 Βιομάζα .....	8
1.4 Αιολική ενέργεια .....	8
1.4.1 Ανεμογεννήτριες .....	8
1.5 Γεωθερμική ενέργεια .....	8
1.6 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας από τον ωκεανό .....	9
1.7 Κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των διαφορετικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας .....	9
1.8 Αποδόσεις των διαφορετικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας .....	9
1.9 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας .....	10
1.9.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις φωτοβολταϊκών .....	10
1.9.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις βιομάζας .....	11
1.9.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις αιολικής ενέργειας .....	11
1.9.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις γεωθερμικής ενέργειας .....	11
1.9.5 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη μετατροπή της θαλάσσιας θερμικής ενέργειας .....	12
1.9.6 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις μονάδων κυματικής ενέργειας .....	12
1.9.7 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις παλιρροϊκής ενέργειας .....	12
<b>2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ .....</b>	<b>13</b>
2.1 Εισαγωγή .....	13
2.2 Διεργασίες θερμικής απόσταξης .....	13
2.2.1 Απόσταξη πολλαπλής φάσης .....	14
2.2.2 Εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης .....	15
2.3 Συμπίεση ατμού .....	16
2.3.1 Μηχανική συμπίεση ατμού .....	16
2.4 Ηλεκτροδιάλυση .....	17
2.4.1 Αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση .....	18
2.5 Απόσταξη μεμβρανών .....	18
2.6 Τεχνολογίες διαχωρισμού μεμβρανών .....	19
2.6.1 Αντίστροφη όσμωση .....	20
2.6.1.1 Μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης .....	21
2.7 Ανταλλαγή ιόντων .....	22

2.8 Νανοφιλτράρισμα .....	22
2.9 Αφαλάτωση με ψύξη.....	23
2.10 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα των διαφορετικών διαδικασιών αφαλάτωσης .....	23
2.11 Ενεργειακή κατανάλωση των διαφορετικών τεχνολογιών αφαλάτωσης .....	25
2.12 Κόστος διαδικασιών αφαλάτωσης.....	26
2.12.1 Μοναδιαίο κόστος παραγωγής πόσιμου νερού μέσω των διαφορετικών τεχνολογιών αφαλάτωσης .....	27
2.13 Πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των διαδικασιών αφαλάτωσης .....	28
2.13.1 Επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον .....	28
2.13.1.1 Σύνθεση της απορριπτόμενης άλμης.....	28
2.13.1.2 Διασπορά των συγκεντρωμένων αλάτων .....	28
2.13.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μονάδων απόσταξης πολλαπλής φάσης .....	29
2.13.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μονάδων εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης .....	29
2.13.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μονάδων αντίστροφης όσμωσης.....	30
<b>3. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ .....</b>	<b>32</b>
3.1 Συνδυασμοί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τεχνολογιών αφαλάτωσης .....	32
3.2 Επιλογή του χρησιμοποιούμενου συνδυασμού αφαλάτωσης – ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	33
3.3 Αφαλάτωση με την χρήση της ηλιακής ενέργειας. ....	34
3.4 Τεχνολογίες έμμεσης ηλιακής αφαλάτωσης.....	35
3.4.1 Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες .....	35
3.4.2 Συλλέκτες κενού.....	35
3.4.3 Παραβολικοί συλλέκτες .....	36
3.4.4 Ηλιακές λίμνες .....	37
3.4.4.1 Απόσταξη πολλαπλής φάσης με ηλιακή λίμνη.....	39
3.4.4.2 Εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης με ηλιακή λίμνη.....	40
3.5 Απόσταξη πολλαπλής φάσης με ηλιακούς συλλέκτες .....	42
3.6 Εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης με ηλιακούς συλλέκτες .....	44
3.7 Άμεση ηλιακή θερμική απόσταξη/ηλιακοί αποστακτήρες.....	44
3.8 Τεχνολογίες ηλιοθερμικής συγκέντρωσης .....	46
3.8.1 Αντίστροφη όσμωση με τεχνολογίες ηλιοθερμικής συγκέντρωσης .....	48
3.8.2 Εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης με τεχνολογίες ηλιοθερμικής συγκέντρωσης .....	48
3.9 Ηλιακή υγροποίηση - αφυγροποίηση.....	48
3.10 Αφαλάτωση με φωτοβολταϊκά .....	51

3.10.1 Αντίστροφη όσμωση με φωτοβολταϊκά .....	52
3.10.2 Ηλεκτροδιάλυση με φωτοβολταϊκά .....	54
3.11 Αφαλάτωση με την χρήση της αιολικής ενέργειας .....	55
3.11.1 Αιολική αντίστροφη όσμωση .....	56
3.11.2 Αιολική μηχανική συμπίεση ατμού .....	58
3.12 Αφαλάτωση με την χρήση της γεωθερμικής ενέργειας .....	59
3.13 Μονάδες αφαλάτωσης στα νησιά του Αιγαίου .....	61
3.13.1 Εισαγωγή.....	63
3.13.2 Αφαλάτωση νερού στις Κυκλάδες και τα Δωδεκάνησα .....	63
3.13.3 Η περίπτωση του νησιού της Μήλου .....	66
3.13.4 Μονάδα αφαλάτωσης στην Κίμωλο.....	68
3.13.5 Μονάδα αφαλάτωσης στο Σουσάκι Κορινθίας.....	69
3.13.6 Μονάδα αφαλάτωσης στον Άγιο Φωκά της Τήνου .....	69
 <b>4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΝΟΣ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ</b>	
<b>ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ ΣΤΟ ΝΗΣΙ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ.....</b>	<b>70</b>
4.1 Περιοχή μελέτης: Αλμυρός ποταμός Ηρακλείου Κρήτης .....	70
4.2 Μονάδες αφαλάτωσης νερών Αλμυρού ποταμού Ηρακλείου Κρήτης.....	75
4.3 Δυναμικό αξιοποίησης Αλμυρού .....	79
4.4 Δυναμικό αξιοποίησης των Α.Π.Ε στο νομό Ηρακλείου .....	79
4.4.1 Ανεμογεννήτριες .....	81
4.4.2 Φωτοβολταϊκά πάνελ .....	82
4.5 Υδροηλεκτρικός σταθμός.....	84
4.6 Κόστος συνολικής εγκατάστασης Α.Π.Ε – Μονάδας αντίστροφης όσμωσης.....	85
4.7 Ανάλυση ευαισθησίας της μονάδας .....	87
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>90</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>91</b>

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε στα πλαίσια της φοίτησης μου στο Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Αντικείμενο της είναι η μελέτη και η διερεύνηση των κυριότερων τεχνολογιών αφαλάτωσης, που αντλούν την απαιτούμενη ενέργεια λειτουργίας τους από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως επίσης και η εφαρμογή λογισμικού για την ανάπτυξη ενός υβριδικού συστήματος αντίστροφης όσμωσης στο νησί από το οποίο κατάγομαι και φοιτώ, την Κρήτη.

Η διπλωματική μου εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2014 – 2015, υπό την κύρια επίβλεψη του κ. Αριστομένη Αντωνιάδη του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Σε αυτόν οφείλω και ιδιαίτερες ευχαριστίες για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, κατά την ανάθεση της διπλωματικής μου. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο και απερίγραπτο ευχαριστώ στην οικογένεια και τους φίλους μου, που στάθηκαν δίπλα μου άμεσα και έμπρακτα, σε όλες τις δυσκολίες που αντιμετώπισα καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας.

Χανιά, Σεπτέμβριος 2015

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Ελλάδα συγκαταλέγεται στις επτά (7) χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με σημαντικά το προβλήματα λειψυδρίας. Οι τεχνολογίες αφαλάτωσης, συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους παροχής πόσιμου νερού, παρουσιάζουν ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα, από πλευρά οικονομικού κόστους και περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ωστόσο, οι συγκεκριμένες διαδικασίες συνεπάγονται μεγάλες ενεργειακές δαπάνες, που καλύπτονται είτε από συμβατικά ορυκτά καύσιμα ή από συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά και αξιολογεί σε ένα πρώτο στάδιο τα υπάρχοντα συστήματα αφαλάτωσης, που τροφοδοτούνται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σε ένα δεύτερο στάδιο δε, στοχεύει στην περιγραφή και ανάπτυξη ενός υβριδικού συστήματος αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση, το οποίο δύναται να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος της λειψυδρίας στο νησί της Κρήτης.

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα διαφορετικά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η προέλευση τους, το πεδίο εφαρμογών τους, το αντίκτυπο που επιφέρει στο περιβάλλον η εκμετάλλευσή τους, η απόδοσή τους, όπως επίσης και το μοναδιαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω αυτών.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά ο μηχανισμός λειτουργίας των κυριότερων διαδικασιών αφαλάτωσης, θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού. Εφόσον πραγματοποιηθεί η αναφορά στο μηχανισμό λειτουργίας των διαφορετικών εξεταζόμενων τεχνολογιών, παρουσιάζονται τα στοιχεία που αφορούν την ενεργειακή τους κατανάλωση, την παραγωγική τους δυναμικότητα και το μοναδιαίο κόστος παραγωγής πόσιμου νερού μέσω αυτών. Στο τέλος του κεφαλαίου διερευνώνται οι γενικότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις των διαδικασιών αφαλάτωσης, το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό πρόβλημα που αυτές συνεπάγονται και γίνεται αναφορά σε ένα πρωτοπρόδρομο πιλοτικό σύστημα, που αναπτύχθηκε για τη διαχείριση του προαναφερθέντος βασικότερου προβλήματος.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο εξετάζονται από διάφορες οπτικές γωνίες (ενεργειακή κατανάλωση, απόδοση, μοναδιαίο κόστος παραγωγής πόσιμου νερού, επίδραση στο περιβάλλον) οι διαφορετικοί συνδυασμοί τεχνολογιών αφαλάτωσης και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο λογισμικό «RETScreen». Το προαναφερθέν εργαλείο πρόκειται για ένα λογισμικό ελεύθερης πρόσβασης, που βοηθά στην εκπόνηση τεχνικοοικονομικών αναλύσεων ενεργειακών επενδύσεων και το οποίο έχει δημιουργηθεί και διατίθεται από το Υπουργείο Φυσικών Πόρων του Καναδά (Natural Resources Canada). Αποτελείται από δύο (2) ξεχωριστά προγράμματα, το RETScreen 4 και το RETScreen Plus. Όσον αφορά το πρώτο εξ αυτών, είναι ένα εργαλείο ανάλυσης έργων καθαρής ενέργειας βασισμένο στο Excel, με το οποίο μπορεί να προσδιοριστεί η τεχνική και οικονομική βιωσιμότητα πιθανών έργων ανανεώσιμης ενέργειας. Το RETScreen Plus από την άλλη πλευρά, είναι ένα εργαλείο βασισμένο στα Windows, που επιτρέπει τον υπολογισμό της τρέχουσας ενεργειακής απόδοσης εγκαταστάσεων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στο ίδιο Κεφάλαιο 4 και μέσω της χρήσης του RETScreen 4 προγράμματος, θα πραγματοποιηθεί η περιγραφή και η εξέταση μιας ενδεχόμενης μονάδας αιολικής – φωτοβολταϊκής (υβριδικής) αφαλάτωσης στο νησί της Κρήτης, η οποία σαφώς θα ανταποκρίνεται στα δεδομένα της επιλεγείσας περιοχής και θα δύναται να καλύψει τις ανάγκες της σε πόσιμο νερό.

# 1. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## 1.1 Εισαγωγή

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι άμεσα διαθέσιμες στην φύση (A. Demirbas, 2005). Η προέλευση τους πηγάζει από πηγές όπως το ηλιακό φως, ο άνεμος, η βροχή, η γεωθερμία, η βιομάζα, τα κύματα και οι παλίρροιες. Ωστόσο, βιώσιμη ονομάζεται η ενέργεια που είναι σε θέση να καλύπτει την παρούσα ενεργειακή ζήτηση, δίχως να διακυβεύει την αντίστοιχη ικανότητα των μελλοντικών γενεών (Luthra, Kumar, Garg, & Haleem, 2015). Στη βιβλιογραφία συναντώνται επτά διαφορετικά είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας: 1. Η ηλιακή ενέργεια, 2. Η αιολική ενέργεια, 3. Η γεωθερμική ενέργεια, 4. Η ενέργεια από βιομάζα, 5. Η υδροηλεκτρική ενέργεια, 6. Η παλιρροϊκή ενέργεια και 7. Η ενέργεια κυμάτων. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των προαναφερθέντων μορφών ενέργειας είναι η μείωση που επιφέρουν στην περιβαλλοντική ρύπανση (A. Demirbas, 2005).

Η παγκόσμια πρωτογενής ενεργειακή ζήτηση ανέρχεται στα  $448 \cdot 10^{15}$  kJ (Gude, Nirmalakhandan, & Deng, 2010). Οι συμβατικές ενεργειακές πηγές που βασίζονται στο πετρέλαιο, τον άνθρακα και το φυσικό αέριο καλύπτουν το 84.0 % των συνολικών ενεργειακών αναγκών. Ωστόσο, η χρήση τους συνεπάγεται καταστροφή της οικονομικής ανάπτυξης, του φυσικού περιβάλλοντος και της ανθρώπινης ζωής. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καλύπτουν μόνο το 15.0 – 20.0 % των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών. Η χαμηλή ενεργειακή συνεισφορά τους οφείλεται στα υψηλά απαιτούμενα κόσθη κεφαλαίου και συντήρησης (Kalogirou, 2005). Επιπροσθέτως, η προαναφερθείσα ενεργειακή παροχή στηρίζεται κατά κύριο λόγο στην χρήση της παραδοσιακής βιομάζας. Οι υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ευθύνονται μόνο για το 2.0 % της συνολικής ενεργειακής κάλυψης (Akella, Saini, & Sharma, 2009).

Το δυναμικό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι τεράστιο. Οι συγκεκριμένες ενεργειακές τεχνολογίες είναι σε θέση να καλύψουν στο έπακρον την παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση. Ένα πλήθος εφαρμογών τους κάνει χρήση των πόρων που διατίθενται σε τοπικό επίπεδο. Στις εφαρμογές αυτές ανήκουν η ηλιακή ενέργεια, η υδροηλεκτρική ενέργεια, η αιολική ενέργεια και η γεωθερμική ενέργεια. Επιπροσθέτως, η ανάγκη ευρείας διάδοσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη των απαιτούμενων οικονομικών και πολιτικών μηχανισμών υποστήριξης. Καθίσταται λοιπόν σαφές ότι η μελλοντική ενεργειακή ανάπτυξη βασίζεται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τα συστήματα φυσικού αερίου και όχι στα συμβατικά ορυκτά καύσιμα (Akella et al., 2009).

## 1.2 Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια είναι η πρωταρχική πηγή ανεξάντλητης και δωρεάν ενέργειας (Luthra et al., 2015). Η ενέργεια που παράγεται μέσω της συγκεκριμένης ανανεώσιμης πηγής προέρχεται από τις εξής διαδικασίες: 1. Τον ηλιακό στεγνώτηρα (Solar Dryer - SD), 2. Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά (Solar Photovoltaic - SPV), 3. Την θέρμανση ηλιακού σπιτιού (Solar Home Heating - SHH), 4. Την ηλιακή θερμική ηλεκτρική ενέργεια (Solar Thermal Electric Power - STEP). Το βασικό συστατικό ενός οποιοδήποτε ηλιακού συστήματος αποτελεί ο ηλιακός συλλέκτης. Οι ηλιακοί ενεργειακοί συλλέκτες είναι μια ειδική κατηγορία εναλλακτών θερμότητας, που μετατρέπουν την ηλιακή ενεργειακή ακτινοβολία σε εσωτερική ενέργεια του μέσου μεταφοράς θερμότητας (A. Demirbas, 2005). Στα διάφορα είδη ηλιακών συλλεκτών συγκαταλέγονται ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης, ο παραβολικός συλλέκτης, ο ανακλαστήρας Fresnel, το παραβολικό πιάτο και οι ηλιοστάτες (Panwar, Kaushik, & Kothari, 2011).

### 1.2.1 Ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα

Στην περίπτωση άμεσης μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό, απαιτείται η χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων. Οι φωτοβολταϊκές μονάδες είναι σε θέση να παράγουν απευθείας ηλεκτρική ενέργεια χωρίς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, θόρυβο ή κραδασμούς. Επιπροσθέτως, απαιτούν ελάχιστα κόσθη για τη συντήρηση τους ενώ είναι



σε θέση να παρέχουν σταθερή ηλεκτρική παραγωγή, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους. Ωστόσο, απαιτούν μεγάλες εκτάσεις γης για μικρά επίπεδα ενεργειακής παραγωγής (Gude et al., 2010).

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής περιλαμβάνει συστοιχίες φωτοβολταϊκών, μετατροπέα συνεχούς ρεύματος (DC) και συστοιχία μπαταριών (Gude et al., 2010). Το βασικότερο από τα προαναφερθέντα εξαρτήματα αποτελεί ο μετατροπέας συνεχούς ρεύματος. Το συγκεκριμένο εξάρτημα μετατρέπει το συνεχές ρεύμα (DC), που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή διάταξη σε εναλλασσόμενο (AC). Το παραγόμενο εναλλασσόμενο ρεύμα πρέπει πάντα να συνάδει με την τάση και την ποιότητα ισχύος του ηλεκτρικού δικτύου (Panwar et al., 2011).

### **1.2.2 Φωτοβολταϊκά πάνελ**

Το φωτοβολταϊκό πάνελ αποτελεί την αρχή οικοδόμησης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανεξάρτητα ή σε συνδυασμό με άλλες πηγές ηλεκτρικής ισχύος. Η παροχή της επιθυμητής ηλεκτρικής ισχύος επιτυγχάνεται μέσω της σύνδεσης του απαιτούμενου αριθμού φωτοβολταϊκών πάνελ. Η προαναφερθείσα αρθρωτή δομή αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων (Kalogirou, 2005). Τα τελευταία εφαρμόζονται στην επικοινωνία, την άντληση νερού για κατανάλωση και άρδευση και την παραγωγή ηλεκτρισμού (A. Demirbas, 2005).

Ένα φωτοβολταϊκό πάνελ αποτελεί μια συλλογή φωτοβολταϊκών κυττάρων. Η συλλογή αυτή αποσκοπεί στην προστασία των φωτοβολταϊκών κυττάρων και την παραγωγή μιας εύχρηστης τάσης λειτουργίας. Η τάση λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου είναι μικρότερη του 1.0 V, καθιστώντας το ιδανικό για διάφορες εφαρμογές. Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά και οι αποδόσεις των φωτοβολταϊκών πάνελ εξαρτώνται από τον κατασκευαστή και το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο υλικό (Kalogirou, 2005).

### **1.2.3 Τύποι φωτοβολταϊκών τεχνολογιών**

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα μονοκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από πολύ καθαρό μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Το κύριο πλεονέκτημα τους είναι η υψηλή τους απόδοση, που κυμαίνεται γύρω στο 15.0 %. Ωστόσο, η απαιτούμενη διαδικασία κατασκευής τους είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και απαιτεί υψηλά ποσά ενέργειας (Kalogirou, 2005). Η πολυπλοκότητα στην κατασκευή οφείλεται κυρίως στην ευθραυστότητα των πλακιδίων πυριτίου (Cucchiella & D'Adamo, 2012). Η πολυπλοκότητα κατασκευής επιφέρει όμως και αύξηση στο κόστος παραγωγής. Κατά συνέπεια, το κόστος παραγωγής κυττάρων μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι σχετικά υψηλότερο συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών κυττάρων (Kalogirou, 2005).

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα πολυκρυσταλλικού πυριτίου παράγονται μέσω της χρήσης πολλών κόκκων μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Κατά τη διαδικασία κατασκευής τους, τηγμένο πολυκρυσταλλικό πυρίτιο χυτεύεται μέσα σε δύο πλινθώματα. Αυτά τα πλινθώματα κόβονται στη συνέχεια σε πολύ λεπτά πλακίδια και συναρμολογούνται σε ολοκληρωμένα κύτταρα. Εξαιτίας της απλούστερης κατασκευής τους, ελαττώνεται και το κόστος παραγωγής. Παρόλα αυτά, η απόδοση τους είναι χαμηλότερη συγκριτικά με τα κύτταρα μονοκρυσταλλικού πυριτίου και βρίσκεται γύρω στο 12.0 % (Kalogirou, 2005).

Τα κύτταρα άμορφου πυριτίου απορροφούν το ηλιακό φως αποτελεσματικότερα από το κρυσταλλικό πυρίτιο. Για το λόγο αυτό, είναι συνήθως λεπτότερα σε πάχος. Οι αποδόσεις των συγκεκριμένων κυττάρων είναι χαμηλότερες σε σχέση με τα κρυσταλλικά κύτταρα και αναφέρονται γύρω στο 6.0 %. Εν τούτοις, η διαδικασία κατασκευής τους είναι απλούστερη, με αποτέλεσμα να σημειώνεται μικρότερο κατασκευαστικό κόστος. Εξαιτίας του χαμηλότερου κατασκευαστικού κόστους, τα κύτταρα του συγκεκριμένου είδους καθίστανται ιδανικά για πληθώρα εφαρμογών, όπου δεν απαιτούνται υψηλές αποδόσεις και το κόστος θεωρείται παράγοντας εξέχουσας σημασίας (Kalogirou, 2005).



### 1.3 Βιομάζα

Ως βιομάζα ορίζουμε το οργανικό υλικό που αποθηκεύει το ηλιακό φως, με τη μορφή της χημικής ενέργειας. Η ολότητα της βιομάζας παράγεται από πράσινα φυτά που μετατρέπουν το ηλιακό φως σε φυτικό υλικό, μέσω της φωτοσύνθεσης. Η συνεισφορά της βιομάζας έγκειται στην ηλεκτροπαραγωγή, την θέρμανση σπιτιών, τον ενεργειακό ανεφοδιασμό οχημάτων και την παροχή της απαιτούμενης θερμότητας, για τις διεργασίες βιομηχανικών διαδικασιών (Koua, Koffi, Gbaha, & Touré, 2015).

Για το σκοπό της ρητής ενεργειακής παραγωγής, χρησιμοποιούνται πολλά διαφορετικά είδη βιομάζας. Ενδεικτικά είδη ενεργειακών καλλιεργειών είναι η ζάχαρη από ζαχαροκάλαμο, το καλαμπόκι, τα ζαχαρότευτλα, τα δημητριακά και το γρασίδι ελέφαντα (M. F. Demirbas, Balat, & Balat, 2009). Η ενεργειακή μετατροπή της βιομάζας επιτυγχάνεται μέσω θερμοχημικών, βιολογικών ή χημικών διεργασιών. Οι διαδικασίες αυτές εμπίπτουν στις κατηγορίες της άμεσης καύσης, της πυρόλυσης, της αεριοποίησης, της υγροποίησης, της ενζυματικής υδρόλυσης, της αναερόβιας πέψης, της ζύμωσης, της όξινης υδρόλυσης, της εστεριοποίησης και της υπερκριτικής εξαγωγής ρευστού (A. Demirbas, 2005).

### 1.4 Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια έχει τεθεί εδώ και αιώνες στην υπηρεσία του ανθρώπου. Στις σύγχρονες εφαρμογές της ανήκει η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η προαναφερθείσα ηλεκτροπαραγωγή λαμβάνει χώρα μέσω της χρήσης ανεμογεννητριών, που συλλαμβάνουν τα συνεχή ρεύματα αέρα (Koua et al., 2015). Υπό την προϋπόθεση ύπαρξης κατάλληλου αιολικού δυναμικού, οι ανεμογεννήτριες είναι σε θέση να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια σε 24ωρη βάση (A. Demirbas, 2005).

Εξαιτίας της διαλείπουσας φύσης που διέπει το αιολικό δυναμικό, η συνεισφορά του στην παγκόσμια ενεργειακή κάλυψη ανέρχεται μόλις στο 0.1 %. Ωστόσο, η εγκατεστημένη ισχύς της αιολικής ενέργειας σημειώνει ραγδαία αύξηση τα τελευταία χρόνια. Η αύξηση αυτή σημειώνεται κυρίως στα κράτη της Γερμανίας, της Δανίας και της Ισπανίας (Prakash & Bhat, 2009).

#### 1.4.1 Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες αποτελούν μια ώριμη τεχνολογία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και διατίθενται σε ένα ευρύ φάσμα ονομαστικής ισχύος (García-Rodríguez, 2003). Η λειτουργία τους στηρίζεται στη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική ενέργεια. Η παραγόμενη μηχανική ενέργεια μετατρέπεται στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια (Koua et al., 2015).

Η σωστή επιλογή της τοποθεσίας που θα εγκατασταθεί η ανεμογεννήτρια, είναι εξέχουσας σημασίας. Αυτό συμβαίνει διότι η ενέργεια που παράγεται μέσω αυτής, είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας του ανέμου. Ωστόσο, οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες λειτουργούν αποτελεσματικότερα σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου, συγκριτικά με τα παλαιότερα μοντέλα. Επιπροσθέτως, είναι σε θέση να λειτουργούν σε ταχύτητες ανέμου έως και τα 50.0 μίλια/ώρα, χωρίς την ύπαρξη βλαβών ή δυσλειτουργιών (Welch & Venkateswaran, 2009).

### 1.5 Γεωθερμική ενέργεια

Στις άμεσες ανθρώπινες εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας ανήκουν η θέρμανση χώρων, το μαγείρεμα, η θερμότητα βιομηχανικών διεργασιών, η γεωργική ξήρανση, η θέρμανση θερμοκηπίων και ανοιχτού εδάφους κ.ο.κ (Luthra et al., 2015). Εν τούτοις, σε πολλές χώρες εντοπίζεται το φαινόμενο της κύριας αξιοποίησης της για την παραγωγή θερμότητας (A. Demirbas, 2005).

## 1.6 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας από τον ωκεανό

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η προέλευση των οποίων πηγάζει από τον ωκεανό εμπίπτουν σε τρεις κύριες κατηγορίες. Οι κατηγορίες αυτές είναι η μετατροπή της θαλάσσιας θερμικής ενέργειας (Ocean Thermal Energy - OTEC), η ενέργεια κυμάτων και η παλιρροϊκή ενέργεια. Η μετατροπή της θαλάσσιας θερμικής ενέργειας συνεπάγεται τη δημιουργία ηλεκτρισμού, από τη φυσική θερμική διαβάθμιση του ωκεανού. Η παραγωγή του ηλεκτρισμού λαμβάνει χώρα μέσω της θερμότητας, που βρίσκεται αποθηκευμένη στα θερμά επιφανειακά ύδατα. (Pelc & Fujita, 2002). Η κυματική ενέργεια, από την άλλη πλευρά, θεωρείται μια από τις πλέον υποσχόμενες εφαρμογές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Εκτός του ότι είναι σε θέση να παράγει τεράστιες ενεργειακές ποσότητες, εμφανίζεται και περισσότερο αξιόπιστη συγκριτικά με τις περισσότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σε μια δεδομένη θέση, η κυματική ενέργεια διατίθεται κατά το 90.0 % του έτους. Εν τούτοις, η ποιότητα των κυμάτων είναι μεταβλητή κατά τη διάρκεια του έτους (Luthra et al., 2015). Τέλος, η τεχνολογία παλιρροϊκών φραγμάτων εμφανίζεται ιδιαίτερα ανεπτυγμένη και προσφέρει μεγάλες δυνατότητες σε ορισμένες τοποθεσίες (Pelc & Fujita, 2002).

## 1.7 Κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των διαφορετικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Στον Πίνακα 1.7 που ακολουθεί, παρατίθενται τα κόστη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω των διαθέσιμων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας:

α/α	Μοναδιαίο Κόστος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (\$/kW h)		
1	Φωτοβολταϊκά	0.24 - 1.25 (Evans, Strezov, & Evans, 2009)	
2	Βιομάζα	Περίπτωση παραγωγής και διανομής της ισχύος σε τοπικό επίπεδο	0.05 – 0.06 (Singh, 2015)
3		Αντίθετη Περίπτωση	0.24 (Singh, 2015)
4	Αιολική ενέργεια	0.07 (Evans et al., 2009)	
5	Γεωθερμική ενέργεια	0.07 (Evans et al., 2009)	
6	Μετατροπή της θαλάσσιας θερμικής ενέργειας (OTEC)	0.27 (Pelc & Fujita, 2002)	
7	Ενέργεια κυμάτων	0.06 (Pelc & Fujita, 2002)	

Πίνακας 1.1: Μοναδιαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω των διαφορετικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

## 1.8 Αποδόσεις των διαφορετικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών κυττάρων σχετίζεται με το ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, σύμφωνα με τις πρότυπες συνθήκες διαβάθμισης (Cucchiella & D'Adamo, 2012). Η μέγιστη σημερινή τους απόδοση αναφέρεται στο 14.5 % (Gude et al., 2010). Εν τούτοις, η συγκεκριμένη απόδοση είναι ενδεικτική καθώς είναι συνηθέστερες οι αποδόσεις, στο εύρος τιμών μεταξύ του 4.0 και του 22.0 %. Η μεταβλητότητα απόδοσης οφείλεται στη μεγάλη ποικιλία των διαθέσιμων φωτοβολταϊκών κυττάρων (Evans et al., 2009). Στον Πίνακα 1.2 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι αποδόσεις φωτοβολταϊκών κυττάρων - μονάδων, για τις διαφορετικές φωτοβολταϊκές τεχνολογίες.

α/α	Μονάδα PV	Απόδοση κυττάρων			Απόδοση Μονάδας		
1	Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο	14-19	15.3	16 - 22	16	14	13 - 19
2	Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο	13 –17	14.4	14 - 18	14	13	11 - 15
3	Άμορφο πυρίτιο	6 - 8	6.5	4 - 8	6	7	4 - 8

Πίνακας 1.2: Αποδόσεις φωτοβολταϊκών κυττάρων – μονάδων, για τις διαφορετικές φωτοβολταϊκές διαμορφώσεις (Cucchiella & D'Adamo, 2012)

Η απόδοση της βιομάζας διαφέρει από χώρα σε χώρα. Σε εύκρατα και τροπικά κλίματα σημειώνονται μέτριες και υψηλές αποδόσεις της, αντίστοιχα. Ωστόσο, υψηλές αποδόσεις βιομάζας μπορούν να επιτευχθούν από τα πλέον αποτελεσματικά φωτοσυνθετικά φυτά όπως τα ζαχαρότευτλα, ο αραβόσιτος και το σόργο (M. F. Demirbas et al., 2009).

Η απόδοση της αιολικής ενέργειας βρίσκεται στο εύρος τιμών μεταξύ του 24.0 και του 54.0 %. Η προαναφερθείσα απόδοση είναι ιδιαίτερα μεταβλητή εξαιτίας της μεγάλης ποικιλίας στην ποιότητα του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού, σε διαφορετικές θέσεις. Υπό την προϋπόθεση επιλογής της κατάλληλης τοποθεσίας, μια καλή πηγή ανέμου μπορεί να επιτύχει απόδοση μεγαλύτερη του 40.0 % (Evans et al., 2009).

Η μετατροπή της θαλάσσιας θερμικής ενέργειας ισοδυναμεί με την παραγωγή 10.0 TW ενέργειας (Pelc & Fujita, 2002). Η απόδοση που αντιστοιχεί στα προαναφερθέν ενεργειακό ποσό, είναι μεγαλύτερη του 94.0 % (Evans et al., 2009).

Σύμφωνα με το Παγκόσμιο Ενεργειακό Συμβούλιο, οι εγκαταστάσεις κυματικής ενέργειας μπορούν να παρέχουν μέχρι 2.0 TW ηλεκτρισμού. Το πόσο αυτό αντιστοιχεί στο 1/5 της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης (Pelc & Fujita, 2002).

Το ετήσιο παγκόσμιο δυναμικό της παλιρροϊκής ενέργειας εκτιμάται γύρω στα 500.0 – 1,000.0 TW h. Εξαιτίας όμως των υπάρχοντων οικονομικών περιορισμών, παρουσιάζεται εκμετάλλευση ενός μόνο κλάσματος αυτής της ενέργειας. Επιπροσθέτως, η διαθεσιμότητα της παλιρροϊκής ενέργειας είναι πολύ συγκεκριμένη στον χώρο. Συναντάται σε περιοχές όπου το παλιρροϊκό εύρος ενισχύεται από παράγοντες, όπως η παροχέτευση στις εκβολές ποταμών, οι αντανάκλασεις από μεγάλες χερσονήσους και τα φαινόμενα συντονισμού (Pelc & Fujita, 2002).

Οι τυπικές αποδόσεις ορισμένων κατηγοριών ανανεώσιμης ενέργειας παρατίθενται συνοπτικά στον ακόλουθο Πίνακα 1.3:

α/α	Αποδόσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (%)	
1	Φωτοβολταϊκά	4.0 – 22.0 (Evans et al., 2009)
2	Αιολική ενέργεια	24.0 -54.0 (Evans et al., 2009)
3	Γεωθερμική ενέργεια	10.0 – 20.0 (Evans et al., 2009)
4	Μετατροπή της θαλάσσιας θερμικής ενέργειας (OTEC)	> 94.0 (Evans et al., 2009)

Πίνακας 1.3: Ενδεικτικές αποδόσεις των διαφορετικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

## 1.9 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

### 1.9.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις φωτοβολταϊκών

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα που επιφέρει η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η μείωση των εκπομπών ρύπανσης. Εν τούτοις, εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σημειώνονται σε όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος (Cucchiella & D'Adamo, 2012). Κατά τη διάρκεια λειτουργίας της φωτοβολταϊκής μονάδας και μεταφοράς των επιμέρους εξαρτημάτων που τη συναποτελούν, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου αγγίζουν το 3.5 % και 0.9 % των συνολικών εκπομπών, αντίστοιχα. Ωστόσο, οι μέσες παρατηρούμενες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανέρχονται στα 49.9 g(CO<sub>2</sub>)/kW h (Nugent & Sovacool, 2014).

### 1.9.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις βιομάζας

Η βιομάζα απορροφά διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα, για τη διενέργεια της φωτοσύνθεσης. Όταν η βιομάζα καίγεται, το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) απελευθερώνεται πίσω στην ατμόσφαιρα. Εάν η βιομάζα χρησιμοποιείται για το σκοπό της παραγωγής θερμότητας σε μια μονάδα ενεργειακής παραγωγής, η ποσότητα του εκλυόμενου διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) είναι περίπου η ίδια με την αρχική δεσμευόμενη ποσότητα. Κατά συνέπεια, η ενέργεια που παράγεται από βιομάζα ανήκει στον ουδέτερο κύκλο άνθρακα (Akella et al., 2009). Οι προαναφερθείσες μηδενικές καθαρές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, καθιστούν ελκυστικό το συγκεκριμένο είδος ενεργειακής παραγωγής (M. F. Demirbas et al., 2009). Επιπροσθέτως, τα καύσιμα βιομάζας δεν περιέχουν σχεδόν καθόλου θείο ή υδράργυρο. Οπότε, η βιομάζα δεν συνεισφέρει σχεδόν καθόλου στην εμφάνιση όξινης βροχής και τη μόλυνση των υδάτων από υδράργυρο (Akella et al., 2009).

Η ενεργειακή παραγωγή από βιομάζα πιθανώς επιδεινώνει τη διάβρωση και τη ρύπανση του εδάφους, μέσω των φυτοφαρμάκων και των λιπασμάτων, που χρησιμοποιούνται αναγκαστικά για τη διατήρηση των καλλιεργειών. Παρόλο που η χρήση των διαθέσιμων τεχνολογιών ελαχιστοποιούν τα συγκεκριμένα προβλήματα, οι συγκεκριμένες τεχνολογίες είναι δύσκολο και δαπανηρό να εφαρμοστούν. Η διάβρωση του εδάφους συμβάλλει με τη σειρά της στην επίσπευση της απορροής των υδάτων, η οποία επιβραδύνει την αποφόρτιση των υπόγειων υδάτων. Επιπλέον, η πλούσια σε θρεπτικά συστατικά υδατική ροή, μπορεί να βλάψει την ποιότητα του νερού, που λαμβάνεται από ποτάμια, λίμνες και εκβολές ποταμών, προκαλώντας τελικά ευτροφισμό (T. Abbasi & Abbasi, 2010).

Τέλος, η μετατροπή των φυσικών οικοσυστημάτων σε ενεργειακές καλλιέργειες, μεταβάλλει τους οικοτόπους και τις πηγές τροφής της άγριας ζωής και άλλων ζώντων οργανισμών. Η τροποποίηση των δασών και των υγροτόπων μειώνει κατά συνέπεια πολλά προτιμώμενα ενδιαιτήματα και τις περιοχές αναπαραγωγής ορισμένων θηλαστικών, πουλιών και άλλων ζώντων οργανισμών (T. Abbasi & Abbasi, 2010).

### 1.9.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις αιολικής ενέργειας

Η αιολική ενέργεια θεωρείται από τις πλέον φιλικές προς το περιβάλλον, πηγές ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρωταρχικό περιβαλλοντικό πλεονέκτημα της είναι η αμελητέα συμβολή της στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή. Παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου λαμβάνει χώρα μόνο κατά την κατασκευή και λειτουργία του αιολικού πάρκου. Στα προαναφερθέντα παραγόμενα αέρια ανήκει το διοξείδιο του άνθρακα. Οι συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανέρχονται στα 34.1 g(CO<sub>2</sub>)/kW h (Blanco, 2009).

Τα αιολικά πάρκα στερούν από τα θαλασσοπούλια μεγάλες εκτάσεις οικοτόπων. Αυτό συμβαίνει διότι το συγκεκριμένο είδος πουλιών χρησιμοποιεί συγκεκριμένες περιοχές για τη σίτιση του. Σε πολλές περιπτώσεις, οι περιοχές αυτές είναι ρηχές τράπεζες άμμου, που καθίστανται κατάλληλες για την ανάπτυξη αιολικών πάρκων (Blanco, 2009).

Πολλά κητώδη χρησιμοποιούν ηχοεντοπισμό για τον εντοπισμό της τροφής τους. Επιπροσθέτως, πολλά είναι αυτά που επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ακουστικών

σημάτων. Ως εκ τούτου, πολλά κητώδη έχουν πολύ ευαίσθητη ακοή, που μπορεί να καταστραφεί από τους δυνατούς θορύβους, που σχετίζονται με τα αιολικά πάρκα. Η ίδια αρνητική επίπτωση στην ακοή μπορεί να παρατηρηθεί και στα ψάρια και στους θαλάσσιους οικισμούς που ζουν στον πυθμένα της θαλάσσης (Blanco, 2009).

#### **1.9.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις γεωθερμικής ενέργειας**

Στις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της γεωθερμικής ενέργειας συγκαταλέγονται οι επιφανειακές διαταραχές, οι φυσικές συνέπειες (όπως η προκαλούμενη καθίζηση του εδάφους από την απόσυρση του γεωθερμικού ρευστού), ο θόρυβος, η θερμική ρύπανση και η απελευθέρωση προσβλητικών χημικών ουσιών (υδροθείο, διοξείδιο του άνθρακα, αμμωνία, μεθάνιο και βορικό οξύ σε συνδυασμό με ίχνη υδραργύρου, αρσενικού και άλλων στοιχείων). Οι προαναφερθείσες συνέπειες εξαρτώνται από την τοποθεσία της πηγής γεωθερμικής ενέργειας και την χρησιμοποιούμενη τεχνολογία (ανοιχτό ή κλειστό σύστημα). Ωστόσο, οι ενδεχόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθώς και η χρήση και η αποτελεσματικότητα των τεχνικών μετριασμού των συνεπειών, εξετάζονται μόνο στο επίπεδο της εγκατάστασης γεωθερμικής ενέργειας (S. Abbasi & Abbasi, 2000).

#### **1.9.5 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη μετατροπή της θαλάσσιας θερμικής ενέργειας**

Μέσω της μετατροπής της θαλάσσιας θερμικής ενέργειας, μεγάλες ποσότητες αποβλήτων που αποτελούνται από μίγμα ζεστού και κρύου νερού, είναι δυνατόν να απελευθερωθούν στην επιφάνεια. Επιπροσθέτως, η συνεχής και μακρόχρονη χρήση του θερμού επιφανειακού νερού και των κρύων βαθέων υδάτων μπορεί να οδηγήσει σε ελαφρά βαθιά θέρμανση και επιφανειακή ψύξη. Οι προκαλούμενες θερμικές επιδράσεις θεωρούνται εξέχουσας σημασίας, καθώς οι τοπικές θερμοκρασιακές μεταβολές (στο εύρος των 3.0 – 41.0 °C) προκαλούν υψηλή θνησιμότητα σε κοράλλια και ψάρια. Εκτός αυτού όμως, σημειώνονται και τα φαινόμενα της μειωμένης επιτυχούς εκκόλαψης αυγών και της αναπτυξιακής αναστολής προνυμφών (Pelc & Fujita, 2002).

Στην περίπτωση των μονάδων μετατροπής της θαλάσσιας θερμικής ενέργειας, οι εκλυόμενες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα είναι μικρές. Ωστόσο, οι παραγόμενες ποσότητες μπορεί να είναι αποτέλεσμα της μεταφοράς των βαθέων υδάτων στην επιφάνεια (Pelc & Fujita, 2002).

#### **1.9.6 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις μονάδων κυματικής ενέργειας**

Οι εγκαταστάσεις κυματικής ενέργειας λειτουργούν ως κυματοθραύστες, που ηρεμούν την θάλασσα. Παρόλο που αυτό είναι ένα επιθυμητό αποτέλεσμα σε πολλά λιμάνια, μπορεί μέσω αυτού να επιβραδυνθεί η ανάμιξη των ανώτερων στρωμάτων της θάλασσας. Η επιβράδυνση αυτή στην ανάμιξη δύναται με τη σειρά της να επιδράσει δυσμενώς στην θαλάσσια ζωή και την αλιεία. Εν τούτοις, τα βενθοπελαγικά ψάρια δεν επηρεάζονται άμεσα. Παρόλα αυτά, μεταβολές στην παραγωγικότητα επιφανείας που συνδέονται με μειωμένη ανάπτυξη, μπορούν δυνητικά να μειώσουν την παροχή τροφίμων σε βενθικούς πληθυσμούς. Οι θαλάσσιοι πληθυσμοί που ζουν κοντά στην επιφάνεια, από την άλλη πλευρά, επιβαρύνονται μέσω μεταβολών στα κύματα και τα ρεύματα. Τέλος, η κυματική απόσβεση μπορεί να μειώσει τη διάβρωση της ακτογραμμής. Ωστόσο, η επιφερόμενη επίπτωση εξαρτάται από την εκάστοτε ακτογραμμή (Pelc & Fujita, 2002).

#### **1.9.7 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις παλιρροϊκής ενέργειας**

Η συγκεκριμένη ενεργειακή τεχνολογία δεν μπλοκάρει τα κανάλια, τα στόματα εκβολών ποταμών καθώς και τη μετανάστευση των ψαριών. Επιπροσθέτως, δεν επιφέρει τροποποιήσεις στην υδρολογία. Οι παλιρροϊκές ανεμογεννήτριες και τα παλιρροϊκά φράγματα προσφέρουν σημαντικές ικανότητες ηλεκτροπαραγωγής δίχως την εμφάνιση σοβαρού αντίκτυπου στον ωκεανό. Ωστόσο, τα παλιρροϊκά φράγματα εμφανίζονται περισσότερο επιβλαβή προς το οικοσύστημα (Pelc & Fujita, 2002).



## 2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

### 2.1 Εισαγωγή

Το νερό αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την ύπαρξη ζωής και τη διατήρηση της ήδη υπάρχουσας. Σε πολλά μέρη του κόσμου, ο έλεγχος και η εκμετάλλευση των υδάτων έχει οδηγήσει στην οικονομική ανάπτυξη και την πρόοδο. Στις αναπτυσσόμενες χώρες, από την άλλη πλευρά, πολλές είναι οι περιοχές που υποφέρουν από έλλειψη πόσιμου νερού. Το Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον επισημαίνει ότι το 1/3 του παγκόσμιου πληθυσμού, ζει σε περιοχές με ανεπαρκείς ποσότητες πόσιμου νερού. Το 2025, υπολογίζεται ότι τα 2/3 του πληθυσμού θα υποφέρουν από σοβαρά προβλήματα λειψυδρίας. Στις μέρες μας, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας εκτιμά ότι πάνω από ένα δισεκατομμύριο άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση σε καθαρό πόσιμο νερό. Ωστόσο, η πλειοψηφία αυτών ζει σε αγροτικές περιοχές, όπου σημειώνονται τα φαινόμενα χαμηλής πυκνότητας πληθυσμού και απομακρυσμένων περιοχών. Εξαιτίας των δυο τελευταίων γεγονότων, καθίσταται δύσκολη η εγκατάσταση παραδοσιακών λύσεων, για την παροχή πόσιμου νερού. Πέραν όμως από τους ελλειπείς πόρους πόσιμου νερού, παρουσιάζεται και το φαινόμενο της παγκόσμιας άνισης γεωγραφικής κατανομή τους. Η αφαλάτωση του θαλασσινού νερού θεωρείται μια από τις πρώτες μορφές επεξεργασίας του νερού. Έκτοτε, αποτελεί μια βιώσιμη λύση για την παροχή πόσιμου νερού σε κοινότητες και βιομηχανικούς τομείς. Το τελευταίο γεγονός παίζει καθοριστικό ρόλο στην κοινωνικο – οικονομική ανάπτυξη ορισμένων αναπτυσσόμενων χωρών, όπως η Αφρική, η Ασία και οι χώρες της Μέσης Ανατολής (Shatat, Worall, & Riffat, 2013).

Ως αφαλάτωση ορίζουμε τη διαδικασία, κατά την οποία το αλατούχο νερό διαχωρίζεται σε δύο ξεχωριστά μέρη. Ο διαχωρισμός αυτός λαμβάνει χώρα με την χρήση διαφορετικών μορφών ενέργειας. Στο πρώτο μέρος, το νερό εμφανίζει χαμηλή συγκέντρωση διαλυμένων αλάτων και κατά συνέπεια είναι πόσιμο. Στο δεύτερο μέρος, από την άλλη πλευρά, σημειώνεται μια πολύ υψηλότερη συγκέντρωση διαλυμένων αλάτων, συγκριτικά με το αρχικό νερό τροφοδοσίας. Το αλατούχο νερό τροφοδοσίας μπορεί να είναι θαλασσινό ή υφάλμυρο. Η ταξινόμηση αυτή εξαρτάται από την αλατότητα και την πηγή παροχής νερού τροφοδοσίας (Shatat et al., 2013).

Οι εμπορικές τεχνολογίες αφαλάτωσης μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κύριες κατηγορίες: α) Τις διεργασίες θερμικής απόσταξης και β) Τις διεργασίες διαχωρισμού μεμβράνης. Στην πρώτη κατηγορία συγκαταλέγονται η απόσταξη πολλαπλής φάσης (Multi – Stage Flash - MSF) και η εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης (Multi – Effect Distillation - MED). Στη δεύτερη κατηγορία, από την άλλη πλευρά, ανήκει η αντίστροφη όσμωση (Reverse Osmosis - RO) (Mezher, Fath, Abbas, & Khaled, 2011). Πέραν των τριών προαναφερθέντων τεχνολογιών αφαλάτωσης, συναντώνται και τα έξι ακόλουθα είδη: α) Η ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis - ED), β) Η ανταλλαγή ιόντων (Ion Exchange), γ) Η αφαλάτωση με ψύξη (Freeze Desalination), δ) Η μηχανική συμπίεση ατμού (Mechanical Vapor Compression - MVC), ε) Το νανοφιλτράρισμα (Nanofiltration - NF) και ζ) Η απόσταξη μεμβρανών (Membrane Distillation) (Dore, 2005).

### 2.2 Διεργασίες θερμικής απόσταξης (Thermal Distillation Processes)

Η απόσταξη πολλαπλής φάσης και η εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης αποτελούν τις πλέον εμπορικές τεχνολογίες θερμικής αφαλάτωσης. Ιστορικά, οι θερμικές τεχνολογίες κυριαρχούν στην αγορά αφαλάτωσης, ιδιαίτερα στην περιοχή της Μέσης Ανατολής. Στη συγκεκριμένη περιοχή, το χαμηλό ενεργειακό κόστος και οι μονάδες συμπαραγωγής μεγάλης κλίμακας εγγυώνται τη βελτίωση των συγκεκριμένων τεχνολογιών. Οι θερμικές διαδικασίες μιμούνται τον φυσικό κύκλο του νερού, που βασίζεται στην εξάτμιση και συμπύκνωση. Επιπροσθέτως, είναι σε θέση να παράγουν πόσιμο νερό με πολύ χαμηλή συγκέντρωση άλατος. Ωστόσο, οι θερμικές μονάδες αφαλάτωσης υποφέρουν από το σχηματισμό κλιμάκων (όπως το ανθρακικό/θειικό ασβέστιο και το υδροξείδιο του μαγνησίου). Το τελευταίο φαινόμενο επιβάλλει τον περιορισμό της θερμοκρασίας (Dore, 2005) κορυφαίας άλμης (Top Brine Temperature - TBT) (Mezher et al., 2011).

Οι διεργασίες θερμικής απόσταξης εμφανίζουν τα εξής ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα, έναντι των διεργασιών μεμβράνης (Eltawil, Zhengming, & Yuan, 2009):

1. Στις συγκεκριμένες διεργασίες δεν υφίστανται κόστη αντικατάστασης των χρησιμοποιούμενων μεμβρανών.
2. Είναι σε θέση να παράγουν πόσιμο νερό υψηλότερης ποιότητας.
3. Δεν επηρεάζονται από μεταβολές στην ποιότητα του νερού τροφοδοσίας.
4. Θεωρούνται δοκιμασμένες και καθιερωμένες τεχνολογίες.
5. Απαιτούν λιγότερο έλεγχο, συγκριτικά με τις διεργασίες μεμβράνης.

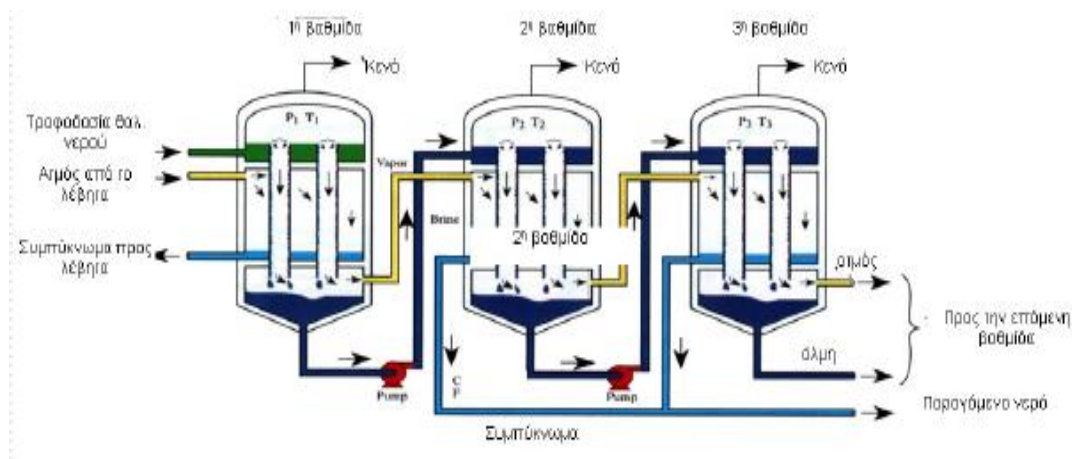
### **2.2.1 Απόσταξη πολλαπλής φάσης (Multi – Stage Flash – MSF)**

Η επιτυχία της συγκεκριμένης μεθόδου αφαλάτωσης οφείλεται κατά κύριο λόγο στην απλή χρησιμοποιούμενη διάταξη και την εξαιρετικά αξιόπιστη απόδοση. Αν και η συγκεκριμένη τεχνολογία καταναλώνει μεγαλύτερα ενεργειακά ποσά συγκριτικά με την αντίστροφη όσμωση, η απόδοση της είναι αυτή που την καθιστά ιδιαίτερα ανταγωνιστική. Εν τούτοις, το μοναδιαίο κόστος παραγωγής πόσιμου νερού είναι σχεδόν το ίδιο και για τα είδη τεχνολογιών. Επί του παρόντος, μεγάλες μονάδες απόσταξης πολλαπλής φάσης εγκαθίστανται σε πολλές χώρες, όπως η Σαουδική Αραβία, το Κουβέιτ και τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα. Η δυναμικότητα παραγωγής αφαλατωμένου νερού από τις προαναφερθέντες μονάδες κυμαίνεται μεταξύ των 50,000 και των 75,000 m<sup>3</sup>/μέρα. Η μεγάλη αύξηση στην δυναμικότητα παραγωγής της μονάδας αφαλάτωσης συμβάλλει στην περαιτέρω μείωση του μοναδιαίου κόστους παραγωγής πόσιμου νερού (Al-Sahali & Ettouney, 2007).

Η απόσταξη πολλαπλής φάσης αποτελεί την τεχνολογία αφαλάτωσης που θα εφαρμοστεί, στην περίπτωση περιοχών με υψηλή ενεργειακή ζήτηση και σημαντικές ανάγκες πόσιμου νερού (Borsani & Rebagliati, 2005). Οι μονάδες απόσταξης πολλαπλής φάσης εμφανίζουν ιδιαίτερη άνθηση στην περιοχή του Κόλπου, παρά την αναδυόμενη ανάπτυξη των μονάδων εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης. Συγκεκριμένα, στην προαναφερθείσα περιοχή συναντώνται 45 μονάδες απόσταξης πολλαπλής φάσης, 32 μονάδες εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης και 41 μονάδες αντίστροφης όσμωσης (Mezher, Fath, Abbas, & Khaled, 2011).

Η απόσταξη πολλαπλής φάσης βασίζεται αφενός στη διέλευση του αλατούχου νερού μέσα από ένα δοχείο και αφετέρου στην θέρμανση του σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι προαναφερθείσες διαδικασίες συνεπάγονται το βρασμό του αλατούχου νερού τροφοδοσίας και την πτώση της πίεσης. Ένα μέρος του νερού μεταβαίνει στο στάδιο του ατμού ενώ το υπόλοιπο ζεστό νερό συνεχίζει να ρέει μέσα από μια σειρά θαλάμων ή σταδίων (Handbook et al., n.d.). Οι εγκαταστάσεις απόσταξης πολλαπλής φάσης είναι δυνατόν να συμπεριλαμβάνουν από 4 έως 40 στάδια. Συνήθως όμως αποτελούνται από 18 έως 25 στάδια (Mezher et al., 2011). Οι θάλαμοι αυτοί παρουσιάζουν βαθμιαία μειούμενες θερμοκρασίες και πιέσεις, με αποτέλεσμα τη μετατροπή του νερού σε ατμό. Μέσω αυτής της διαδικασίας, το νερό χάνει ένα μέρος της αλατότητας του σε κάθε στάδιο και το παραγόμενο άλας παραμένει με τα υπολείμματα. Στη συνέχεια, ο ατμός συμπυκνώνεται και ως εκ τούτου μετατρέπεται σε υγρό πόσιμο νερό (Handbook et al., n.d.).



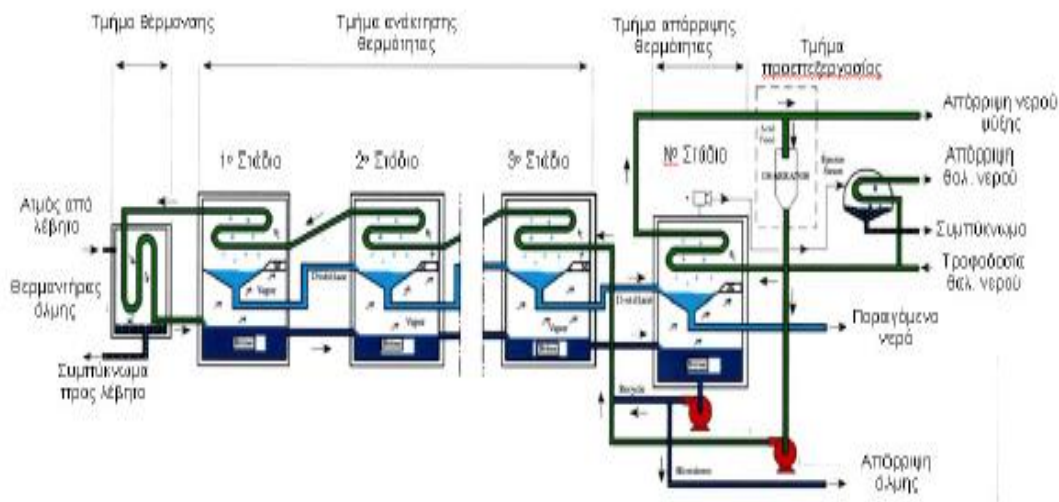


Σχήμα 2.1: Σχηματικό διάγραμμα της αφαλάτωσης με απόσταξη πολλαπλής φάσης (Eltawil et al., 2009)

### **2.2.2 Εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης (Multiple Effect Distillation - MED)**

Η πρώτη μονάδα αφαλάτωσης εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης κατασκευάστηκε το 1960. Το κύριο χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης μεθόδου αφαλάτωσης είναι η λειτουργία της υπό την παρουσία χαμηλής θερμοκρασίας κορυφαίας άλμης. Το θερμοκρασιακό εύρος της τελευταίας βρίσκεται στο εύρος τιμών, μεταξύ των 60.0 και των 70.0 °C. Ωστόσο, η χωρητικότητα των μονάδων εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης είναι μικρότερη, σε σχέση με τις μονάδες απόσταξης πολλαπλής φάσης (Al-Sahali & Ettouney, 2007).

Το συνολικό σύστημα εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να λειτουργεί με κορεσμένο θαλασσινό νερό τροφοδοσίας, σε όλες τις επιδράσεις. Όσον αφορά το μηχανισμό λειτουργίας του, ο θερμαινόμενος ατμός τροφοδοτείται στην πρώτη επίδραση, με αποτέλεσμα το σχηματισμό μιας μικρής ποσότητας υδρατμών, που χρησιμοποιείται στην θέρμανση της δεύτερης επίδρασης. Ο θερμαινόμενος ατμός είναι αυτός που οδηγεί στην απελευθέρωση, τόσο της λανθάνουσας θερμότητας όσο και του συμπυκνώματος. Η εκλυόμενη λανθάνουσα θερμότητα συνεπάγεται με τη σειρά της το σχηματισμό μιας μικρής ποσότητας ατμού στη δεύτερη επίδραση. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και στις επόμενες επιδράσεις, έως ότου η θερμοκρασία του ατμού να φτάσει σχεδόν την θερμοκρασία του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας. Ωστόσο, είναι απαραίτητη η θερμοκρασιακή αύξηση του νερού τροφοδοσίας, μέχρι την θερμοκρασία κορεσμού της κάθε επίδρασης. Το τελευταίο γεγονός υποδεικνύεται για τη διατήρηση ενός υψηλού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας καθώς και για τον περιορισμό της διαδικασίας μεταφοράς θερμότητας (Al-Sahali & Ettouney, 2007).



Σχήμα 2.2: Σχηματικό διάγραμμα της εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης (Eltawil, Zhengming, & Yuan, 2009)

Τα συστήματα εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα ή σε συνδυασμό με άλλες βοηθητικές τεχνολογίες (Han, Liu, Wu, & Li, 2014). Συγκεκριμένα, στις επερχόμενες εφαρμογές της εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης, σημειώνεται το φαινόμενο της προσθήκης ενός κύκλου θερμικής συμπίεσης ατμού (Thermal Vapor Compression - TVC). Ο θερμικός συμπιεστής ατμού λειτουργεί σαν ένας απλός εκτοξευτήρας ατμού, που χρησιμοποιεί τον ατμό υψηλής πίεσης, για να συμπαρασύρει τον ατμό χαμηλής πίεσης. Η προσθήκη του στο σύστημα της εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης αποσκοπεί στη μείωση του αριθμού των επιδράσεων και του απαιτούμενου εμβαδού επιφανείας (Mezher et al., 2011).

### 2.3 Συμπίεση ατμού (Vapor Compression - VC)

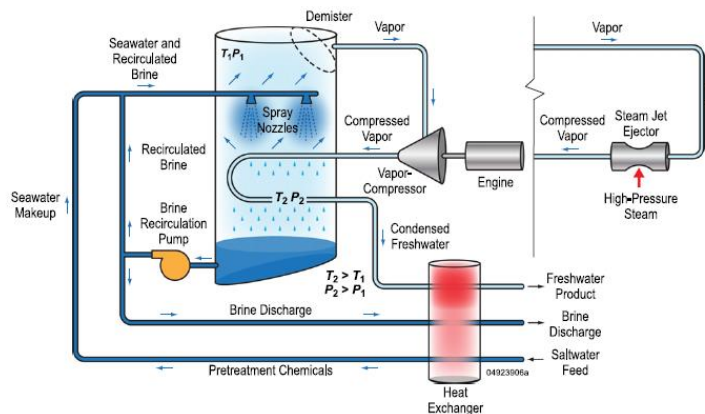
Στις διεργασίες συμπίεσης ατμού, η θερμότητα εξάτμισης του θαλασσινού νερού προέρχεται από τη συμπίεση του ατμού. Οι μονάδες συμπίεσης ατμού εκμεταλλεύονται την αρχή μείωσης της θερμοκρασίας του σημείου ζέσεως, με πτώση της πίεσης. Προκειμένου να παραχθεί η απαιτούμενη θερμότητα για την εξάτμιση του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας, χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικοί μέθοδοι συμπίκνωσης των ατμών του νερού. Οι μέθοδοι αυτοί είναι η μηχανική συμπίεση ατμού και η εκτόξευση ατμού (Khawaji, Kutubkhanah, & Wie, 2008).

#### 2.3.1 Μηχανική συμπίεση ατμού (Mechanical Vapor Compression - MVC)

Η μηχανική συμπίεση ατμού προσφέρεται για την παραγωγή πόσιμου νερού, από μονάδες αφαλάτωσης παραγωγικής δυναμικότητας, μικρότερης των 5,000 m<sup>3</sup>/μέρα. Το πιο ελκυστικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου συστήματος είναι το γεγονός ότι απαιτεί αποκλειστικά και μόνο ηλεκτρική ενέργεια, για τη λειτουργία του. Εν τούτοις, επιτακτική εμφανίζεται η ανάγκη χρησιμοποίησης ενός κινητήρα diesel για την εκκίνηση του συστήματος αφαλάτωσης (Al-Sahali & Ettouney, 2007). Ένα τυπικό σύστημα μηχανικής συμπίεσης ατμού απαρτίζεται από έναν συμπιεστή, έναν εξατμιστή και έναν εναλλάκτη θερμότητας (Karameldin, Lot, & Melchemar, 2002).

Μέρος του ατμού που δημιουργείται στον εξατμιστή οδηγείται στο συμπιεστή, όπου λαμβάνει χώρα η συμπίεση. Με αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται η θερμοκρασία συμπίκνωσης της διαδικασίας. Στη συνέχεια, ο πεπιεσμένος ατμός επιστρέφεται μέσω σωληνώσεων, στον εξατμιστή. Οι προαναφερθείσες σωληνώσεις λειτουργούν και ως εναλλάκτες θερμότητας, μεταξύ του ατμού και του διαλύματος τροφοδοσίας. Καθώς ο ατμός συμπυκνώνεται και φεύγει από το σύστημα σαν καθαρό νερό, οι σωληνώσεις θερμαίνονται, αυξάνοντας έτσι την θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας. Εκτός αυτού όμως, προκαλείται και μεγαλύτερη παραγωγή ατμού. Στο συμπιεστή πραγματοποιείται

πέραν από την αύξηση της πίεσεως του εξατμισμένου ατμού και η μείωση της πίεσης του νερού τροφοδοσίας. Η αύξηση της πίεσης συνεπάγεται την αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης. Η μείωση της πίεσεως του νερού τροφοδοσίας, από την άλλη πλευρά, συνεπάγεται την πτώση του σημείου βρασμού (Karameldin et al., 2002). Στο Σχήμα 2.3 δίδεται το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος αφαλάτωσης μηχανικής συμπίεσης ατμού.

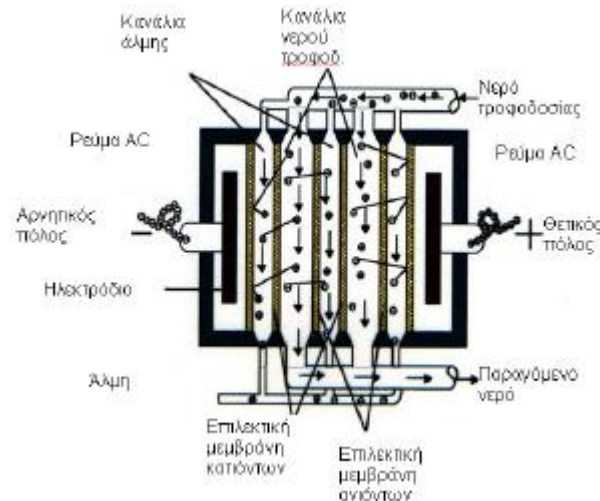


Σχήμα 2.3: Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος αφαλάτωσης μηχανικής συμπίεσης ατμού (Al-Karaghoulis & Kazmerski, 2013)

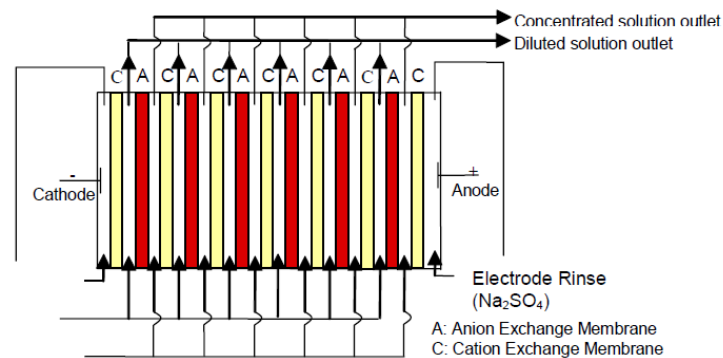
## 2.4 Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis - ED)

Στην περίπτωση που η αλατότητα του νερού τροφοδοσίας δεν ξεπερνά τα 6.0 g/L διαλυμένων στερεών, η ηλεκτροδιάλυση αποτελεί μια εφικτή λύση αφαλάτωσης. Για νερά με σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις άλατος (μικρότερες των 5.0 g/L), η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί την οικονομικότερη μέθοδο αφαλάτωσης. Παρόλα αυτά, η αφαλάτωση υδάτων με υψηλότερες συγκεντρώσεις διαλυμένων στερεών (30.0 g/L), μπορεί να διεξαχθεί επιτυχώς (Banasiak, Kruttschnitt, & Schäfer, 2007).

Η ηλεκτροδιάλυση είναι μια ηλεκτροχημική διαδικασία διαχωρισμού που λειτουργεί σε ατμοσφαιρικές πιέσεις και χρησιμοποιεί συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα (DC), για την επιλεκτική κίνηση των ιόντων αλατιού, μέσω μιας μεμβράνης. Στη μονάδα ηλεκτροδιάλυσης συμπεριλαμβάνονται το σύστημα προεπεξεργασίας του νερού τροφοδοσίας, η στοίβα μεμβρανών, η αντλία κυκλοφορίας χαμηλής πίεσης, το τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος (ανορθωτής ή φωτοβολταϊκό σύστημα) και το σύστημα μετακατεργασίας. Ακολουθεί ανάλυση του μεθοδολογικού πλαισίου, στο οποίο βασίζεται η λειτουργία της μονάδας ηλεκτροδιάλυσης: Ηλεκτρόδια συνδέονται με μια εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος (DC), σε ένα δοχείο αλμυρού νερού. Το δοχείο αυτό περιέχει μια επιλεκτική μεμβράνη ανιόντων, συνδεδεμένη παράλληλα προς το σχηματισμό καναλιών. Όταν το υφάλμυρο νερό ρέει μεταξύ αυτών των καναλιών και το ηλεκτρικό ρεύμα φορτίζει τα ηλεκτρόδια, θετικά φορτισμένα ιόντα αλατιού ταξιδεύουν, μέσω της διαπερατής μεμβράνης κατιόντων, προς τα αρνητικά ηλεκτρόδια. Συγχρόνως, τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα αλατιού ταξιδεύουν, μέσω της διαπερατής μεμβράνης ανιόντων, προς το θετικό ηλεκτρόδιο. Η συνολική διαδικασία που μόλις αναφέρθηκε παραπάνω, οδηγεί τελικά στην απομάκρυνση της αλατότητας του νερού. Το τελευταίο γεγονός συνεπάγεται τη δημιουργία δύο καναλιών. Το πρώτο κανάλι είναι συμπυκνωμένο και αντιστοιχεί στην άλμη ενώ το δεύτερο κανάλι είναι αραιό και αντιστοιχεί στο παραγόμενο πόσιμο νερό. Η τυπική παραγωγική δυναμικότητα της μονάδας ηλεκτροδιάλυσης κυμαίνεται μεταξύ των 2.0 και των 145,000 m<sup>3</sup>/μέρα (Al-Karaghoulis & Kazmerski, 2013). Το σχηματικό διάγραμμα της μονάδας ηλεκτροδιάλυσης δίδεται στο Σχήμα 2.4 που ακολουθεί. Στο Σχήμα 2.5 από την άλλη πλευρά παρουσιάζεται η στοίβα ηλεκτροδιάλυσης κατιόντων και ανιόντων σε εναλλασσόμενες σειρές, ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια.



Σχήμα 2.4: Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος αφαλάτωσης που βασίζεται στη μέθοδο της ηλεκτροδιάλυσης (Al-Karaghoulis & Kazmerski, 2013)



Σχήμα 2.5: Στοίβα ηλεκτροδιάλυσης με μεμβράνες ανταλλαγής ανιόντων και κατιόντων, σε εναλλασσόμενες σειρές ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια (Banasiak et al., 2007)

#### 2.4.1 Αντίστροφη Ηλεκτροδιάλυση (Reverse Electrodialysis - EDR)

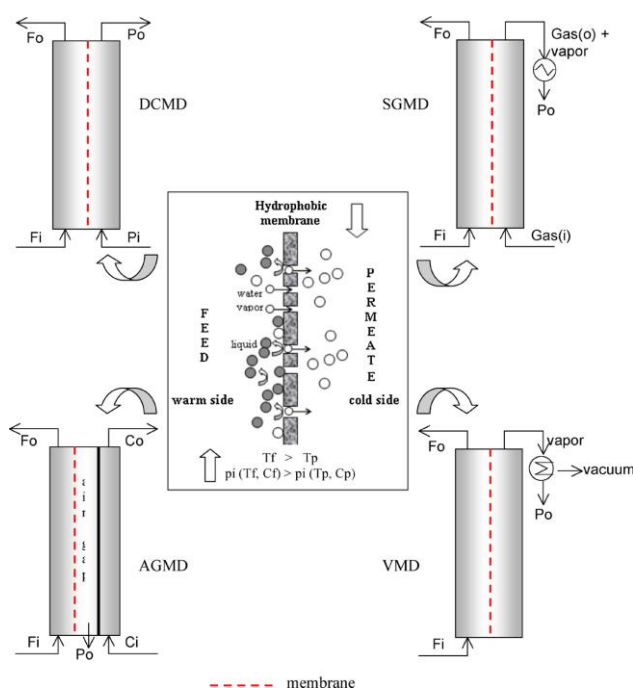
Στην αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση, η πολικότητα των ηλεκτροδίων μεταβάλλεται περιοδικά. Το ρεύμα συμπυκνώματος παίρνει την θέση του ρεύματος τροφοδοσίας και αντίστροφα. Η αντιστροφή αυτή στη ροή οδηγεί σε αύξηση της διάρκειας ζωής των ηλεκτροδίων. Εκτός αυτού όμως, βοηθά και στον καθαρισμό των χρησιμοποιούμενων μεμβρανών. Όταν μάλιστα οι μεμβράνες λειτουργούν διαρκώς κατά την ίδια φορά, καθίσταται εφικτός ο σχηματισμός ιζημάτων στις πλευρές του συμπυκνώματος (Al-Karaghoulis & Kazmerski, 2013). Ωστόσο, η συχνότητα και η διάρκεια αναστροφής του πεδίου εξαρτώνται από την θολότητα και τη συγκέντρωση άλατος του νερού τροφοδοσίας (Shatat et al., 2013).

#### 2.5 Απόσταξη μεμβρανών (Membrane Distillation - MD)

Η απόσταξη μεμβρανών περιοριζόταν αρχικά στη δημοτική επεξεργασία νερού, όπως η μικροδιήθηση και η αφαλάτωση. Εν τούτοις, με την ανάπτυξη νέων τύπων μεμβρανών, οι χρήσεις της έχουν επεκταθεί και σε διεργασίες υψηλής απόδοσης, όπως οι χημικοί διαχωρισμοί, η συγκέντρωση ενζύμων και ο καθαρισμός ροφημάτων. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί μια σχετικά διαπερατή μεμβράνη, προκειμένου να κινηθεί το νερό ή το άλας, για την επαγωγή δύο ζωνών με διαφορετικές συγκεντρώσεις και την παραγωγή πόσιμου νερού. Η μεμβράνη είναι ένα λεπτό φιλμ πορώδους υλικού, που επιτρέπει στα μόρια του νερού να περάσουν μέσω αυτής. Σε ένα παράλληλο χρόνο, εμποδίζει τη διέλευση μεγαλύτερων και ανεπιθύμητων μορίων, όπως οι ιοί, τα βακτήρια, τα μέταλλα και τα

άλατα. Οι μεμβράνες κατασκευάζονται από ποικιλία υλικών, όπως τα πολυμερή και τα μη πολυμερή. Στην κατηγορία των πολυμερών υλικών περιλαμβάνονται η κυτταρίνη, το οξικό και το νάιλον. Στην κατηγορία των μη πολυμερών ανήκουν τα κεραμικά, τα μέταλλα και τα σύνθετα. Δύο από τα πλέον επιτυχημένα είδη μεμβρανών αποτελούν η διαμόρφωση σπειροειδών τυλιγμάτων και η διαμόρφωση κοίλων λεπτών νημάτων (Shatat et al., 2013).

Η απόσταξη μεμβρανών είναι ουσιαστικά μια διαδικασία διαχωρισμού, που χρησιμοποιεί μια πορώδη υδρόφοβη μεμβράνη. Αυτή η πορώδης μεμβράνη αποτελείται από τρία κύρια στάδια: 1. Την εξάτμιση του πτητικού συστατικού στην πλευρά τροφοδοσίας, 2. Τη μετανάστευση των πτητικών μορίων ατμού και τη διείσδυση τους στην πλευρά διηθήματος, μέσω των πόρων της μεμβράνης και 3. Τη συμπύκνωση των μορίων ατμού στην πλευρά του διηθήματος. Η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της τροφοδοσίας και της πλευράς διηθήματος έχει σαν αποτέλεσμα τη διαφορά πιέσεως του ατμού, κατά μήκος της μεμβράνης. Η προαναφερθείσα διαφορά πιέσεως αποτελεί την κινητήρια δύναμη για τη μετανάστευση των μορίων ατμού, από την πλευρά τροφοδοσίας στην πλευρά διηθήματος. Εξαιτίας του υδρόφοβου χαρακτήρα της χρησιμοποιούμενης μεμβράνης, παρεμποδίζεται η διέλευση του υδρόφοβου διαλύματος, μέσα από τους πόρους της. Ωστόσο, προκειμένου να αποφευχθεί το φαινόμενο της διαβροχής των πόρων, η διαμεμβρανική (υδροστατική) πίεση δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη λεγόμενη υγρή πίεση εισόδου. Κατά συνέπεια, απαιτείται μια ελάχιστη πίεση για τη διαβροχή των πόρων της μεμβράνης, με καθαρό νερό. Η υγρή πίεση εισόδου επηρεάζεται από το υλικό της μεμβράνης, το μέγεθος των πόρων της και από τη δομή της (Susanto, 2011). Στο Σχήμα 2.6 που ακολουθεί, απεικονίζεται η αρχή διαχωρισμού της απόσταξης μεμβρανών.



Σχήμα 2.6: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας απόσταξης μεμβρανών (Susanto, 2011)

## 2.6 Τεχνολογίες διαχωρισμού μεμβρανών

Οι διεργασίες μεμβράνης υπερτερούν έναντι των θερμικών διεργασιών στα εξής σημεία (Eltawil, Zhengming, & Yuan, 2009):

1. Στις χαμηλότερες εμφανιζόμενες απαιτήσεις κόστους κεφαλαίου και ενέργειας.
2. Στους υψηλότερους λόγους ενεργειακής ανάκτησης.



3. Στην απόρριψη της μικροβιακής ρύπανσης, μέσω των χρησιμοποιούμενων μεμβρανών.
4. Στη μικρότερη εμφανιζόμενη ευαισθησία στα προβλήματα διάβρωσης και κλιμάκωσης, εξαιτίας των περιβαλλοντικών θερμοκρασιών λειτουργίας.
5. Στην χαμηλότερη προκαλούμενη επίδραση και στη μεγαλύτερη αναλογία χώρου/ρυθμού παραγωγής.
6. Στη μη διακοπή λειτουργίας των μονάδων, κατά τις εργασίες συντήρησης και αντικατάστασης των χρησιμοποιούμενων μεμβρανών.

### **2.6.1 Αντίστροφη όσμωση (Reverse osmosis - RO)**

Η αντίστροφη όσμωση αποτελεί την πλέον διαδεδομένη τεχνολογία αφαλάτωσης που έχει αντικαταστήσει τις διεργασίες μεμβρανών. Η συγκεκριμένη τεχνολογία αφαλάτωσης αντιπροσωπεύει το 61.0 % της παγκόσμιας εγκατεστημένης δυναμικότητας αφαλάτωσης, συμπεριλαμβάνοντας την αφαλάτωση θαλασσινού και υφάλμυρου νερού (Schallenberg-Rodríguez, Veza, & Blanco-Marigorta, 2014).

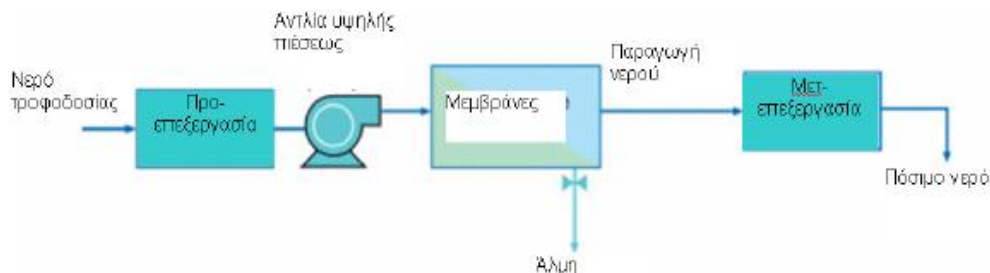
Η διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης αποτελείται από τρία κύρια στάδια (Al-Mutaz, 1996):

1. Την προεπεξεργασία,
2. Τη διέλευση μέσω της μεμβράνης και
3. Την μετακατεργασία

Στο στάδιο μετακατεργασίας, το παραγόμενο πόσιμο νερό περνά μέσα από ένα σύστημα απανθράκωσης, ένα σύστημα ρύθμισης του pH και ένα σύστημα έγχυσης χλωρίου. Το πέρασμα μέσω αυτών των συστημάτων αποσκοπεί στη συμμόρφωση του παραγόμενου πόσιμου νερού με την επιθυμητή ποιότητα και την προοριζόμενη χρήση του (Al-Mutaz, 1996).

Το στάδιο προεπεξεργασίας στοχεύει στην αποφυγή του κινδύνου απόφραξης, ρύπανσης και κλιμάκωσης. Η προεπεξεργασία αποτελεί μια σημαντική πτυχή της αντίστροφης όσμωσης. Όλες οι συσκευές του τελευταίου τύπου πρέπει να περάσουν μέσα από το συγκεκριμένο στάδιο, προκειμένου να λάβει χώρα η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών, των στεγανωτικών υλικών και των κολλοειδών υλών (Al-Mutaz, 1996). Δεν είναι λίγες οι έρευνες που αποδεικνύουν ότι οι τεχνολογίες προεπεξεργασίας μπορούν να έχουν θετικές επιπτώσεις στη συνολική λειτουργική απόδοση της μονάδας αφαλάτωσης. Στις επιπτώσεις αυτές συγκαταλέγονται η ελαχιστοποίηση της ρύπανσης των μεμβρανών και η αύξηση της απομάκρυνσης των αιωρούμενων στερεών και της διαλυμένης οργανικής ύλης, που προέρχονται από το θαλασσινό νερό. Οι τεχνολογίες προεπεξεργασίας μπορεί να είναι συμβατικές ή μη συμβατικές. Στις συμβατικές τεχνολογίες ανήκουν η πήξη, η κροκίδωση και η αναστολή κλίμακας. Στις μη συμβατικές, από την άλλη πλευρά, συμπεριλαμβάνονται η υπερδιήθηση, η μικροδιήθηση και η νανοδιήθηση (Jamaly, Darwish, Ahmed, & Hasan, 2014).

Στη μέθοδο της αντίστροφης όσμωσης, το αλατούχο νερό αντλείται μέσα σε ένα κλειστό δοχείο, όπου συμπιέζεται ενάντια σε μια μεμβράνη. Το καθαρό νερό διαπερνά τη μεμβράνη ενώ η άλμη που αφήνει πίσω του, απορρίπτεται. Η περιεκτικότητα της απορριπτόμενης άλμης σε άλατα μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ του 20.0 % και του 70.0 %, ανάλογα με την περιεκτικότητα άλατος του νερού τροφοδοσίας. Επιπροσθέτως, η απορριπτόμενη άλμη βρίσκεται συνήθως σε πολύ υψηλές πιέσεις ενώ το πόσιμο νερό σε χαμηλή. Η ενέργεια πίεσης της άλμης τροφοδοτείται πίσω στο νερό τροφοδοσίας, χρησιμοποιώντας εναλλάκτες πίεσης (Mezher et al., 2011). Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος αφαλάτωσης, που βασίζεται στην αντίστροφη όσμωση.



Σχήμα 2.7: Σχηματική αναπαράσταση της μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης (Eltawil et al., 2009)

Στο Σχήμα 2.7 η αντλία υψηλής πίεσης διοχετεύει συνεχώς το αλατούχο διάλυμα στην επιφάνεια της μεμβράνης, η οποία βρίσκεται μέσα σε ένα δοχείο υψηλής πίεσης (high pressure vessel) (Σταμάτης Α. Αυλωνίτης, Εισαγωγή στην τεχνολογία νερού και αφαλάτωσης).

#### 2.6.1.1 Μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης

Η τεχνολογία μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης θεωρείται από τις πλέον ελπιδοφόρες, για την αφαλάτωση θαλασσινού και υφάλμυρου νερού. Η συνεισφορά της είναι μεγάλη καθώς οδηγεί στην εμφάνιση πολλαπλών πλεονεκτημάτων, συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες αφαλάτωσης. Ωστόσο, η μεγαλύτερη συνεισφορά της έγκειται στην παραγωγή αφαλατωμένου νερού, με μόλις 0.50 €/m<sup>3</sup> (Dore, 2005). Παρά το γεγονός ότι οι τιμές των στοιχείων μεμβρανών θαλασσινού και υφάλμυρου είναι ελαφρώς διαφορετικές, το κόστος αφαλάτωσης θαλασσινού νερού είναι σημαντικά υψηλότερο (Jamaly et al., 2014).

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι συσκευασίας των εμπορικά διαθέσιμων μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης. Από αυτούς τους τρόπους, τρεις είναι οι επικρατέστερες διαμορφώσεις: α) Η σωληνοειδής διαμόρφωση, β) Η διαμόρφωση σπειροειδών τυλιγμάτων και γ) Η διαμόρφωση κοίλων νημάτων. Οι μονάδες αντίστροφης όσμωσης σχηματίζονται, συνδυάζοντας ένα μεγάλο αριθμό ενοτήτων μεμβρανών, διατεταγμένων σε παράλληλη ή εν σειρά σύνδεση (Al-Mutaz, 1996).

Οι μεμβράνες της αντίστροφης όσμωσης έχουν τα εξής χαρακτηριστικά (Miranda, Infield, 2002):

1. Αποτελούνται από ένα πολύ λεπτό φιλμ πολυμερούς υλικού με πάχος μερικές χιλιάδες Angstroms ( $1 \text{ Angstrom} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ ), τοποθετημένο σε πορώδες πολυμερές.
2. Οι μεμβράνες του εμπορίου εμφανίζουν υψηλή διαπερατότητα στο νερό και υψηλό βαθμό ημιδιαπερατότητας. Κατά συνέπεια, το κλάσμα της ροής του νερού προς τη ροή των διαλυμένων ιόντων είναι πολύ μεγάλο.
3. Η πλειοψηφία των μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης περιλαμβάνει οξικά άλατα κυτταρίνης (cellulose acetate, CA) και πολυαμίδες (polyamide, PA).
4. Οι μεμβράνες που διατίθενται στο εμπόριο έχουν διάρκεια ζωής από 3 – 5 χρόνια. Η ακριβής χρονική διάρκεια ζωής καθορίζεται από την εκάστοτε μεμβράνη, την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας και τη λειτουργία της μονάδας αντίστροφης όσμωσης.
5. Σε πολλές περιπτώσεις, η επιλογή της μεμβράνης γίνεται περισσότερο με κριτήριο τη συμβατότητα παρά τα τεχνικά χαρακτηριστικά, που αφορούν την ικανότητα φίλτρανσης και τη ροή του νερού διαμέσου αυτής.

Για τη διασφάλιση της υψηλής αποδοτικότητας του συστήματος αντίστροφης όσμωσης, οι χρησιμοποιούμενες μεμβράνες πρέπει σε γενικές γραμμές, να εμφανίζουν χαρακτηριστικά υψηλής ροής και απόρριψης. Η υψηλή διαπερατότητα προϋποθέτει την ύπαρξη πολύ



λεπτών μεμβρανών, καθώς η ροή και το πάχος της μεμβράνης είναι ποσά αντιστρόφως ανάλογα. Στις μέρες μας, οι εξαιρετικά λεπτές μεμβράνες αποτελούνται αφενός από ένα πολύ λεπτό, δραστικό και μη πορώδες στρώμα και αφετέρου από ένα πορώδες στρώμα υποστήριξης. Το στρώμα υποστήριξης είναι υπεύθυνο για την προστασία της μεμβράνης από σκισίματα ή σπασίματα. Το ενεργό στρώμα, από την άλλη πλευρά, ευθύνεται για το σύνολο σχεδόν της αντίστασης, κατά την πραγματοποίηση των μαζικών μεταφορών. Εκτός αυτού όμως, το ενεργό στρώμα είναι αυτό που διασφαλίζει την επιλεκτικότητα της μεμβράνης. Οι μεμβράνες που διαθέτουν τον προαναφερθέν συνδυασμό ενεργού στρώματος και δομής στήριξης, ονομάζονται ασύμμετρες (Peñate & García-Rodríguez, 2012).

Το πρώτο είδος μεμβρανών που χρησιμοποιήθηκε για αφαλάτωση από τους Loeb και Sourirajan ήταν ασύμμετρη μεμβράνη οξικής κυτταρίνης (cellulose acetate, CA), στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Οι σύγχρονες μεμβράνες CA κατασκευάζονται από μίγμα διοξειδίου και τριοξειδίου κυτταρίνης. Σύμφωνα όμως με τα όσα ειπώθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, κάθε στρώμα στις μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης έχει διαφορετικές ιδιότητες. Επομένως, είναι λογικό να προσπαθήσει κανείς να κατασκευάσει τα δύο στρώματα σε διαφορετικά στάδια. Έτσι, κατασκευάζεται πρώτα το στρώμα υποστήριξης που αποτελείται από πολυεστέρα, στην επιφάνεια του οποίου τοποθετείται ένα στρώμα μικροπορώδους πολυσουλφόνης και έπειτα στην κορυφή αυτού η μεμβράνη που εμφανίζει και τις απορριπτικές ιδιότητες. Το λεπτό στρώμα με τις απορριπτικές ιδιότητες είναι κατασκευασμένο από αρωματικά πολυαμίδια (aromatic polyamides, PA) (Εισαγωγή στην τεχνολογία του νερού και της αφαλάτωσης, Σταμάτης Α. Αυλωνίτης).

Τα δεδομένα του ακόλουθου Πίνακα 2.1 αποδεικνύουν ότι το ειδικό κόστος των μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης σχετίζεται με τη δυναμικότητα παραγωγής και τον πραγματικό χρόνο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης. Συγκεκριμένα, όσο υψηλότεροι είναι οι δύο προαναφερθέντες δείκτες, τόσο χαμηλότερο είναι το ειδικό κόστος αντικατάστασης των χρησιμοποιούμενων μεμβρανών (Avlonitis, Kouroumbas, & Vlachakis, 2003).

α/α	Τοποθεσία	Διάρκεια ζωής μεμβρανών (χρόνια)	Χρόνος λειτουργίας (ώρες)	Παραγωγή πόσιμου νερού (m <sup>3</sup> )	Κόστος αντικατάστασης μεμβρανών (€)	Ειδικό κόστος μεμβρανών (€/m <sup>3</sup> )
1	Οία	4	11,303	188,383	54,000	0.29
2	Οία	5	21,900	164,250	21,000	0.13
3	Οία	5	21,900	273,750	36,000	0.13
4	Ίος	5	21,900	456,250	54,000	0.12
5	Ιθάκη	5	39,420	985,500	108,000	0.11
6	Σύρος	5	39,420	952,650	36,000	0.04
7	Μύκονος	5	39,420	821,250	108,000	0.13

Πίνακας 2.1: Κόστος αντικατάστασης των μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού (Avlonitis et al., 2003)

## 2.7 Ανταλλαγή Ιόντων (Ion Exchange)

Η διαδικασία ανταλλαγής ιόντων χρησιμοποιεί ρητίνες για την απομάκρυνση των ανεπιθύμητων ιόντων, που βρίσκονται στο νερό. Στην περίπτωση πολύ αραιωμένων συγκεντρώσεων, η ανταλλαγή ιόντων χρησιμοποιείται για την τελική στίλβωση των υδάτων, από τα οποία έχει αφαιρεθεί το μεγαλύτερο τμήμα της περιεκτικότητας τους σε αλάτι, από άλλες τεχνολογίες αφαλάτωσης (Mezher, Fath, Abbas, & Khaled, 2011).

## 2.8 Νανοφιλτράρισμα (Nanofiltration NF)

Το νανοφιλτράρισμα χρησιμοποιείται για την αποσκλήρυνση του νερού και την απομάκρυνση των οργανικών/θειικών ενώσεων καθώς και των ιών. Η απομάκρυνση αυτή επιτυγχάνεται συνδυάζοντας το κοσκίνισμα και τη διάχυση του διαλύματος. Το νανοφιλτράρισμα αποτελεί μια βασική διαδικασία αφαλάτωσης στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (Mezher, Fath, Abbas, & Khaled, 2011).

## 2.9 Αφαλάτωση Με Ψύξη (Freeze Desalination)

Αν και η συγκεκριμένη μέθοδος έχει προταθεί εδώ και δεκαετίες, οι εφαρμογές της είναι εξαιρετικά περιορισμένες. Εν τούτοις, το θεωρητικό της πλαίσιο εμφανίζεται ιδιαίτερα ελκυστικό καθώς η ελάχιστη απαιτούμενη θερμοδυναμική ενέργεια ψύξης είναι μικρότερη, σε σχέση με αυτήν της εξάτμισης (Qiblawey & Banat, 2008). Επιπροσθέτως, η συγκεκριμένη διαδικασία εμφανίζει μια πολύ υψηλή θερμική αποδοτικότητα. Η αποδοτικότητα αυτή είναι μεγαλύτερη κατά τρεις περίπου φορές από την ηλεκτρική είσοδο του συστήματος (Ali, Fath, & Armstrong, 2011).

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ψύξης, τα διαλυμένα άλατα εξαιρούνται από το σχηματισμό παγοκρυστάλλων. Υπό την επίδραση ελεγχόμενων συνθηκών, το θαλασσινό νερό μπορεί να υποστεί αφαλάτωση, καταψύχοντας το στη μορφή παγοκρυστάλλων. Προτού λάβει χώρα η ψύξη ολόκληρης της μάζας νερού, το μίγμα συνήθως πλένεται και ξεπλένεται. Οι τελευταίες διαδικασίες αποσκοπούν στην απομάκρυνση των αλάτων από την εναπομένουσα μάζα νερού ή στην προσκόλληση του μίγματος στον πάγο. Ως εκ τούτου, η μέθοδος κατάψυξης απαρτίζεται από την ψύξη του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας, τη μερική κρυστάλλωση του πάγου, το διαχωρισμό του πάγου από το θαλασσινό νερό, το λιώσιμο του πάγου, την ψύξη και την απόρριψη θερμότητας. Στα πλαίσια πιλοτικών εγκαταστάσεων αφαλάτωσης, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι αφαλάτωσης με ψύξη. Σε αυτές ανήκουν: 1. Η ψύξη τριπλού σημείου, 2. Η ψύξη δευτερεύοντος ψυκτικού μέσου, 3. Η έμμεση ψύξη, 4. Η ευτηκτική ψύξη και 5. Η ένυδρη ψύξη (Khawaji et al., 2008).

## 2.10 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Των Διαφορετικών Διαδικασιών Αφαλάτωσης

Στον παρακείμενο Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται τα τυπικά πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα των διαφορετικών τεχνολογιών αφαλάτωσης:

α/α	Διαδικασία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
1	<b>Αντίστροφη όσμωση</b>  (Eltawil, Zhengming, & Yuan, 2009)	1. Η χαμηλή απαιτούμενη ενεργειακή κατανάλωση 2. Το σχετικά χαμηλό απαιτούμενο κεφαλαιουχικό κόστος. 3. Η απλότητα στη λειτουργία και ο μικρός χρόνος εκκίνησης της μονάδας αφαλάτωσης 4. Ο πρακτικός σχεδιασμός 5. Η επίτευξη απομάκρυνσης όχι μόνο των αλάτων αλλά και των προσμίξεων από το νερό τροφοδοσίας 6. Η μη απαίτηση κλεισίματος ολόκληρης της εγκατάστασης αφαλάτωσης, εξαιτίας των εκτελούμενων εργασιών συντήρησης 7. Η δυνατότητα υψηλής παραγωγικότητας πόσιμου νερού	1. Τα υψηλά εμφανιζόμενα κόστη χημικών και μεμβρανών αντικατάστασης 2. Το ελάχιστο προσδόκιμο χρονικό όριο ζωής των χρησιμοποιούμενων μεμβρανών, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ των 5 – 7 χρόνων 3. Η ευαισθησία που εμφανίζουν οι χρησιμοποιούμενες μεμβράνες στη ρύπανση 4. Η ανάγκη επαρκούς προεπεξεργασίας του νερού τροφοδοσίας. 5. Η πιθανότητα ύπαρξης μηχανικών βλαβών,

			εξαιτίας των υψηλών λειτουργικών πιέσεων. 6. Η ανάγκη ύπαρξης εκπαιδευμένου και εξειδικευμένου προσωπικού
2	<b>Απόσταση πολλαπλής φάσης</b>  <b>(Eltawil, Zhengming, &amp; Yuan, 2009)</b>	1. Η δυνατότητα ενσωμάτωσης της σε μονάδες αφαλάτωσης υψηλής παραγωγικότητας 2. Η υψηλή ποιότητα του παραγόμενου πόσιμου νερού 3. Η ελάχιστη προαπαιτούμενη επεξεργασία του νερού τροφοδοσίας 4. Η ανεξαρτησία του κόστους και της διαδικασίας αφαλάτωσης, από το επίπεδο αλατότητας του νερού τροφοδοσίας 5. Η εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία της μεθόδου 6. Η δυνατότητα εξασφάλισης της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας, μέσω συμπαραγωγής με μονάδα ενεργειακής παραγωγής 7. Η μείωση των επιπτώσεων κλιμάκωσης, μέσω της δημιουργούμενης ανάφλεξης	1. Οι εξαιρετικά υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις 2. Οι υψηλές απαιτούμενες κεφαλαιουχικές δαπάνες. 3. Ο χαμηλός λόγος ενεργειακής ανάκτησης 4. Το υψηλό προαπαιτούμενο επίπεδο τεχνογνωσίας 5. Οι χαμηλοί ρυθμοί εκκίνησης της μονάδας αφαλάτωσης 6. Τα προβλήματα διάβρωσης, που ανάγονται στην χαμηλή ποιότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών 7. Το κλείσιμο ολόκληρης της μονάδας αφαλάτωσης, κατά την εκπόνηση εργασιών συντήρησης
3	<b>Εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης</b>  <b>(Eltawil, Zhengming, &amp; Yuan, 2009)</b>	1. Η υψηλή ποιότητα του παραγόμενου πόσιμου νερού 2. Η δυνατότητα εξασφάλισης της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας, μέσω συμπαραγωγής με μονάδα ενεργειακής παραγωγής 3. Η υψηλή αξιοπιστία της μεθόδου, σε συνδυασμό με τις ελάχιστες απαιτήσεις προσωπικού 4. Η ελάχιστη προαπαιτούμενη επεξεργασία του νερού τροφοδοσίας 5. Η ανοχή της μεθόδου σε κανονικά επίπεδα αιωρούμενων σωματιδίων και βιολογικής ύλης	1. Τα υψηλά απαιτούμενα ποσά ενεργειακής κατανάλωσης 2. Η ανάγκη χρήσης υλικών υψηλής ποιότητας, εξαιτίας των εμφανιζόμενων προβλημάτων διάβρωσης 3. Οι υψηλές κεφαλαιουχικές και λειτουργικές δαπάνες 4. Οι ανάγκες ψύξης και ανάμιξης του παραγόμενου νερού, προκειμένου αυτό να καταστεί τελικά πόσιμο
4	<b>Απόσταση μεμβρανών</b>  <b>(Susanto, 2011)</b>	1. Η δυνατότητα πραγματοποίησης της μεθόδου σε χαμηλές θερμοκρασίες: Συνεπώς, είναι δυνατή η χρήση πηγών θερμότητας χαμηλού θερμοκρασιακού βαθμού (ηλιακή ενέργεια, γεωθερμική ενέργεια, απορριπτόμενη θερμότητα). Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το παραπάνω γεγονός δε	1. Η υψηλή πολυπλοκότητα της διαδικασίας μεταφοράς, συγκριτικά με τις διεργασίες μεμβρανών, που έχουν σαν γνώμονα την πίεση 2. Τα υψηλά καταναλισκόμενα ποσά θερμικής ενέργειας

		<p>συνεπάγεται και την απαίτηση μικρότερων ενεργειακών ποσών</p> <p>2. Η αρθρωτή σχεδίαση της μονάδας και η απαίτηση μικρότερου χώρου για την πραγματοποίηση της, συγκριτικά με τις συμβατικές διεργασίες απόσταξης</p> <p>3. Η επίτευξη υψηλής απόρριψης διαλυμένης ουσίας</p> <p>4. Η λειτουργία της μεθόδου υπό την παρουσία υψηλής συγκέντρωσης διαλυμένης ουσίας τροφοδοσίας ή με σχεδόν κορεσμένο διάλυμα</p> <p>5. Η απαίτηση μικρότερης υδροστατικής πίεσης, συγκριτικά με τις διεργασίες μεμβρανών, που έχουν σαν γνώμονα την πίεση</p> <p>6. Η απαίτηση μικρότερης προεργασίας σε σχέση με τις διεργασίες μεμβρανών, που έχουν σαν γνώμονα την πίεση,.</p> <p>7. Η μικρότερη ευαισθησία της μεθόδου στις διαφοροποιήσεις του νερού τροφοδοσίας (pH, TDS, κ.ο.κ)</p>	
5	<b>Αφαλάτωση με ψύξη</b>  <b>(Qiblawey &amp; Banat, 2008)</b>	<p>1. Οι θεωρητικά χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις</p> <p>2. Η ελάχιστη δυνητική διάβρωση και η μικρότερη κλιμάκωση ή καθίζηση</p>	1. Η απαίτηση διαχειρίσεως μιγμάτων πάγου
6	<b>Ηλεκτροδιάλυση/ Αντίστροφη Ηλεκτροδιάλυση</b>  <b>(Eltawil, Zhengming, &amp; Yuan, 2009)</b>	<p>1. Η υψηλή προσδοκώμενη χρονική διάρκεια ζωής των χρησιμοποιούμενων μεμβρανών</p> <p>2. Η δυνατότητα λειτουργίας, υπό την επήρεια χαμηλών ή μετρίων πιέσεων</p> <p>3. Η ύπαρξη αναλογίας μεταξύ της ενεργειακής χρήσης και των αφαιρούμενων αλάτων</p>	<p>1. Ο περιοδικός καθαρισμός των χρησιμοποιούμενων μεμβρανών.</p> <p>2. Η ενδεχόμενη ύπαρξη εκρήξεων στις στοίβες των μεμβρανών</p> <p>3. Η ανάγκη προεπεξεργασίας του νερού τροφοδοσίας</p> <p>4. Η μη απομάκρυνση των βακτηριακών ρυπαντών</p> <p>5. Η μη καταλληλότητα τους στην περίπτωση νερού με συνολική διαλυτότητα αλάτων, μεγαλύτερη των 12,000 mg/L TDS</p>

Πίνακας 2.2: Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα των διαφορετικών διαδικασιών αφαλάτωσης

## 2.11 Ενεργειακή κατανάλωση των διαφορετικών τεχνολογιών αφαλάτωσης

Η ενεργειακή κατανάλωση των μονάδων αφαλάτωσης θαλασσινού νερού εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί είναι (Avlonitis et al., 2003):

1. Η συγκέντρωση του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας,
2. Η εφαρμοζόμενη μέθοδος αφαλάτωσης,
3. Τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας,
4. Οι λειτουργικές συνθήκες της μονάδας αφαλάτωσης,
5. Η ύπαρξη και ο τύπος του συστήματος ενεργειακής ανάκτησης,
6. Η τοποθεσία της μονάδας αφαλάτωσης,
7. Η δυναμικότητα παραγωγής της εγκατάστασης αφαλάτωσης.

Στις επόμενες παραγράφους της παρούσας ενότητας εξετάζεται συνοπτικά η ενεργειακή κατανάλωση των διαφορετικών μονάδων αφαλάτωσης:

1. Απόσταξη πολλαπλής φάσης – Εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης: Ένας μεγάλος αριθμός των αποδοτικών μονάδων απόσταξης πολλαπλής φάσης - εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης λειτουργεί σε συνδυασμό με μια μονάδα παραγωγής ατμού. Η προαναφερθείσα μονάδα είναι αυτή που παρέχει την απαιτούμενη θερμότητα για τη διενέργεια της απόσταξης - εξάτμισης. Στο σύνολο της δομείται από έναν ατμοστρόβιλο τοποθετημένο πίσω από λέβητες ανάκτησης θερμότητας, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με τουρμπίνες αερίου. Ως εκ τούτου, καθίσταται απαραίτητη η προμήθεια καυσίμων, για τη διεκπεραίωση των δύο προαναφερθέντων διαδικασιών αφαλάτωσης. Ωστόσο, η ενεργειακή κατανάλωση των μονάδων απόσταξης πολλαπλής φάσης εξαρτάται από την ταχύτητα ροής αποστάγματος και την αναλογία απόδοσης της εγκατάστασης αφαλάτωσης.

2. Ηλεκτροδιάλυση: Ο ηλεκτρισμός αποτελεί τη μοναδική μορφή ενέργειας, που απαιτείται για τη λειτουργία της μονάδας ηλεκτροδιάλυσης. Συγκεκριμένα, στα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρόδια χρησιμοποιείται συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα. Στην οδήγηση των αντλιών, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιείται συνεχές (DC) ή εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Στην περίπτωση νερού τροφοδοσίας χαμηλής αλατότητας (<2,500 ppm), η ενεργειακή κατανάλωση κυμαίνεται μεταξύ των 0.7 και των 2.5 kW h/m<sup>3</sup>. Για νερό τροφοδοσίας με αλατότητα στο εύρος των 2,500 – 5,000 ppm, η αντίστοιχη ενεργειακή κατανάλωση βρίσκεται στο εύρος τιμών, μεταξύ των 2.64 και των 5.5 kW h/m<sup>3</sup> (Al-Karaghoulis & Kazmerski, 2013).

3. Αντίστροφη όσμωση: Στην περίπτωση των μονάδων αντίστροφης όσμωσης, η υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση λαμβάνει χώρα στην αντλία υψηλής πίεσης. Η συγκεκριμένη αντλία είναι γνωστή και με το προσωνύμιο «αντλία τροφοδοσίας». Η επιλογή της αντλίας εξαρτάται από τις ανάγκες πίεσης άντλησης και τη ροή του νερού. Υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη αντλιών τροφοδοσίας, που εγκαθίστανται σε μονάδες αντίστροφης όσμωσης: α) Οι αντλίες θετικής μετατόπισης και β) Οι φυγοκεντρικές αντλίες. Ωστόσο, ο δεύτερος τύπος είναι αυτός που χρησιμοποιείται συνήθως. Οι αντλίες θετικής μετατόπισης βρίσκουν κυρίως εφαρμογή σε μικρές μονάδες αντίστροφης όσμωσης. Ο συγκεκριμένος τύπος αντλιών συνεπάγεται μεγαλύτερο κόστος αγοράς και συντήρησης. Εν τούτοις, είναι αποτελεσματικότερος, συγκριτικά με τις φυγοκεντρικές αντλίες (Schallenberg-Rodríguez et al., 2014).

Στον ακόλουθο Πίνακα 2.3 παρατίθενται συνοπτικά τα στοιχεία ενεργειακής κατανάλωσης των διαφορετικών μονάδων αφαλάτωσης.

Ιδιότητες	Απόσταση πολλαπλής φάσης	Εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης	Μηχανική συμπύεση ατμού	Θερμική συμπύεση ατμού	Αντίστροφη όσμωση θαλασσινού νερού	Αντίστροφη όσμωση υφάλμυρου νερού	Ηλεκτροδιάλυση
Τυπικό μέγεθος μονάδας (m <sup>3</sup> /μέρα)	50,000 -70,000	5,000 – 15,000	100.0 – 3,000	10,000 – 30,000	Έως και 128,000	Έως και 198,000	2.0 – 145,000
Ηλεκτρική ενεργειακή κατανάλωση (kW h/m <sup>3</sup> )	2.5 – 5.5	2.0 – 2.5	7.0 – 12.0	1.6 – 1.8	4.0 – 6.0 με ενεργειακή ανάκτηση	1.5 – 2.5	2.64 – 5.5
Θερμική ενεργειακή κατανάλωση (MJ/m <sup>3</sup> )	190.0 – 282.0	145.0 – 230.0	Καμία	227.0	Καμία	Καμία	Καμία
Συνολική ηλεκτρική κατανάλωση (kW h/m <sup>3</sup> )	19.58 – 27.25	14.45 – 21.35	7.0 – 12.0	16.26	4.0 – 6.0	1.5 – 2.5	2.64 – 5.5 0.7 – 2.5 (χαμηλή TDS)
Ποιότητα παραγόμενου νερού (ppm)	Γύρω στα 10.0	Γύρω στα 10.0	Γύρω στα 10.0	Γύρω στα 10.0	400.0 – 500.0	200.0 – 500.0	150.0 – 500.0

Πίνακας 2.3: Ενεργειακή κατανάλωση των κύριων διαδικασιών αφαλάτωσης (Al-Karaghoulis & Kazmerski, 2013)

## 2.12 Κόστος διαδικασιών αφαλάτωσης

Το κόστος αφαλάτωσης είναι συνήθως συνάρτηση πληθώρας παραγόντων. Στους παράγοντες αυτούς ανήκουν (Banat & Jwaied, 2008):



1. Η δυναμικότητα της μονάδας αφαλάτωσης,
2. Η ποιότητα του νερού τροφοδοσίας,
3. Το στάδιο προεπεξεργασίας του νερού τροφοδοσίας,
4. Η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία αφαλάτωσης,
5. Το ενεργειακό κόστος,
6. Η διάρκεια ζωής της μονάδας αφαλάτωσης,
7. Η απόσβεση της πραγματοποιηθείσας επένδυσης.

Τα στοιχεία που συνιστούν το συνολικό κόστος των μονάδων αφαλάτωσης είναι το κόστος κεφαλαίου και οι ετήσιες λειτουργικές δαπάνες. Το συνολικό κόστος παραγωγής πόσιμου νερού από την άλλη πλευρά, αποτελεί το άθροισμα του άμεσου κόστους κεφαλαίου και των ετήσιων λειτουργικών δαπανών, για τη διάρκεια της συμβατικής περιόδου λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης (Ghaffour, Missimer, & Amy, 2013).

Οι μέθοδοι θερμικής απόσταξης συνεπάγονται υψηλότερο κόστος παραγωγής αφαλατωμένου νερού. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται εξαιτίας των μεγάλων χρησιμοποιούμενων ποσοτήτων καυσίμου, κατά την εξάτμιση του θαλασσινού νερού. Στην περίπτωση υφάλμυρου νερού τροφοδοσίας, οι διεργασίες μεμβράνης εμφανίζουν μικρότερο κόστος αφαλάτωσης, συγκριτικά με τις τεχνολογίες θερμικής απόσταξης. Παρόλα αυτά, το σημαντικότερο μειονέκτημα τους είναι το υψηλό κόστος αντικατάστασης των χρησιμοποιούμενων μεμβρανών (περίπτωση αντίστροφης όσμωσης). Για τον προαναφερθέν λόγο, οι διεργασίες μεμβράνης καθίστανται ακατάλληλες για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού (Karagiannis & Soldatos, 2008).

#### **2.12.1 Μοναδιαίο κόστος παραγωγής πόσιμου νερού μέσω των διαφορετικών τεχνολογιών αφαλάτωσης**

Τα μοναδιαία κόστη παραγωγής πόσιμου νερού (\$/m<sup>3</sup>), μέσω των κύριων διαδικασιών αφαλάτωσης, παρατίθενται στον Πίνακα 2.4, που ακολουθεί:

α/α	Διαδικασία	Παραγωγική δυναμικότητα (m <sup>3</sup> /μέρα)	Τύπος νερού τροφοδοσίας	Μοναδιαίο κόστος παραγωγής πόσιμου νερού (\$/m <sup>3</sup> )
1	Απόσταξη πολλαπλής φάσης	23,000 – 528,000	Θαλασσινό	0.56 – 1.75
2	Εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης	91,000 – 320,000 12,000 – 55,000 < 100.00	Θαλασσινό	0.52 – 1.01 0.95 – 1.5 2.0 – 8.0
3	Συμπίεση ατμού	30,000 1,000	Θαλασσινό	0.87 – 0.95 2.0 – 2.6
4	Αντίστροφη όσμωση	100,000 – 320,000 15,000 – 60,000 1,000 – 4,800	Θαλασσινό	0.45 – 0.66 0.48 – 1.62 0.7 – 1.72
5	Αντίστροφη όσμωση	40,000 20.0 – 1,200.0 Μερικά m <sup>3</sup> /μέρα	Υφάλμυρο	0.26 – 0.54 0.78 – 1.33 0.56 – 12..99
6	Ηλεκτροδιάλυση	Μεγάλη δυναμικότητα Μικρή δυναμικότητα	Υφάλμυρο	0.6 1.05

Πίνακας 2.4: Μέσο κόστος παραγωγής πόσιμου νερού, μέσω των κύριων διαδικασιών αφαλάτωσης (Al-Karaghoul & Kazmerski, 2013)



## **2.13 Πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των διαδικασιών αφαλάτωσης**

Η ύπαρξη των μονάδων αφαλάτωσης δημιουργεί μια ευρεία γκάμα περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στις πιθανότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις συγκαταλέγονται οι συνέπειες στο θαλάσσιο περιβάλλον καθώς και η εκπομπή αέριων ρύπων. Μια σύνοψη των συνηθέστερων περιβαλλοντικών επιπτώσεων δίδεται στις επόμενες υποενότητες της παρούσας διπλωματικής εργασίας (Lattemann & Höpner, 2008).

### **2.13.1 Επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον**

Οι μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού μπορούν να προσλαμβάνουν νερό τροφοδοσίας, μέσω διαφορετικών πηγών. Εν τούτοις, την κύρια πηγή πρόσληψης αποτελεί η ανοικτή θάλασσα. Η χρήση των ανοιχτών πηγών πρόσληψης οδηγεί σε απώλειες υδρόβιων οργανισμών. Οι απώλειες των τελευταίων οφείλονται σε σύγκρουση τους με την επιφάνεια εισαγωγής νερού τροφοδοσίας ή σε συμπαράσυρση τους μαζί με το νερό τροφοδοσίας, μέσα στη μονάδα αφαλάτωσης. Η κατασκευή της δομής εισαγωγής και άντλησης προκαλεί μια αρχική ανατάραξη στο θαλάσσιο βυθό. Η προαναφερθείσα ανατάραξη οδηγεί εκ νέου στην αναστολή των ιζημάτων, των θρεπτικών συστατικών ή των ρύπων, στη στήλη ύδατος. Μετά την εγκατάσταση των συγκεκριμένων δομών, αυτές μπορούν να επηρεάσουν την ανταλλαγή του νερού και των ιζημάτων, να λειτουργήσουν ως τεχνητοί ύφαλοι για τους θαλάσσιους οργανισμούς ή να παρεμποδίσουν τις θαλάσσιες οδούς ή άλλες θαλάσσιες δραστηριότητες (Lattemann & Höpner, 2008).

#### **2.13.1.1 Σύνθεση της απορριπτόμενης άλμης**

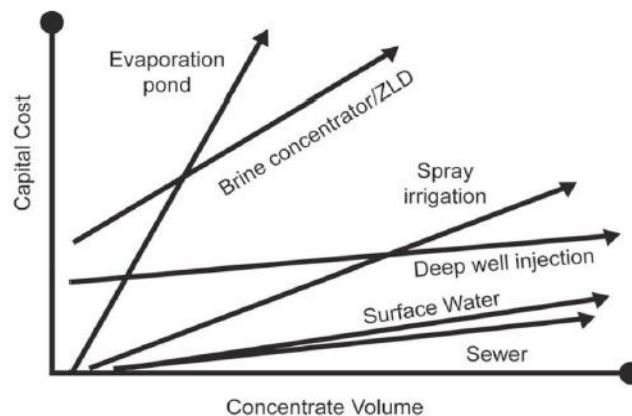
Σε όλες τις διαδικασίες αφαλάτωσης, η απορριπτόμενη άλμη επιστρέφεται στην θάλασσα. Ωστόσο, η συγκέντρωση της τελευταίας είναι υψηλότερη, συγκριτικά με αυτήν του θαλασσινού νερού. Πέραν όμως από την υψηλή συγκέντρωση άλατος, το απορριπτόμενο ύδωρ περιέχει και διάφορες χημικές - απορρυπαντικές ουσίες. Οι ουσίες αυτές βρίσκουν κατά κύριο λόγο εφαρμογή, στο στάδιο προεπεξεργασίας της μονάδας αφαλάτωσης. Εν τούτοις, στην περίπτωση των μονάδων εξάτμισης, συναντάται και η ύπαρξη θερμικής ρύπανσης (Einav, Hamssib, & Periyb, 2002).

#### **2.13.1.2 Διασπορά των συγκεντρωμένων αλάτων**

Το μείζον περιβαλλοντικό πρόβλημα που σχετίζεται με τις μονάδες αφαλάτωσης είναι ο τρόπος, με τον οποίο μπορούμε να απαλλαγούμε από το πλεόνασμα της συμπυκνωμένης άλμης. Σε πολλές περιπτώσεις, η άλμη αυτή δεν μπορεί να παραμείνει στη γη καθώς απειλεί τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες (Einav et al., 2002).

Η διαδικασία της αφαλάτωσης συνεπάγεται τη δημιουργία μεγάλων ποσοτήτων υγρών αποβλήτων. Συγκεκριμένα, η παραγωγή 1.0 L πόσιμοι νερού έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή 2.0 L άλμης. Οι επιλογές διαχείρισης του παραγόμενου συμπυκνώματος εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα τοπικά χαρακτηριστικά και τον όγκο των λυμάτων. Στις πλέον εφαρμοζόμενες τεχνικές διαχείρισης ανήκουν: α) Η λίμνη εξάτμισης (evaporation pond), β) Η άρδευση με σπρέι (Spray irrigation), γ) Οι υπόνομοι (Sewer), δ) Τα επιφανειακά ύδατα (Surface water), ε) Η έγχυση σε βαθιά πηγάδια (Deep well injection), ζ) Ο συμπυκνωτής άλμης (Brine concentrator/ZLD – Zero Liquid Discharge). Ωστόσο, από τις προαναφερθείσες τεχνικές, εκείνη που χρησιμοποιείται συνήθως είναι η απόρριψη της άλμης στα επιφανειακά ύδατα (Xevgenos, Moustakas, Malamis & Loizidou, 2014).

Κάθε μέθοδος διαχείρισης του συμπυκνώματος έχει διαφορετικά οφέλη, κόστη, περιβαλλοντικές επιπτώσεις και περιορισμούς. Εν τούτοις, το κόστος της εκάστοτε τεχνικής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον όγκο του παραγόμενου συμπυκνώματος. Στο Σχήμα 2.8 δίδονται τα κόστη των διαφορετικών τεχνικών διαχείρισης της παραγόμενης άλμης, σαν συνάρτηση του όγκου του διηθήματος.



Σχήμα 2.8: Κόστος των διαφόρων τεχνικών διαχείρισης του παραγόμενου συμπυκνώματος, σαν συνάρτηση του όγκου του (Xevgenos,Moustakas,Malamis & Loizidou,2014)

Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Προγράμματος με κωδική ονομασία SOL – BRINE, αναπτύχθηκε η εγκατάσταση ενός πρότυπου συστήματος επεξεργασίας της άλμης. Το εν λόγω σύστημα στοχεύει στην ολική εξάλειψη της άλμης, που παράγεται από μονάδες αφαλάτωσης. Οι ενεργειακές του απαιτήσεις καλύπτονται πλήρως από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συγκεκριμένα μέσω της ηλιακής ενέργειας. Η άλμη που υπόκειται σε επεξεργασία μέσω του συγκεκριμένου συστήματος, παράγεται από υφιστάμενη μονάδα αφαλάτωσης, δυναμικότητας 1,000 m<sup>3</sup>/μέρα, η οποία είναι εγκατεστημένη στον Άγιο Φωκά στην Τήνο (Culligan, 2013).

#### 2.13.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μονάδων απόσταξης πολλαπλής φάσης

Εξαιτίας της υψηλής ενεργειακής της κατανάλωσης, η απόσταξη πολλαπλής φάσης συνεπάγεται τη μεγαλύτερη εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, ο συνδυασμός συνδυασμένου κύκλου και των μονάδων αφαλάτωσης του συγκεκριμένου τύπου, επιφέρει επίτευξη υψηλότερης θερμικής απόδοσης και μικρότερων περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Mezher et al., 2011). Στον Πίνακα 2.5 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, για τις διαφορετικές διαμορφώσεις των μονάδων απόσταξης πολλαπλής φάσης, που κάνουν χρήση φυσικού αερίου ή καυσίμων:

α/α	Διαμόρφωση (Καύσιμο)	Kg (CO <sub>2</sub> )/m <sup>3</sup>	CO <sub>2</sub> μείωση (\$/m <sup>3</sup> )
1	Μη συμπαραγωγή, φυσικό αέριο	20.4 – 25.0	0.41 – 0.50
2	Συμπαραγωγή, κύκλος ατμού, φυσικό αέριο	13.9 – 15.6	0.28 - 0.31
3	Συμπαραγωγή, συνδυασμένος κύκλος, φυσικό αέριο	9.41	-
4	Συμπαραγωγή, υβριδική αντίστροφη όσμωση, κύκλος ατμού, φυσικό αέριο	9.45	-
5	Συμπαραγωγή, υβριδική αντίστροφη όσμωση, συνδυασμένος κύκλος, φυσικό αέριο	5.56	-

Πίνακας 2.5: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και το κόστος μείωσης των εκπομπών του, για την απόσταξη πολλαπλής φάσης διαφορετικών διαμορφώσεων (Mezher, Fath, Abbas, & Khaled, 2011)

### **2.13.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μονάδων εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης**

Όσον αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, η εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης κατατάσσεται σε χαμηλότερη θέση, συγκριτικά με την απόσταση πολλαπλής φάσης. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, λόγω της χαμηλότερης ειδικής ηλεκτρικής ενεργειακής κατανάλωσης της μεθόδου (Mezher, Fath, Abbas, & Khaled, 2011). Στον Πίνακα 2.6 παρουσιάζονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και το κόστος μείωσης των εκπομπών του, για την εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης διαφορετικών διαμορφώσεων:

α/α	Διαμόρφωση (Καύσιμο)	Kg (CO <sub>2</sub> )/m <sup>3</sup>	CO <sub>2</sub> μείωση (\$/m <sup>3</sup> )
1	Μη συμπαραγωγή, φυσικό αέριο	11.8 – 17.6	0.24 – 0.35
2	Συμπαραγωγή, κύκλος ατμού, φυσικό αέριο	8.2 – 8.9	0.16 - 0.18
3	Συμπαραγωγή, συνδυασμένος κύκλος, φυσικό αέριο	7.01	-
4	Συμπαραγωγή, υβριδική αντίστροφη όσμωση, κύκλος ατμού, φυσικό αέριο	7.33	-
5	Συμπαραγωγή, υβριδική αντίστροφη όσμωση, συνδυασμένος κύκλος, φυσικό αέριο	4.38	-

Πίνακας 2.6: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και το κόστος μείωσης των εκπομπών του, για την εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης διαφορετικών διαμορφώσεων (Mezher, Fath, Abbas, & Khaled, 2011)

### **2.13.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μονάδων αντίστροφης όσμωσης**

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μονάδων αντίστροφης όσμωσης εξαρτώνται από την χρησιμοποιούμενη τεχνολογία και την τοποθεσία της εγκατάστασης αφαλάτωσης. Ωστόσο, η απόρριψη της εναπομένουσας άλμης αποτελεί την πλέον επιζήμια επίπτωση (Fuentes-Bargues, 2014).

Οι μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού και υφάλμυρου νερού μπορούν να επιδρούν άμεσα ή έμμεσα στο περιβάλλον (Sadhvani, Veza, & Santana, 2005):

1. Το έμμεσο περιβαλλοντικό αντίκτυπο στο περιβάλλον οφείλεται στην ανάγκη αύξησης της χρησιμοποιούμενης ηλεκτρικής ενεργειακής παραγωγής: Οι μονάδες αφαλάτωσης του συγκεκριμένου τύπου απαιτούν την εξωτερική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό, απαιτείται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμικές μονάδες. Ωστόσο, για την παραγωγή ηλεκτρισμού καθίσταται απαραίτητη η καύση των μετέπειτα χρησιμοποιούμενων καυσίμων σε ένα θερμικό εργοστάσιο. Η καύση όμως αυτή οδηγεί στην απελευθέρωση επικίνδυνων αερίων στην ατμόσφαιρα (σε αυτά τα επικίνδυνα αέρια συγκαταλέγεται και το διοξείδιο του άνθρακα). Το τελικό αποτέλεσμα της προαναφερθείσας διαδικασίας διασκόρπισης αερίων στην ατμόσφαιρα είναι η υπερθέρμανση του πλανήτη. Στον Πίνακα 2.7 δίδονται οι εκλυόμενες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα, για τις διαφορετικές διαμορφώσεις των συστημάτων αντίστροφης όσμωσης:

α/α	Διαμόρφωση (Καύσιμο)	Kg (CO <sub>2</sub> )/m <sup>3</sup>	
1	Μη συμπαραγωγή, φυσικό αέριο	Κύκλος ατμού	2.79
2	Συμπαραγωγή, κύκλος ατμού, φυσικό αέριο	Εσωτερική μηχανή καύσης	2.13
3	Συμπαραγωγή, συνδυασμένος κύκλος, φυσικό αέριο	Συνδυασμένος κύκλος	1.75

Πίνακας 2.7: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, από τις μονάδες αντίστροφης όσμωσης διαφορετικών διαμορφώσεων (Mezher, Fath, Abbas, & Khaled, 2011)

- Οι μονάδες αντίστροφης όσμωσης επιδρούν αρνητικά στο θαλάσσιο περιβάλλον, καθώς η συμπυκνωμένη παραγόμενη άλμη απορρίπτεται τελικά στην θάλασσα: Το μέγεθος της συγκεκριμένης επίδρασης εξαρτάται από τους υδρο – γεωλογικούς παράγοντες, που χαρακτηρίζουν την θάλασσα. Στους παράγοντες αυτούς συγκαταλέγονται η βαθυμετρία, τα κύματα, τα ρεύματα, το βάθος της υδάτινης στήλης κ.ο.κ. Πέραν όμως από το μέγεθος των επιπτώσεων, οι προαναφερθέντες παράγοντες ρυθμίζουν και την έκταση ανάμιξης της άλμης.
- Εκτός από την υψηλή συγκέντρωση αλάτων, η απορριπτόμενη στο θαλάσσιο περιβάλλον άλμη, περιέχει και διάφορες χημικές ουσίες, που χρησιμοποιούνται στο στάδιο προεπεξεργασίας της μονάδας (υλικά αντιρύπανσης) και στον χημικό καθαρισμό των χρησιμοποιούμενων μεμβρανών (ασθενή οξέα, κινικά οξέα, πολυφωσφορικό νάτριο, EDTA, καυστικά αλκάλια), που λαμβάνει χώρα 3 – 4 φορές τον χρόνο.
- Το αντίκτυπο του θορύβου: Η ακουστική ρύπανση των μονάδων αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού είναι ιδιαίτερα σημαντική. Οι αντλίες υψηλής πίεσης και τα συστήματα ενεργειακής ανάκτησης παράγουν σημαντικά επίπεδα θορύβου. Οι παραγόμενοι ήχοι ξεπερνούν στην πλειοψηφία τους τα 90.0 dB (A). Ως εκ τούτου, οι μονάδες αφαλάτωσης θα πρέπει να εγκαθίστανται μακριά από κατοικημένες περιοχές. Εκτός αυτού, θα πρέπει να διαθέτουν και κατάλληλο εξοπλισμό για τη μείωση της παραγόμενης στάθμης θορύβου.
- Επιπτώσεις στους υδροφόρους ορίζοντες: Οι σωλήνες θαλασσινού νερού και άλμης που βρίσκονται πάνω από υδροφόρους ορίζοντες, θέτουν τους τελευταίους σε κίνδυνο. Αυτό συμβαίνει διότι μπορεί να λάβει χώρα διαρροή από τους σωλήνες και το αλμυρό νερό να διεισδύσει μέσα στους υδροφόρους ορίζοντες. Για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στους υδροφόρους ορίζοντες, προτείνεται η εφαρμογή κατάλληλων τεχνικών σφράγισης.

### 3. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ

#### 3.1 Συνδυασμοί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τεχνολογιών αφαλάτωσης

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παράγουν θερμική, ηλεκτρική ή μηχανική ενέργεια. Στην υποκατηγορία της θερμικής ενεργειακής παραγωγής συγκαταλέγονται οι ηλιακοί συλλέκτες και η γεωθερμική ενέργεια. Στη δεύτερη υποκατηγορία, από την άλλη πλευρά, εντάσσονται τα φωτοβολταϊκά και τα συστήματα ηλιακής θερμικής ενέργειας. Το σύνολο των παραπάνω μορφών ενέργειας δύναται να χρησιμοποιηθεί στην ενεργειακή τροφοδότηση ενδεχόμενων μονάδων αφαλάτωσης (Voivontas, Yannopoulos, Rados, Zervos, & Assimacopoulos, 1999).

Τα συστήματα αφαλάτωσης που αντλούν την απαιτούμενη ενέργεια λειτουργίας τους από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, εμπίπτουν σε δύο βασικές κατηγορίες: α) Τις θερμικές διαδικασίες και β) Τις ηλεκτρομηχανικές διαδικασίες. Στην περίπτωση μη ύπαρξης ηλεκτρικού δικτύου, η μονάδα αφαλάτωσης – ανανεώσιμων πηγών ενέργειας λειτουργεί σαν ένα αυτόνομο σύστημα. Ωστόσο, τα αυτόνομα συστήματα είναι συνήθως υβριδικά. Με τον όρο «υβριδικά συστήματα» αναφερόμαστε σε συστήματα που συνδυάζουν περισσότερα από ένα είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή – αιολική ενέργεια) ή συμπεριλαμβάνουν μια γεννήτρια Diesel (Mathioulakis, Belessiotis, & Delyannis, 2007).

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται ευρέως σε διεργασίες αφαλάτωσης είναι η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, τα φωτοβολταϊκά και η γεωθερμική ενέργεια. Τα συστήματα αφαλάτωσης που κάνουν χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εντάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις διαδικασίες απόσταξης, που έχουν σαν γνώμονα την θερμότητα που παράγεται από συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται οι διαδικασίες μεμβρανών και απόσταξης, που έχουν σαν γνώμονα την ηλεκτρική ή μηχανική ενέργεια, που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Eltawil et al., 2009).

Η γενικότερη επικρατούσα τάση περιλαμβάνει το συνδυασμό των θερμικών ενεργειακών τεχνολογιών (ηλιοθερμική ενέργεια, γεωθερμική ενέργεια) με τις θερμικές διαδικασίες αφαλάτωσης. Στην τάση αυτή συμπεριλαμβάνεται και ο συνδυασμός των ηλεκτρομηχανικών ενεργειακών τεχνολογιών με τις διεργασίες αφαλάτωσης, που απαιτούν ηλεκτρική ή μηχανική ενέργεια (Mathioulakis et al., 2007).

Οι πλέον ελπιδοφόροι συνδυασμοί των δύο τεχνολογιών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί:

α/α	Τεχνολογία ΑΠΕ	Αλατότητα νερού τροφοδοσίας	Τεχνολογία αφαλάτωσης
1	Ηλιακή ενέργεια	Θαλασσινό νερό	Εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης
2	Ηλιακή θερμική ενέργεια	Θαλασσινό νερό	Απόσταξη πολλαπλής φάσης
3	Φωτοβολταϊκά	Θαλασσινό νερό	Αντίστροφη όσμωση
		Υφάλμυρο νερό	Ηλεκτροδιάλυση
4	Αιολική ενέργεια	Θαλασσινό νερό	Αντίστροφη όσμωση
		Υφάλμυρο νερό	Μηχανική συμπίεση ατμού
5	Γεωθερμική ενέργεια	Θαλασσινό νερό	Εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης

Πίνακας 3.1: Συνδυασμοί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τεχνολογιών αφαλάτωσης (Goosen, Mahmoudi, & Ghaffour, 2010)



Ο δημοφιλέστερος συνδυασμός των δυο τεχνολογιών είναι αυτός των φωτοβολταϊκών και της αντίστροφης όσμωσης. Τα φωτοβολταϊκά αποτελούν μια καλή λύση στην περίπτωση μικρών εφαρμογών αφαλάτωσης, σε ηλιόλουστες περιοχές. Ωστόσο, για μονάδες αφαλάτωσης μεγαλύτερης κλίμακας, προτιμάται η αιολική ενέργεια. Αυτό συμβαίνει διότι στην περίπτωση αιολικής αφαλάτωσης απαιτείται κυρίως η ύπαρξη μεγάλων εκτάσεων γης. Ο συγκεκριμένος συνδυασμός τεχνολογιών συναντάται συνήθως σε νησιά, όπου σημειώνεται η ύπαρξη ενός σημαντικού αιολικού δυναμικού και περιορισμένων εκτάσεων επίπεδου εδάφους (El-Ghonemy, 2012).

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν την καλύτερη επιλογή ενεργειακού ανεφοδιασμού για αυτόνομα συστήματα αφαλάτωσης, σε άνυδρες και παράκτιες περιοχές, όπου οι συμβατικές πηγές ενέργειας παρουσιάζουν έλλειψη. Επιπροσθέτως, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθιστούν εφικτή τη διαφοροποίηση των ενεργειακών πόρων και βοηθούν στην αποφυγή εξωτερικών εξαρτήσεων ενεργειακού ανεφοδιασμού. Ωστόσο, οι διεργασίες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού απαιτούν υψηλή ενεργειακή κατανάλωση. Ως εκ τούτου, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των καταναλισκόμενων ορυκτών καυσίμων θεωρούνται εξέχουσας σημασίας. Με περαιτέρω μελλοντική μείωση της τιμής τους, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν κάλλιστα να σταθούν ανταγωνιστικά έναντι των συμβατικών ορυκτών καυσίμων (Eltawil et al., 2009).

Παρά τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα συστήματα που συνδυάζουν τις τεχνολογίες αφαλάτωσης με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αντιπροσωπεύουν μόλις το 0.02 % της συνολικής δυναμικότητας αφαλάτωσης. Οι λόγοι που οδηγούν στην ύπαρξη αυτού του φαινομένου, συνοψίζονται στη συνέχεια (Eltawil et al., 2009):

1. Η γεωγραφική κατανομή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δε συμβαδίζει πάντα με το μέγεθος της λειψυδρίας, σε τοπικό επίπεδο.
2. Η οικοδόμηση ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης και η αγορά των εξαρτημάτων που το συναποτελούν, απαιτεί υψηλό αρχικό κεφάλαιο επένδυσης. Σε πολλές περιπτώσεις παρατηρείται μείωση των παραπάνω επιμέρους κοστών. Παρόλα αυτά, το μέγεθος τους είναι ακόμη τέτοιο που καθιστά μη εφικτή την εμπορευματοποίηση των τεχνολογιών αφαλάτωσης, που εκμεταλλεύονται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
3. Η πλειοψηφία των σχετικών τεχνολογιών δε συμβαδίζει με το χαμηλό επίπεδο υποδομών, που χαρακτηρίζει συχνά τις τοποθεσίες με σοβαρά προβλήματα λειψυδρίας.

### **3.2 Επιλογή του χρησιμοποιούμενου συνδυασμού αφαλάτωσης – ανανεώσιμων πηγών ενέργειας**

Η αντιστοίχιση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με τη μονάδα αφαλάτωσης, απαιτεί την εξέταση μιας σειράς παραγόντων. Ο βέλτιστος ή απλά ο απλούστερος τεχνολογικός συνδυασμός μελετάται σε συνδυασμό με διάφορες τοπικές παραμέτρους. Οι παράμετροι αυτοί συμπεριλαμβάνουν τις γεωγραφικές συνθήκες, την τοπογραφία της περιοχής, τη δυναμικότητα και τον τύπο της διαθέσιμης ενέργειας σε χαμηλό κόστος, τη διαθεσιμότητα των τοπικών υποδομών (συμπεριλαμβανομένου του ηλεκτρικού δικτύου), το μέγεθος της μονάδας αφαλάτωσης και την αλατότητα του νερού τροφοδοσίας. Τα γενικά κριτήρια επιλογής του καταλληλότερου συνδυασμού αφαλάτωσης – ανανεώσιμων πηγών ενέργειας περιλαμβάνουν επίσης την ευρωστία, την απλότητα λειτουργίας, το χαμηλό κόστος συντήρησης, το συμπαγές μέγεθος, την ευκολία μεταφοράς των επιμέρους εξαρτημάτων της μονάδας, την απλότητα προεπεξεργασίας του νερού τροφοδοσίας και την ανθεκτικότητα της μονάδας αφαλάτωσης (Mathioulakis et al., 2007).

Στην περίπτωση επιλογής της μεθόδου αφαλάτωσης που θα χρησιμοποιηθεί σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή, υπάρχει επίσης μια πληθώρα κριτηρίων που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Τα κριτήρια αυτά επισημαίνονται στη συνέχεια (Eltawil et al., 2009):

1. Η ποσότητα του πόσιμου νερού που πρέπει να παραχθεί, σε συνδυασμό με το εύρος της εφαρμοσιμότητας των διαφόρων διαδικασιών αφαλάτωσης.
2. Η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας αφαλάτωσης όσον αφορά την ενεργειακή της κατανάλωση.
3. Η καταλληλότητα της διεργασίας αφαλάτωσης, στην περίπτωση ηλιακής αφαλάτωσης.
4. Οι απαιτήσεις επεξεργασίας του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας.
5. Η έκταση της απαιτούμενης γης.
6. Τα κριτήρια ευρωστίας και η απλότητα λειτουργίας της ανοικοδομούμενης μονάδας.
7. Η οργάνωση που απαιτείται σε τοπικό επίπεδο, σε συνδυασμό με τη σχετικά απλή προαπαιτούμενη εκπαίδευση των εργαζομένων.
8. Η αποδοχή και η υποστήριξη εκ μέρους της τοπικής κοινότητας όπως επίσης και το χαμηλό κοινωνικό αντίκτυπο της μονάδας αφαλάτωσης.
9. Το χαμηλό κόστος συντήρησης, το συμπαγές μέγεθος και η εύκολη μεταφορά των επιμέρους εξαρτημάτων, στην τοποθεσία της μονάδας.

Η πρώτη παράμετρος που διερευνάται είναι η ποιότητα των υδάτινων πόρων. Στην περίπτωση πηγής υφάλμυρου νερού, η διερεύνηση που λαμβάνει χώρα είναι όχι μόνο ποιοτική αλλά και ποσοτική. Εν τούτοις, η αφαλάτωση υφάλμυρου νερού εμφανίζεται σαν η πλέον ελκυστικότερη (Kalogirou, 2005).

Μια επιπρόσθετη παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη, κατά την επιλογή του υφιστάμενου συνδυασμού διεργασιών αφαλάτωσης – ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι ο τύπος της σύνδεσης μεταξύ των δύο τεχνολογιών. Όταν το σύστημα συνδέεται με το ηλεκτρικό δίκτυο, η μονάδα αφαλάτωσης λειτουργεί αδιάκοπα σαν μια συμβατική μονάδα. Συνεπώς, η ανανεώσιμη πηγή ενέργειας είναι αυτή που υποκαθιστά, στην προκειμένη περίπτωση, την χρήση ορυκτών καυσίμων. Στην περίπτωση μη ύπαρξης ηλεκτρικού δικτύου, σημειώνεται η ανάπτυξη αυτόνομων συστημάτων αφαλάτωσης. Η απρόβλεπτη και μη σταθερή ισχύς εισόδου ωθεί το σύστημα αφαλάτωσης σε μη ιδανική λειτουργία. Η λειτουργία αυτή δύναται να προκαλέσει σοβαρά λειτουργικά προβλήματα στο ολικό σύστημα. Συνεπώς, για αυτόνομα συστήματα αφαλάτωσης προτείνεται η χρήση μικρών συστημάτων ενεργειακής αποθήκευσης. Ενδεικτικά συστήματα αυτού του είδους είναι οι μπαταρίες. Ωστόσο, η εφαρμογή τους είναι εφικτή μόνο στην περίπτωση μικρών ηλεκτροκίνητων συστημάτων. Τέλος, η αποθηκευόμενη θερμότητα προστίθεται στα θερμικά συστήματα, μόνο υπό τη μορφή ζεστού ελαίου ή νερού. Οι παραπάνω αναφερόμενες παράμετροι επιδέχονται περαιτέρω ανάλυση, σε συνδυασμό με τα τοπικά χαρακτηριστικά της μονάδας αφαλάτωσης και τις οικονομικές απαιτήσεις της (El-Ghonemy, 2012).

### 3.3 Αφαλάτωση με την χρήση της ηλιακής ενέργειας

Η ηλιακή θερμική ενέργεια παρουσιάζεται σαν μια από τις πλέον υποσχόμενες εφαρμογές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στην αφαλάτωση του θαλασσινού νερού (Kalogirou, 2005). Οι εγκαταστάσεις ηλιοθερμικής ενέργειας θεωρούνται από τις πιο οικονομικές (El-Ghonemy, 2012). Ένα σύστημα ηλιακής απόσταξης αποτελείται από δύο ξεχωριστές συσκευές. Οι συσκευές αυτές είναι ο ηλιακός συλλέκτης και ο συμβατικός αποστακτήρας (περίπτωση έμμεσης ηλιακής αφαλάτωσης). Χαρακτηριστικά συστήματα έμμεσης ηλιακής αφαλάτωσης αποτελούν οι διάφοροι τύποι ηλιακών συλλεκτών και οι ηλιακές λίμνες (Subramani, Badruzzaman, Oppenheimer, & Jacangelo, 2011). Υπάρχει όμως και η περίπτωση ενός ενοποιημένου συστήματος, όπως συμβαίνει στην άμεση ηλιακή αφαλάτωση (Garcia-rodriguez, 2002). Τα έμμεσα ηλιακά συστήματα αφαλάτωσης περιλαμβάνουν μια εμπορική μονάδα αφαλάτωσης, που συνδέεται με εμπορικούς ή ειδικούς ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες (Kalogirou, 2005). Οι κυρίαρχες ηλιακές θερμικές διεργασίες που ενσωματώνονται ή χρησιμοποιούνται σε/ως συστήματα αφαλάτωσης είναι οι ηλιακοί αποστακτήρες και οι ηλιακές λίμνες (Subramani et al., 2011). Ωστόσο, για την παραγωγή αφαλατωμένου νερού σε μεγάλη κλίμακα προτιμάται το έμμεσο ηλιακό θερμικό σύστημα αφαλάτωσης (Yuan, Wang, Li, & Li, 2011).



Οι τεχνολογίες έμμεσης ηλιοθερμικής αφαλάτωσης περιλαμβάνουν την εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης, την απόσταξη πολλαπλής φάσης, την υγροποίηση – αφυγροποίηση και την απόσταξη μεμβρανών (Yuan et al., 2011).

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε θερμική ή ηλεκτρική ενέργεια. Η θερμική ενέργεια μπορεί να επιτευχθεί μέσω της χρήσης ηλιακών αποστακτών ή συστημάτων συλλογής της ηλιακής θερμικής ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια, αντιθέτως, μπορεί να επιτευχθεί από την ηλιακή φωτοβολταϊκή μετατροπή ή τις μονάδες παραγωγής ηλιακής θερμικής ενέργειας (Al-Karaghoul & Kazmerski, 2013).

Εξαιτίας της διάχυτης φύσης της ηλιακής ακτινοβολίας, δε συνίσταται η χρήση της σε εφαρμογές αφαλάτωσης μεγάλης κλίμακας. Στην περίπτωση αυτή, σημειώνεται χαμηλή παραγωγικότητα πόσιμου νερού, χαμηλή θερμική απόδοση και μεγάλες εδαφικές απαιτήσεις. Ωστόσο, για εφαρμογές αφαλάτωσης μικρής κλίμακας, υφίσταται η χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται λόγω της ελεύθερης διαθεσιμότητας και του χαμηλού λειτουργικού κόστους της ηλιακής μονάδας αφαλάτωσης. Οι μικρές μονάδες ηλιακής αφαλάτωσης καθίστανται ιδανικές στην περίπτωση άνυδρων, απομακρυσμένων περιοχών. Αυτό συμβαίνει διότι στις περιοχές αυτές η ηλιακή ακτινοβολία είναι άφθονη και οι συμβατικές πηγές ενέργειας ανεπαρκείς (Wessley & Mathews, 2012).

### **3.4 Τεχνολογίες έμμεσης ηλιακής αφαλάτωσης (Indirect solar desalination)**

Οι τεχνολογίες ηλιακής συγκέντρωσης χρησιμοποιούνται κατά τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα, υψηλής θερμοκρασίας. Η παραγόμενη θερμότητα βρίσκει συνήθως εφαρμογή στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε μια γεννήτρια ατμού. Οι τεχνολογίες αυτού του τύπου παρουσιάζουν σχετικά χαμηλό κόστος. Επιπροσθέτως, είναι σε θέση να παράγουν ισχύ σε περιόδους υψηλής ενεργειακής ζήτησης (El-Ghonemy, 2012).

Για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμική ενέργεια χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι ηλιακών συλλεκτών. Στους συλλέκτες αυτούς γίνεται συνήθως χρήση ενός ρευστού μεταφοράς θερμότητας. Το προαναφερθέν ρευστό μεταφοράς θερμότητας υπόκειται σε θέρμανση από την ηλιακή ακτινοβολία. Η θέρμανση λαμβάνει χώρα κατά την κυκλοφορία του κατά μήκος του ηλιακού συλλέκτη, μέσω ενός σωλήνα απορρόφησης. Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας αποτελεί, κατά κύριο λόγο, το νερό ή το συνθετικό λάδι. Έχοντας πλέον υποστεί θέρμανση, το ρευστό μεταφοράς θερμότητας αποθηκεύεται σε μια μονωμένη δεξαμενή ή χρησιμοποιείται ως θερμικό μέσο αποθήκευσης (Garcia-rodriguez, Palmero-marreroa, & Gbmez-camachob, 2002). Ανάλογα με τον τύπο του χρησιμοποιούμενου συλλέκτη και τις θερμοκρασίες εφαρμογής, τα συλλεγόμενα ποσά ηλιακής ενέργειας βρίσκονται στο εύρος των 600.0 έως 1,500.0 kW h/m<sup>2</sup> χρόνο. Το προαναφερθέν ενεργειακό ποσό αντιστοιχεί σε βελτίωση της αποτελεσματικότητας των ηλιακών συλλεκτών κατά 25.0 έως 60.0 % (Ghaffour et al., 2014).

Οι ηλιακοί συλλέκτες είναι στατικοί ή συσκευές ηλιοπαρακολούθησης. Στην περίπτωση συσκευών ηλιοπαρακολούθησης, υπάρχουν δύο ή τρεις άξονες ηλιοπαρακολούθησης. Υπάρχουν όμως και ηλιακοί συλλέκτες με επίπεδες πλάκες, γραμμή – άξονα συγκέντρωσης ή σημείου εστίασης. Οι συλλέκτες που κρίνονται περισσότερο κατάλληλοι για ηλιακή απόσταξη, παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες της παρούσας διπλωματικής. Ωστόσο, η επιλογή των πλέον κατάλληλων ηλιακών συλλεκτών θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη της έναν αριθμό κριτηρίων. Στα κριτήρια αυτά συγκαταλέγονται η απαιτούμενη θερμοκρασία λειτουργίας, η αναλογία μεταξύ της δέσμης φωτός και της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας, οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος, η παροδική ηλιακή ακτινοβολία και άλλοι τεχνικοοικονομικοί παράγοντες (Garcia-rodriguez et al., 2002).

Οι εφαρμογές αφαλάτωσης που κάνουν χρήση ηλιακών συλλεκτών, απαιτούν την ύπαρξη μιας θερμικής δεξαμενής αποθήκευσης (Thermal Energy Storage - TES). Η τελευταία μετριάξει τις επιπτώσεις των συννεφιασμένων ή νυχτερινών ωρών ενώ το θερμοκρασιακό

της προφίλ ακολουθεί την ημιτονοειδή φύση της ηλιακής ακτινοβολίας και την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στην περίπτωση μη ύπαρξης θερμικών δεξαμενών αποθήκευσης, η μονάδα αφαλάτωσης παραμένει αδρανής κατά τις ώρες χαμηλής ή ανύπαρκτης ηλιοφάνειας. Κατά συνέπεια, το σύστημα αφαλάτωσης πρέπει να παρουσιάζει αυξημένη δυναμικότητα, κατά τις ώρες αυξημένης ηλιοφάνειας (Gude, 2014). Οι ηλιακοί συλλέκτες αποτελούν το δομικό συστατικό της μονάδας ηλιακής αφαλάτωσης. Οποιαδήποτε τροποποίηση στην αποδοτικότητα τους, συνεπάγεται άμεση επίδραση στο ρυθμό παραγωγής πόσιμου νερού. Κατά συνέπεια, επηρεάζεται και το μοναδιαίο κόστος παραγωγής του τελευταίου. Ωστόσο, η μονάδα ηλιακών συλλεκτών συναποτελεί περίπου το 28.0 % του συνολικού κόστους της μονάδας αφαλάτωσης (Al-Hallaj, Parekh, Farid, & Selman, 2006).

#### **3.4.1 Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες (Flat plate collectors - FPC)**

Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες είναι στατικά και μη συγκεντρωτικά συστήματα ενεργειακής μετατροπής της ηλιακής ενέργειας. Χρησιμοποιούν συνήθως νερό, στη θέση του ρευστού μεταφοράς θερμότητας. Το τελευταίο κυκλοφορεί μέσω πλαστικών ή μεταλλικών σωλήνων απορρόφησης. Οι πλαστικοί ή μεταλλικοί σωλήνες απορρόφησης συναρμολογούνται σε μια επίπεδη πλάκα. Η συναρμολόγηση αυτή αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας. Επίσης, υπάρχει το ενδεχόμενο επιλεκτικών επιστρώσεων. Οι επιλεκτικές επιστρώσεις ελαχιστοποιούν τις θερμικές απώλειες και αυξάνουν τα ποσά απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Με αυτόν τον τρόπο, αυξάνονται η θερμική απόδοση και το κόστος του ηλιακού συλλέκτη (Garcia-rodriguez, 2002).

Όσον αφορά τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών, αυτοί αποτελούνται από ένα μονωμένο μεταλλικό κουτί. Το κουτί αυτό διαθέτει ένα γυάλινο ή πλαστικό κάλυμμα καθώς και μια σκουρόχρωμη απορροφητική πλάκα. Η απορροφητική πλάκα περιέχεται σε ένα αεροστεγές και διάφανο πλαίσιο. Το πλαίσιο καλύπτεται από την πλευρά του ηλίου με διαφανές υλικό και από την άλλη με θερμομονωτικό υλικό. Οι σωλήνες ροής του ρευστού μεταφοράς θερμότητας δρομολογούνται σε παράλληλη ή ελικοειδή διάταξη. Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται στην αφαλάτωση μικρών ποσοτήτων νερού. Η τεχνολογία τους δεν θεωρείται καθοριστικής σημασίας στην αφαλάτωση καθώς συνήθως απαιτούνται συμπληρωματικά ενεργειακά ποσά (Qiblawey & Banat, 2008).

#### **3.4.2 Συλλέκτες κενού (Evacuated tube collectors - ETC)**

Οι συλλέκτες κενού συνεπάγονται ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας. Οι απώλειες ελαχιστοποιούνται μέσω ενός καλύμματος κενού του δέκτη που είναι σωληνωτό και κατασκευασμένο από γυαλί. Για την ελαχιστοποίηση των απωλειών που οφείλονται στην υπέρυθη ακτινοβολία, χρησιμοποιείται μια εκλεκτική επικάλυψη του δέκτη. Υπάρχουν δυο διαφορετικά είδη τεχνολογιών σωλήνων κενού: α) Σωλήνες Dewar: Στην περίπτωση αυτή έχουμε δύο ομοαξονικούς σωλήνες, κατασκευασμένους από γυαλί. Οι ομοαξονικοί σωλήνες σφραγίζονται μεταξύ τους σε αμφότερα τα άκρα και β) Συλλέκτες κενού με μεταλλικό δέκτη: Στην περίπτωση αυτή, ο μεταλλικός δέκτης απαιτεί την ύπαρξη ενός γυαλιού με σφράγιση μετάλλου. Ανάλογα με το σχήμα του δέκτη υπάρχουν και διαφορετικά σχέδια συλλεκτών κενού. Για τον καθορισμό του τύπου που θα χρησιμοποιηθεί στην εκάστοτε περίπτωση, απαιτείται ο συνδυασμός τους με ανακλαστικές επιφάνειες. Στις ανακλαστικές επιφάνειες συγκαταλέγονται μια επίπεδη επιφάνεια ή μια αντανακλαστική επιφάνεια χαμηλού συμπακνώματος που λειτουργεί σαν μια παραβολική ένωση (Garcia-rodriguez et al., 2002). Οι συλλέκτες κενού απαιτούν περισσότερο εξελιγμένες εγκαταστάσεις παραγωγής σε σχέση με τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες. Ωστόσο, με αυτούς επιτυγχάνονται υψηλότερες θερμοκρασίες και αποδόσεις (Qiblawey & Banat, 2008).

Σε γενικές γραμμές, οι συλλέκτες κενού προτιμώνται από τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες. Παρόλο που το κόστος προμήθειας τους είναι αρκετά υψηλό, απαιτούν μικρότερη έκταση γης για την εγκατάστασή τους. Πέραν όμως από το τελευταίο γεγονός,

σημειώνεται και η απαίτηση μικρότερων ποσοτήτων τους. Το κόστος προμήθειας των συλλεκτών κενού κυμαίνεται στο εύρος των 300.0 έως 550.0 \$/m<sup>2</sup>. Στην περίπτωση ηλιακής απόσταξης υψηλής θερμοκρασίας, οι συλλέκτες κενού κρίνονται ιδιαίτερα κατάλληλοι ως ενεργειακή πηγή. Αυτό συμβαίνει διότι είναι σε θέση να παράγουν θερμοκρασίες έως και τους 200.0 °C (Qiblawey & Banat, 2008).

### **3.4.3 Παραβολικοί συλλέκτες - Parabolic trough collectors (PTC)**

Ο παραβολικός συλλέκτης είναι ένας γραμμικός συλλέκτης με παραβολική διατομή. Η ανακλαστική του επιφάνεια εστιάζει στο ηλιακό φως, μέσω ενός σωλήνα – δέκτη, που βρίσκεται κατά μήκος της εστιακής του γραμμής (Qiblawey & Banat, 2008). Ο παραβολικός συλλέκτης χρησιμοποιείται στην θέρμανση του ρευστού μεταφοράς θερμότητας που κυκλοφορεί μέσα στο σωλήνα. Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας αποτελεί συνήθως το συνθετικό λάδι (Garcia-rodriguez et al., 2002).

Οι παραβολικοί συλλέκτες απαιτούν ηλιοπαρακολούθηση κατά μήκος ενός μόνο άξονα. Με αυτόν τον τρόπο, ο σωλήνας – δέκτης επιτυγχάνει μια πολύ υψηλότερη θερμοκρασία συγκριτικά με τους επίπεδους συλλέκτες ή τους συλλέκτες κενού. Τα συστήματα παραβολικών συλλεκτών περιλαμβάνουν συνήθως και ένα μηχανικό σύστημα ελέγχου. Το σύστημα αυτό διατηρεί τον παραβολικό συλλέκτη συνεχώς στραμμένο προς τον ήλιο (Qiblawey & Banat, 2008).

Οι παραβολικοί συλλέκτες προτείνονται για τον ενεργειακό ανεφοδιασμό ενός σημαντικού αριθμού μεθόδων αφαλάτωσης. Η πλέον συνηθισμένη τους όμως εφαρμογή έγκειται στην θερμική απόσταξη. Αυτό συμβαίνει διότι οι μέθοδοι θερμικής απόσταξης επωφελούνται από την θερμότητα ή τον ηλεκτρισμό που παράγεται από παραβολικούς συλλέκτες. Ωστόσο, διαφορετικές μέθοδοι αφαλάτωσης επωφελούνται λίγο ή και καθόλου από την παραγόμενη θερμότητα (Qiblawey & Banat, 2008).

Για την αντιμετώπιση των διακυμάνσεων στην ηλιακή ακτινοβολία, απαιτείται η σωστή λειτουργία εντοπισμού του συστήματος των παραβολικών συλλεκτών. Η λειτουργία εντοπισμού αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο το ηλιακό διάφραγμα αλλάζει τον προσανατολισμό του, προκειμένου να ακολουθήσει την θέση του ηλίου. Η αλλαγή αυτή στον προσανατολισμό αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της ενέργειας που λαμβάνεται από το δέκτη του συλλέκτη. Η σχεδίαση των παραβολικών συλλεκτών επιτρέπει την ηλιοπαρακολούθηση κατά μήκος ενός μόνο άξονα. Για το σκοπό αυτό προσφέρονται δυο εναλλακτικές επιλογές: α) Η λειτουργία εντοπισμού Βορά – Νότου, β) Η λειτουργία εντοπισμού Ανατολής –Δύσης (Hassabou, Spinnler, & Polifke, 2013).

Συστήματα παραβολικών συλλεκτών συναντώνται σε διάφορα μέρη ανά τον κόσμο. Ενδεικτικά αναφέρουμε την ύπαρξη ενός τέτοιου συστήματος στην Ισπανία και συγκεκριμένα στην Plataforma Solar de Almeria. Στο σύστημα αυτό, ο παραβολικός συλλέκτης συνδέεται με μια μονάδα εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης (Garcia-rodriguez, 2002).

### **3.4.4 Ηλιακές λίμνες (Solar ponds)**

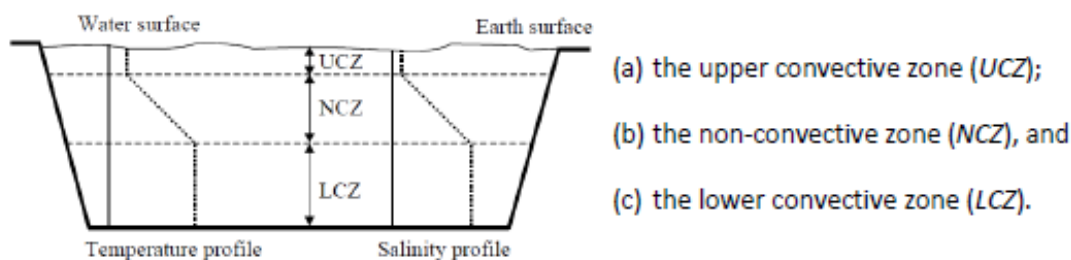
Η ιδέα της ηλιακής λίμνης έγκειται στην θέρμανση μιας μεγάλης λίμνης νερού. Η θέρμανση αυτή πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε να κατασταλούν οι ενδεχόμενες θερμικές απώλειες από συναγωγή ή ακτινοβολία, κατά την άνοδο του λιγότερο πυκνού θερμαινόμενου νερού, στην επιφάνεια της λίμνης. Οι ηλιακές λίμνες λειτουργούν ως ενεργειακοί συλλέκτες και αποθήκες θερμότητας (Kalogirou, 2005). Σε μια ηλιακή λίμνη σημειώνεται η ύπαρξη τριών διαφορετικών στρωμάτων (Al-Karaghoulis & Kazmerski, 2013):

1. Η άνω ζώνη αγωγής (Upper convecting zone - UCZ): Στη ζώνη αυτή έχουμε σχεδόν χαμηλή αλατότητα στην θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η ζώνη αυτή είναι πάχους 0.3 m και είναι αποτέλεσμα της εξάτμισης που προκαλείται από την ανάμιξη του ανέμου και την έκπλυση επιφανείας της λίμνης. Το πάχος της πρέπει να διατηρείται όσο το

δυνατόν λεπτότερο. Η διατήρηση αυτή πραγματοποιείται με την τοποθέτηση πλεγμάτων καταστολής επιφανειακών κυμάτων και διαλειμμάτων αέρα κοντά στη λίμνη.

2. Η μη ζώνη αγωγής (Non convecting zone - NCZ): Σε αυτήν τη ζώνη, η αλατότητα και η θερμοκρασία αυξάνονται με το βάθος. Η κατακόρυφη διαβάθμιση άλατος αναστέλλει τη συναγωγή και παρέχει την προαπαιτούμενη θερμική μόνωση. Η διαβάθμιση άλατος προκύπτει λόγω της ακτινοβολίας, που προσπίπτει στην επιφάνεια της λίμνης.
3. Η κάτω ζώνη αγωγής (Lower convecting zone - LCZ): Στη ζώνη αυτή σημειώνεται η ύπαρξη σχετικά σταθερής και υψηλής αλατότητας, σε υψηλή θερμοκρασία. Η θερμότητα που αποθηκεύεται στη ζώνη αυτή δύναται να καλύψει τις ετήσιες ενεργειακές ανάγκες του συστήματος αφαλάτωσης. Με αύξηση του βάθους, έχουμε αύξηση της θερμικής δυνατότητας και μείωση των ετήσιων θερμοκρασιακών διακυμάνσεων. Ωστόσο, η ύπαρξη μεγάλων βαθών αυξάνει τις αρχικές δαπάνες κεφαλαίου και απαιτεί μεγαλύτερους χρόνους ενεργειακής εκκίνησης.

Για την καταστολή τη φυσικής συναγωγής και τη δημιουργία της ηλιακής λίμνης, χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων περιγράφεται με τον όρο «διαστρωμάτωση άλατος». Ο όρος αυτός επεξηγείται ως εξής: Η αλατότητα αυξάνεται με το βάθος στη μη κινούμενη ζώνη, έως ότου τελικά να φτάσει εκείνη της κάτω κινούμενης ζώνης. Επιπροσθέτως, η ηλιακή ακτινοβολία είναι αυτή που θερμαίνει το νερό υψηλής αλατότητας. Το τελευταίο, εξαιτίας της υψηλής του σχετικά πυκνότητας, δεν μπορεί να ανέβει στα στρώματα χαμηλής αλατότητας. Με αυτόν τον τρόπο, ενισχύεται η αποθήκευση θερμότητας αλλά παρεμποδίζεται η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Για την ίδρυση μιας στρωματοποιημένης ηλιακής λίμνης χρησιμοποιούνται άλατα που είναι χημικά σταθερά ή οποιαδήποτε φυσική άλμη. Ωστόσο, το επιλεγόμενο άλας θα πρέπει να είναι ασφαλές στον χειρισμό, μη τοξικό, φθινό και άμεσα διαθέσιμο. Θα πρέπει επίσης να μη μειώνει τα χαρακτηριστικά μετάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της ηλιακής λίμνης. Τέλος, η διαλυτότητα του χρησιμοποιούμενου άλατος πρέπει να εξαρτάται από την θερμοκρασία (Kalogirou, 2005).



Σχήμα 3.1: Ηλιακή λίμνη με κλίμακα αλατότητας (Kalogirou, 2005)

Οι ηλιακές λίμνες χρησιμοποιούνται στην ενεργειακή παραγωγή πληθώρας εφαρμογών. Συγκεκριμένα, ηλιακές λίμνες μικρού μεγέθους βρίσκουν εφαρμογή στην θέρμανση χώρων αλλά και στην θέρμανση του νερού. Ηλιακές λίμνες μεγαλύτερου μεγέθους από την άλλη πλευρά, προτείνονται για την περίπτωση θερμικών διαδικασιών σε βιομηχανική κλίμακα, ηλεκτροπαραγωγής και αφαλάτωσης (Kalogirou, 2005).

α/α	Πλεονεκτήματα ηλιακών λιμνών	Μειονεκτήματα ηλιακών λιμνών
1	Η μεγάλη χωρητικότητα θερμικής αποθήκευσης των ηλιακών λιμνών φαίνεται χρήσιμη στην περίπτωση συνεχούς λειτουργίας των μονάδων εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης, απόσταξης πολλαπλής φάσης και θερμικής συμπίεσης ατμού (Al-Karaghoul & Kazmerski, 2013)	Οι απαιτήσεις συνεχούς ύπαρξης ηλιόλουστων συνθηκών και μεγάλων εκτάσεων επίπεδης γης (Li, Goswami, & Stefanakos, 2013)
2	Η άλμη που απορρίπτεται από τις μονάδες αφαλάτωσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή των ηλιακών λιμνών (Al-Karaghoul & Kazmerski, 2013)	Η πρόκληση σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων, λόγω διαρροών της άλμης (Li et al., 2013)
3	Στην περίπτωση που η ηλιακή λίμνη προορίζεται για ηλεκτροπαραγωγή, η απορριπτόμενη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια θερμική μονάδα αφαλάτωσης (Al-Karaghoul & Kazmerski, 2013)	
4	Η επιφάνεια των ηλιακών λιμνών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως νερό ψύξης, κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών (Al-Karaghoul & Kazmerski, 2013)	

Πίνακας 3.2: Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα ηλιακών λιμνών

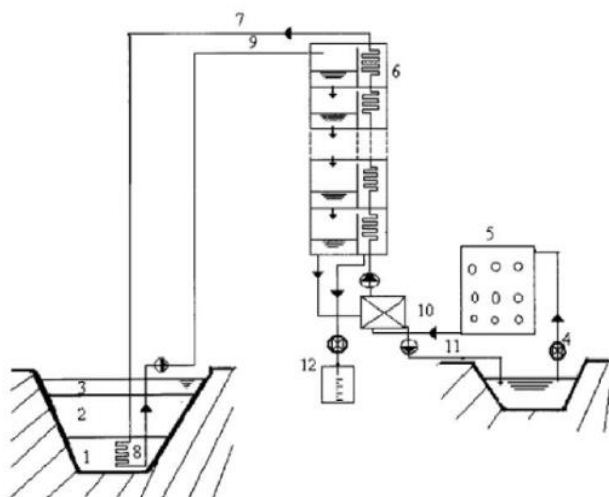
Οι Matz και Feist προτείνουν τις ηλιακές λίμνες σαν μια λύση στο πρόβλημα της απορριπτόμενης άλμης, στις εγχώριες μονάδες ηλεκτροδιάλυσης. Οι ίδιοι αναφέρουν ότι οι ηλιακές λίμνες προσφέρονται για την ενεργειακή τροφοδότηση μονάδων ηλεκτροδιάλυσης, καθώς βελτιώνουν την απόδοσή τους (Kalogirou, 2005).

#### 3.4.4.1 Απόσταξη πολλαπλής φάσης με ηλιακή λίμνη

Τα συστήματα απόσταξης πολλαπλής φάσης που συνδυάζονται με ηλιακές λίμνες, παρέχουν τη δυνατότητα παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων πόσιμου νερού. Η υπέρμετρη αυτή παραγωγή λαμβάνει χώρα σε μεγάλη κλίμακα και σε ανταγωνιστικές τιμές, συγκριτικά με τις συμβατικές μονάδες αφαλάτωσης των απομακρυσμένων και άγονων περιοχών (Posnansky, 1999).

Τα συστήματα αυτού του είδους αποτελούνται από τη συμβατική υπομονάδα αφαλάτωσης απόσταξης πολλαπλής φάσης, την υπομονάδα συλλογής ηλιακής ενέργειας και το σύστημα επεξεργασίας του υφάλμυρου ή θαλασσινού νερού. Στην περίπτωση μας, η ηλιακή λίμνη αποτελεί την υπομονάδα συλλογής ηλιακής ενέργειας. Στο σύστημα περιλαμβάνονται επίσης αντλίες διακίνησης, που παίρνουν συνήθως ενέργεια από κάποια γεννήτρια. Ωστόσο, υπάρχει και η δυνατότητα προσθήκης ενός βοηθητικού βραστήρα ατμού στις αντλίες διακίνησης. Ο βοηθητικός αυτός βραστήρας τροφοδοτείται από τη γεννήτρια ή από φυσικό αέριο (Posnansky, 1999). Η διάταξη του συστήματος παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 3.2 που ακολουθεί.





Σχήμα 3.2: Σύστημα απόσταξης πολλαπλής φάσης με ηλιακή λίμνη (Safi,1998)

α/α	Κατάλογος εξαρτημάτων μονάδας
1	Ζώνη αποθήκευσης
2	Ζώνη Μέσης Αλατότητας
3	Επιφανειακή Ζώνη
4	Υφάλμυρο νερό πρόσληψης
5	Επεξεργασία νερού
6	Μονάδα αφαλάτωσης απόσταξης πολλαπλής φάσης
7	Προθερμασμένο υφάλμυρο νερό
8	Εναλλάκτης θερμότητας
9	Υφάλμυρο νερό για απόσταξη
10	Απόρριψη άλμης
11	Απόσταγμα

Πίνακας 3.3: Κατάλογος εξαρτημάτων μονάδας (Safi,1998)

Οι εμπορικότερες μονάδες απόσταξης πολλαπλής φάσης λειτουργούν με θερμοκρασία κορυφαίας άλμης, στο εύρος των 90.0 – 110.0 °C. Η ηλιακή λίμνη, από την άλλη πλευρά, λειτουργεί στο εύρος των θερμοκρασιών 30 – 95 °C (Posnansky,1999).

Προκειμένου να καταστεί εφικτή η χρήση της ηλιακής λίμνης στο σύστημα απόσταξης πολλαπλής φάσης, πρέπει να έχει προηγηθεί λειτουργία προσαρμογής της για τουλάχιστον δύο χρόνια. Κατά την πάροδο αυτού του διαστήματος, η ηλιακή λίμνη αποκτά μια σταθερή θερμοκρασία στη ζώνη αποθήκευσης της. Με αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται η ισορροπημένη λειτουργία της. Η σταθερή θερμοκρασία διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης. Στην περίπτωση θερμοκρασιών μικρότερων από την παραπάνω προαναφερθείσα σταθερή θερμοκρασία, το σύστημα δε λειτουργεί αποδοτικά. Στην αντίθετη περίπτωση, σημειώνεται αύξηση των θερμικών απωλειών της ηλιακής λίμνης. Κατά συνέπεια, η θερμοκρασία της ζώνης αποθήκευσης της λίμνης εξαρτάται και από το ρυθμό εξαγωγής θερμότητας. Ο ρυθμός αυτός επηρεάζεται άμεσα από τη δυναμικότητα της μονάδας αφαλάτωσης. Άρα, το μέγεθος της ηλιακής λίμνης σε συνδυασμό με τη δυναμικότητα της μονάδας αφαλάτωσης καθορίζουν την αποδοτικότητα του ολικού συστήματος (Agha,2009).

Ακολουθεί αναφορά στο μεθοδολογικό πλαίσιο του συστήματος: Σε ένα πρώτο στάδιο, η ηλιακή λίμνη συλλέγει την ηλιακή ενέργεια στη ζώνη αποθήκευσης της και είναι υπεύθυνη για την θέρμανση του νερού. Στη συνέχεια, έχοντας το νερό στην κορυφαία θερμοκρασία



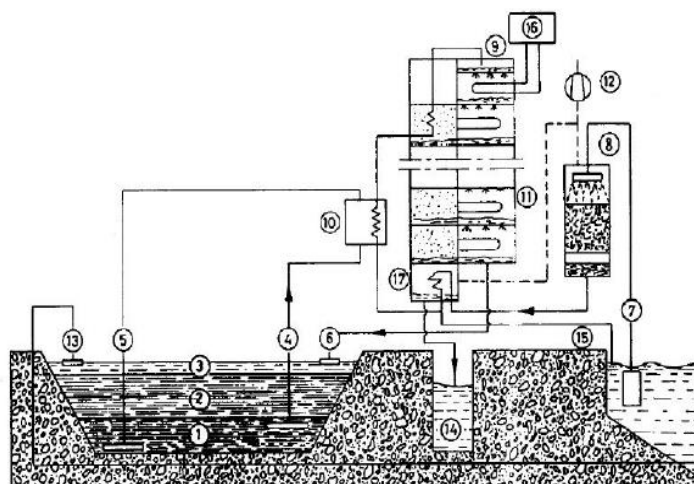
του ( $90^{\circ} - 110^{\circ}\text{C}$ ), αυτό εισέρχεται στην πρώτη βαθμίδα της μονάδας αφαλάτωσης. Ο ρυθμός εξάτμισης της διεργασίας απόσταξης πολλαπλής φάσης είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας της θερμικής ενέργειας, που παρέχεται από την ηλιακή λίμνη. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία της παρεχόμενης ενέργειας, τόσο υψηλότερα είναι τα ποσοστά εξάτμισης (Posnansky,1999).

Σε αυτήν την περίπτωση του συστήματος, η ηλιακή λίμνη δε συλλέγει απλώς την ηλιακή ενέργεια αλλά παράλληλα την αποθηκεύει. Η λειτουργία της ως δεξαμενή αποθήκευσης είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς είναι υπεύθυνη για την εξασφάλιση της ισορροπημένης λειτουργίας του. Αυτό συμβαίνει διότι τα συνδυασμένα συστήματα είναι δύσκολο να λειτουργήσουν με μια ισχυρή μεταβαλλόμενη πηγή ενέργειας, όπως είναι η φύση της ηλιακής ενέργειας, τόσο κατά τις νυχτερινές ώρες όσο και κατά τις ημέρες ελλειπούς ηλιοφάνειας (Posnansky,1999). Λόγω της ύπαρξης διακοπών στην ηλιακή ακτινοβολία, οι συμβατικές μονάδες απόσταξης πολλαπλής φάσης με σταθερά στόμια και ιχθυοφράγματα, για τον έλεγχο των πιέσεων μεταξύ των σταδίων, καθίστανται κατάλληλες (Li et al., 2013).

#### 3.4.4.2 Εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης με ηλιακή λίμνη

Ο συνδυασμός των ηλιακών λιμνών με τα συστήματα αφαλάτωσης εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης αποδεικνύεται αρκετά αποδοτικός, υπό την ύπαρξη συγκεκριμένων προϋποθέσεων. Στις προϋποθέσεις αυτές συμπεριλαμβάνεται η αντιστοίχιση των θερμοκρασιών της πηγής θερμότητας που παρέχονται από την ηλιακή λίμνη ( $60 - 75^{\circ}\text{C}$ ) και της απαιτούμενης των συστημάτων εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης ( $50 - 60^{\circ}\text{C}$ ). Επιπροσθέτως, τα ηλιακά συστήματα αυτού του τύπου εμφανίζουν μια εξαιρετική ευελιξία στις μεταβολές της παρεχόμενης ενέργειας. Επιπλέον, η λειτουργία τους παρουσιάζεται εξαιρετικά σταθερή, υπό την ύπαρξη μεταβαλλόμενων συνθηκών παρεχόμενης θερμότητας (Hawaj & Darwish,1994).

Η λειτουργία του συστήματος εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης, που υποβοηθείται από ηλιακή λίμνη, είναι παρόμοια με αυτή του συστήματος της απόσταξης πολλαπλής φάσης, που αναλύθηκε στην προηγούμενη Ενότητα 3.4.4.1. Παρόλα αυτά, η μικρότερη αναγκαία θερμοκρασία της εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης καθιστά ευκολότερη τη λειτουργία της ηλιακής λίμνης (Agha,2009). Στο παρακάτω Σχήμα 3.3 απεικονίζεται η ενδεικτική διάταξη του συστήματος εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης, που συνδυάζεται με ηλιακή λίμνη.



Σχήμα 3.3 Σύστημα εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης με ηλιακή λίμνη (Hawaj & Darwish,1994)

α/α	Κατάλογος εξαρτημάτων μονάδας
1	Ζώνη αποθήκευσης
2	Ζώνη Μέσης Αλατότητας
3	Επιφανειακή Ζώνη
4	Θερμικός βρόγχος (εξαγωγής)
5	Θερμικός βρόγχος (εισαγωγής)
6	Σύστημα έκπλυσης
7	Πρόσληψη θαλασσινού νερού
8	Προσθετικά εξαέρωσης
9	Πρώτη βαθμίδα
10	Ηλιακός θερμαντήρας
11	Βαθμίδες εξατμιστήρα
12	Σύστημα κενού
13	Επαναχρησιμοποίηση ροής
14	Απόσταγμα
15	Ψύξη νερού
16	Βοηθητικός προθερμαντήρας
17	Συμπυκνωτής κατακόρυφης ροής

Πίνακας 3.4: Κατάλογος εξαρτημάτων μονάδας (Hawaj & Darwish, 1994)

Η μονάδα εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης που λειτουργεί σε συνδυασμό με ηλιακή λίμνη, εμβαδού 30,000 – 40,000 m<sup>2</sup>, δύναται να παράγει 1,000,000 τόνους αποσταγμένου νερού το χρόνο. Το κόστος παραγωγής του αποσταγμένου νερού είναι αντίστοιχο των συμβατικών μονάδων αφαλάτωσης. Από την άλλη πλευρά, το κόστος παραγωγής πόσιμου νερού εξαρτάται από το κόστος του αλατιού. Στην περίπτωση αύξησης του μεγέθους της ηλιακής λίμνης σημειώνεται μείωση του (Sharon & Reddy, 2015).

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του συστήματος εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης που συνδυάζεται με ηλιακή λίμνη είναι η επανακυκλοφορία της άλμης. Στα συμβατικά συστήματα αφαλάτωσης, η εναπομένουσα άλμη απορρίπτεται στην θάλασσα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση συστήματος, η άλμη απορρίπτεται στην ηλιακή λίμνη. Με τον τρόπο αυτό διατηρούνται σταθερά όχι μόνο τα επίπεδα ισορροπίας άλατος αλλά και η θερμοκρασία της κάτω κινούμενης ζώνης της ηλιακής λίμνης (Hawaj & Darwish, 1994).

### 3.5 Απόσταξη πολλαπλής φάσης με ηλιακούς συλλέκτες

Τα ηλιακά συστήματα αφαλάτωσης που βασίζονται στην απόσταξη πολλαπλής φάσης, είναι παρόμοια με τα συμβατικά συστήματα θερμικής αφαλάτωσης. Η βασικότερη τους διαφορά έγκειται στην απαίτηση ηλιακών συλλεκτών, στην περίπτωση της ηλιακής απόσταξης πολλαπλής φάσης (Narayan et al., 2010).

Στην περίπτωση συστημάτων μεγάλης παραγωγικότητας που βρίσκονται σε άγονες περιοχές, ενδείκνυται η επιλογή των ηλιακών συλλεκτών ως πηγή ενέργειας του συστήματος απόσταξης πολλαπλής φάσης. Οι ηλιακοί συλλέκτες που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι οι παραβολικοί συλλέκτες. Λιγότερα συχνά συναντώνται οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες και οι συλλέκτες κενού. Εν τούτοις, υπάρχουν συστήματα που συνδυάζουν επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες και παραβολικούς συλλέκτες (Moustafa, Jarar & El – Nashy, 1985).

Το σύστημα απόσταξης πολλαπλής φάσης που συνδυάζεται με ηλιακούς συλλέκτες αποτελείται από τρία κύρια υποσυστήματα. Το πρώτο υποσύστημα είναι αυτό της συλλογής θερμότητας και αποτελείται από ηλιακούς συλλέκτες. Η θερμοκρασία λειτουργίας του συγκεκριμένου υποσυστήματος πρέπει να συμβαδίζει με τις απαιτήσεις του συστήματος απόσταξης πολλαπλής φάσης. Το δεύτερο και τρίτο υποσύστημα είναι

αυτό της θερμικής αποθήκευσης και απόσταξης πολλαπλής φάσης, αντίστοιχα (Moustafa, Jarar & El – Nashy, 1985).

Η μονάδα απόσταξης πολλαπλής φάσης είναι διασυνδεδεμένη με τα υποσυστήματα συλλογής και αποθήκευσης θερμότητας, μέσω του κύριου εναλλάκτη (θερμαντήρας άλμης). Το ζεστό νερό αντλείται από την επιφάνεια της δεξαμενής στον θερμαντήρα άλμης, μέσω της αντλίας θερμού νερού. Το ζεστό νερό αποδίδει κάποια από την θερμική του ενέργεια στην άλμη και τον κύριο εναλλάκτη θερμότητας και ρέει πίσω στη δεξαμενή αποθήκευσης. Ωστόσο, η ροή αυτή πραγματοποιείται προς τον πυθμένα της δεξαμενής. Το σύστημα αφαλάτωσης απόσταξης πολλαπλής φάσης αποτελείται από μια σειρά μονάδων εξατμιστήρων – συμπυκνωτών, μια αντλία νερού, μια αντλία κυκλοφορίας θαλασσινού νερού και ελεγκτήρες. Όσον αφορά το μεθοδολογικό πλαίσιο της διαδικασίας, αυτό αναφέρεται στη συνέχεια: Το θαλασσινό νερό θερμαίνεται στον κύριο εναλλάκτη (θερμαντήρας άλμης) και ρέει στους θαλάμους απόσταξης της πρώτης βαθμίδας. Στη συνέχεια, τμήμα του θερμασμένου θαλασσινού νερού εκτονώνεται και ο παραγόμενος υδρατμός συμπυκνώνεται στο εξωτερικό των σωλήνων του συμπυκνωτή της πρώτης βαθμίδας. Το γεγονός αυτό επιτυγχάνεται εφόσον ο υδρατμός διασχίσει πρώτα το πλέγμα αποθάμβωσης και απαλλαγεί από τα ανεπιθύμητα σταγονίδια εισερχόμενης άλμης. Με τον τρόπο αυτό, όταν ο υδρατμός έρχεται σε επαφή με τους ψυχρούς σωλήνες του συμπυκνωτή, χάνει όλη του την θερμότητα και συμπυκνώνεται στην εξωτερική τους επιφάνεια. Οι σωλήνες του συμπυκνωτή είναι γεμάτοι με το δροσερό νερό που ρέει εξωτερικά του κύριου εναλλάκτη. Το τμήμα του θαλασσινού νερού που απομένει ρέει στην επόμενη βαθμίδα, όπου η πίεση είναι μικρότερη. Κατά συνέπεια, εκτονώνεται επιπρόσθετη ποσότητα θαλασσινού νερού και δημιουργείται επιπλέον υδρατμός. Ο παραγόμενος υδρατμός συμπυκνώνεται. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στις επόμενες βαθμίδες. Ωστόσο, στην τελευταία βαθμίδα η θερμοκρασία της άλμης είναι χαμηλότερη (Moustafa, Jarar & El – Nashy, 1985).

Η ποσότητα της άλμης που εξέρχεται από την τελευταία βαθμίδα, απορρίπτεται ολόκληρη. Η ροή του θαλασσινού νερού εντός των σωλήνων του συμπυκνωτή, εξισορροπεί το σύνολο της απορριπτόμενης άλμης και της ροής του αποστάγματος. Η ενέργεια που απελευθερώνεται από το εκτονωμένο υγρό μεταφέρεται στους σωλήνες του συμπυκνωτή, μέσω του υδρατμού. Οι διάφορες βαθμίδες του συστήματος μονώνονται ανεξάρτητα ή μια από την άλλη και συνδέονται με σωληνώσεις ροής της άλμης και ψύξης του συμπυκνωτή. Στο σύστημα συμπεριλαμβάνεται επίσης απασερωτής και μονάδες χημικής προεργασίας και παροχής δοσολογίας χλωρίου (Moustafa, Jarar & El – Nashy, 1985).

Ενδεικτικές μονάδες απόσταξης πολλαπλής φάσης που συνδυάζονται με ηλιακούς συλλέκτες, δίνονται στον ακόλουθο Πίνακα 3.5. Στον ίδιο Πίνακα 3.5 παρουσιάζονται επίσης και μερικές από τις παραμέτρους απόδοσης των συγκεκριμένων μονάδων:

α/α	Τοποθεσία	Πηγή ενέργειας	Τύπος νερού τροφοδοσίας	Χωρητικότητα (m <sup>3</sup> /μέρα)
1	Μπέρκεν, Γερμανία	Ηλιακοί συλλέκτες	Θαλασσινό νερό (SW)	10.0
2	Νησί Λαμπεδούσα, Ιταλία	Ηλιακοί συλλέκτες		0.3
3	Μπάρι, Ιταλία	Ηλιακοί συλλέκτες	Θαλασσινό (SW) νερό	5.0

Πίνακας 3.5 : Ενδεικτικές εγκαταστάσεις ηλιακής απόσταξης πολλαπλής φάσης

Η απόδοση του προϊόντος απόσταξης πολλαπλής φάσης ενδέχεται να παρουσιάσει αύξηση, υπό τη μεταβολή κάποιων παραμέτρων που την επηρεάζουν. Η αύξηση αυτή μπορεί να σημειωθεί σαν αποτέλεσμα της συνεπακόλουθης αύξησης της θερμοκρασιακής διαφοράς, μεταξύ της ζεστής άλμης και της θερμοκρασίας εισόδου του θαλασσινού νερού.

Μια παροδική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε από τον Hanafi απέδειξε ότι η παραγωγή πόσιμου νερού αυξάνεται χρησιμοποιώντας το νερό, ως μέσο μεταφοράς θερμότητας, στους ηλιακούς συλλέκτες. Αύξηση στην παραγωγή πόσιμου νερού μπορεί επίσης να επιτευχθεί, μέσω της αύξησης του αριθμού των δεξαμενών αποθήκευσης αλλά και του όγκου τους (Sharon & Reddy, 2015).

Στα στοιχεία κόστους κεφαλαίου μιας αυτόνομης εγκατάστασης απόσταξης πολλαπλής φάσης συμπεριλαμβάνονται το κόστος κεφαλαίου των ηλιακών συλλεκτών, των φωτοβολταϊκών συστοιχιών, της θερμικής αποθήκευσης, της μπαταρίας, της τροφοδοτούμενης από ορυκτά καύσιμα γεννήτριας, της μονάδας αφαλάτωσης και της γεννήτριας ατμού. Τα λειτουργικά κόστη της μονάδας περιλαμβάνουν το χημικό κόστος, το κόστος συντήρησης και το κόστος του προσωπικού. Τα παραπάνω επιμέρους λειτουργικά κόστη αναπαριστούν μόνο το 20.0 % του συνολικού κόστους της μονάδας. Το νερό που παράγεται από ηλιακές εγκαταστάσεις απόσταξης πολλαπλής φάσης έχει μοναδιαίο κόστος στο εύρος των 1.0 – 5.0 \$/m<sup>3</sup>. Στις βασικότερες παραμέτρους που επηρεάζουν το παραπάνω κόστος συγκαταλέγονται η αναλογία απόδοσης (Performance Ratio - PR) και το ηλιακό κλάσμα της εγκατάστασης. Το ηλιακό κλάσμα αναπαριστά τις ενεργειακές ανάγκες της μονάδας αφαλάτωσης, ενώ η αναλογία απόδοσης την ποσότητα του παραγόμενου νερού σε λίβρες ανά 1000 Btu θερμικής ενέργειας (Ali et al., 2011).

Ο Block διαπίστωσε μέσω της έρευνας του ότι οι μονάδες απόσταξης πολλαπλής φάσης, που συνδέονται με ηλιακούς συλλέκτες, παράγουν 6.0 – 60.0 L(πόσιμου νερού)/m<sup>2</sup>/μέρα. Η ποσότητα αυτή ανταγωνίζεται τα 3.0 – 4.0 L(πόσιμου νερού)/m<sup>2</sup>/μέρα που παράγονται από τους ηλιακούς αποστακτήρες (Qiblawey & Banat, 2008).

### 3.6 Εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης με ηλιακούς συλλέκτες

Η πλειοψηφία των μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεων ηλιακής θερμικής ενέργειας, βασίζονται στην εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται εξαιτίας των πολύ χαμηλότερων θερμοκρασιών κορυφαίας άλμης, σε συνδυασμό με τη χαμηλή ειδική ενεργειακή κατανάλωση της μεθόδου (Ali et al., 2011).

Η εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης εμφανίζει ομοιότητες με τα συμβατικά συστήματα θερμικής αφαλάτωσης (όπως συμβαίνει και στην περίπτωση της απόσταξης πολλαπλής φάσης). Η διαφορά τους εντοπίζεται στην χρήση ηλιακών συλλεκτών, στην περίπτωση της εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης (Narayan et al., 2010).

Τα συστήματα αφαλάτωσης εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης που συνδυάζονται με ηλιακές υπομονάδες ενεργειακής παραγωγής, λειτουργούν με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Ο τρόπος λειτουργίας τους, στην εκάστοτε περίπτωση, εξαρτάται από το είδος της πηγής θερμότητας (El Nashar & Ali M., 2001).

Στην πρώτη κατηγορία συστημάτων συγκαταλέγονται αυτά που εκμεταλλεύονται μόνο την ηλιακή ενέργεια. Στην περίπτωση αυτή, η ενέργεια που εισέρχεται στην πρώτη βαθμίδα προέρχεται αποκλειστικά και μόνο από την θερμική ενέργεια, που παράγεται από συστοιχία θερμικών συλλεκτών. Οι αντλίες της διαρρύθμισης αυτής λειτουργούν με ηλεκτρισμό που παράγεται με τη σειρά του από φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επιπροσθέτως, υπάρχουν τα συστήματα που λειτουργούν μόνο μέσω της χρήσης καυσίμων. Σε αυτόν τον τύπο συστημάτων, οι αντλίες απορρόφησης θερμότητας παρέχουν όλη την θερμότητα που απαιτείται από τη μονάδα αφαλάτωσης. Τέλος, υπάρχουν και τα υβριδικά συστήματα, στα οποία η απαιτούμενη ενέργεια προέρχεται τόσο από τους ηλιακούς συλλέκτες όσο και από τις αντλίες απορρόφησης. Σε αυτήν την περίπτωση λειτουργίας, η αντλία θερμότητας λειτουργεί είτε σε 24ωρη βάση, συνεισφέροντας κατά 30.0 % στην παρεχόμενη ενέργεια, είτε διακοπτόμενα ανάλογα με τη διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας (El Nashar & Ali M., 2001).

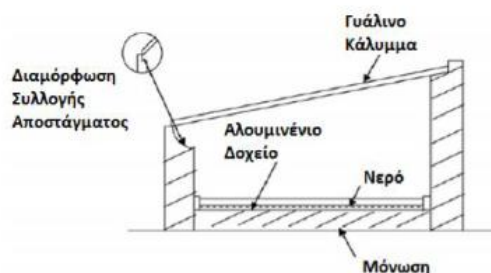
Οι Fiorenza et al. εξέτασαν το κόστος παραγωγής πόσιμου νερού από θαλασσινό, για την περίπτωση της εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης, που συνδέεται με ηλιακούς συλλέκτες.

Τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν από μονάδες δυναμικότητας μεταξύ των 500.0 και των 5,000.0 m<sup>3</sup>/μέρα, απέδειξαν το εξής: Το ζητούμενο κόστος ενδέχεται να σημειώσει μείωση, με αύξηση της δυναμικότητας της μονάδας αφαλάτωσης. Τα ενδεικτικά κόστη παραγωγής για τις παραπάνω δεδομένες δυναμικότητες αφαλάτωσης ανέρχονται στα 3.2 \$/m<sup>3</sup> και στα 2.0 \$/m<sup>3</sup>, αντίστοιχα (Qiblawey & Banat, 2008).

### 3.7 Άμεση ηλιακή θερμική απόσταξη/ηλιακοί αποστακτήρες (solar stills)

Η παρούσα εξεταζόμενη τεχνολογία χρησιμοποιείται εδώ και πολλές δεκαετίες. Το μεθοδολογικό της πλαίσιο στηρίζεται στις αρχές του φαινομένου του θερμοκηπίου. Συνοπτικά, ένας ηλιακός αποστακτήρας αποτελείται από μια ρηχή λεκάνη, που καλύπτεται από μια διάφανη οροφή και λειτουργεί ως συμπυκνωτής. Η ηλιακή ακτινοβολία παγιδεύεται στον αποστακτήρα, προκαλώντας την εξαέρωση του νερού (Ali et al., 2011).

Ο ηλιακός αποστακτήρας αποτελείται από μια αεροστεγή λεκάνη που είναι συνήθως κατασκευασμένη από σκυρόδεμα/τσιμέντο, γαλβανισμένο φύλλο σιδήρου ή πλαστικό ενισχυμένο με ίνες. Επίσης, διαθέτει ένα άνω κάλυμμα από διαφανή υλικά, όπως το γυαλί ή το πλαστικό. Η εσωτερική επιφάνεια της βάσης, γνωστή και ως επένδυση λεκάνης, είναι βαμμένη μαύρη. Ο χρωματισμός αυτός αποσκοπεί στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, που προσπίπτει στην επιφάνεια της βάσης. Το αλμυρό ή υφάλμυρο νερό που θα υποστεί επεξεργασία, εισέρχεται μέσα στη δεξαμενή, όπου εξατμίζεται από την ηλιακή ακτινοβολία που περνά μέσα από την οροφή. Οι υδρατμοί από πόσιμο νερό συμπυκνώνονται στην κορυφή του αποστακτήρα και κυλούν στα τοιχώματα του. Από το σημείο αυτό είναι δυνατή η συλλογή και απομάκρυνση τους. Ένα σχηματικό διάγραμμα ενός απλού ηλιακού αποστακτήρα απεικονίζεται στο Σχήμα 3.4 που ακολουθεί.



Σχήμα 3.4: Σχηματικό διάγραμμα απλού ηλιακού αποστακτήρα (EI - Ghonemy, 2012)

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλιακών αποστακτήρων. Σε αυτούς συγκαταλέγονται οι (EI - Ghonemy, 2012):

1. Οι συμβατικοί ηλιακοί αποστακτήρες,
2. Οι ηλιακοί αποστακτήρες ενιαίας κλίσης,
3. Οι ηλιακοί αποστακτήρες διπλού θαλάμου συμπύκνωσης,
4. Οι κάθετοι ηλιακοί αποστακτήρες,
5. Οι κωνικοί ηλιακοί αποστακτήρες,
6. Οι ηλιακοί αποστακτήρες ανεστραμμένης απορρόφησης και
7. Οι ηλιακοί αποστακτήρες πολλαπλής επίδρασης.

Ο βαθμός απόδοσης των ηλιακών αποστακτήρων προκύπτει από το πηλίκο της ενέργειας που χρησιμοποιείται στην ατμοποίηση του νερού στο εσωτερικό τους, προς την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει πάνω στο γυάλινο κάλυμμα τους (EI - Ghonemy, 2012). Η αποδοτικότητα των ηλιακών αποστακτήρων είναι μικρότερη του 50.0 %. Αναφέρουμε ενδεικτικά το γεγονός ότι χρησιμοποιούν λιγότερο από το 50.0 % της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (Kalogirou, 2005). Ωστόσο, ο τυπικός βαθμός απόδοσης τους αναφέρεται γύρω στο 35.0 % (EI - Ghonemy, 2012). Η μέση ημερήσια παραγωγή πόσιμου νερού μέσω αυτών, βρίσκεται στο εύρος των 4.0 – 6.0 L/μέρα (Al-Karaghoulis &



Kazmerski, 2013). Στην Ευρώπη, η μέση ημερήσια παραγωγή των ηλιακών αποστακτήρων είναι 3.0 – 4.0 L/m<sup>2</sup> (Salim, 2012).

Προκειμένου να σημειωθεί αύξηση στην αποδοτικότητα των ηλιακών αποστακτήρων, προτείνεται μια πληθώρα μορφολογικών τους τροποποιήσεων. Μια ενδεικτική τροποποίηση είναι αυτή της προσθήκης των ανιχνευτών ηλιακής ακτινοβολίας. Παρόλα αυτά, οι τροποποιήσεις αυτές είναι αναποτελεσματικές καθώς παρουσιάζουν μεγάλο κόστος. Εν τούτοις, ηλιακοί αποστακτήρες που είναι τοποθετημένοι υπό κλίση, παρουσιάζουν ενεργειακή αύξηση, της τάξης του 16.0 % (Kalogirou, 2005). Η σημαντικότερη απώλεια ενέργειας που σημειώνεται στο σύστημα του ηλιακού αποστακτήρα, είναι αυτή της ενεργειακά χαμηλής ακτινοβολίας. Η απώλεια αυτή λαμβάνει χώρα από την άλμη στο κάλυμμα του αποστακτήρα (Eltawil et al., 2009).

Οι ηλιακοί αποστακτήρες απαιτούν συνήθως συχνές εκπλύσεις επιφανείας, κατά τις νυχτερινές ώρες. Οι εκπλύσεις αυτές θεωρούνται προαπαιτούμενες καθώς παρεμποδίζουν την καταβύθιση άλατος. Τα προβλήματα που συναντώνται κατά τη σχεδίαση των ηλιακών αποστακτήρων είναι το βάθος της άλμης, η στεγανότητα ατμού του περιβλήματος, η ενδεχόμενη διαρροή κατά την απόσταξη του νερού, οι μέθοδοι θερμικής μόνωσης και η κλίση του άνω καλύμματος, το χρησιμοποιούμενο σχήμα και υλικό (El-Ghonemy, 2012).

Η απόδοση των ηλιακών αποστακτήρων επηρεάζεται σημαντικά από μετεωρολογικές παραμέτρους. Στις παραμέτρους αυτές συγκαταλέγονται η ταχύτητα του ανέμου, η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία του ουρανού και του περιβάλλοντος. Άλλες παράμετροι που επηρεάζουν την παραπάνω απόδοση είναι η συγκέντρωση άλατος, ο σχηματισμός φυκιών στο θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό που θα υποστεί απόσταξη και η δημιουργία μεταλλικών στρωμάτων στην επένδυση της λεκάνης (El-Ghonemy, 2012).

Στις εφαρμογές ηλιακών αποστακτήρων βρίσκει ευρεία εφαρμογή η χρήση μέσων αλλαγής φάσης ή λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης (Phase change or latent heat storage mediums - PCM). Στα πλεονεκτήματα των τελευταίων συγκαταλέγονται η μεγαλύτερη ικανότητα ενεργειακής αποθήκευσης ανά μονάδα όγκου και η διατήρηση σχεδόν σταθερών θερμοκρασιών για την φόρτιση – αποφόρτιση της ενέργειας (Viebahn, Lechon, & Trieb, 2011).

Οι ηλιακοί αποστακτήρες αποτελούν ένα από τα φθηνότερα συστήματα αφαλάτωσης. Το πόσιμο νερό που παράγεται μέσω αυτών, έχει μοναδιαίο κόστος στο εύρος των 1.3 - 6.5 \$/m<sup>3</sup> (Al-Karaghoulis & Kazmerski, 2013).

Το σημαντικότερο μειονέκτημα των ηλιακών αποστακτήρων είναι η απώλεια ενέργειας, στη μορφή της λανθάνουσας θερμότητας συμπύκνωσης. Για την επίλυση του προαναφερθέντος προβλήματος, οι Mathioulakis et al. προτείνουν την ανάπτυξη της ηλιακής υγροποίησης – αφυγροποίησης (Subramani et al., 2011). Ένα επιπλέον τους μειονέκτημα είναι η προαναφερθείσα χαμηλή τους απόδοση. Εξαιτίας αυτής της χαμηλής απόδοσης απαιτούνται και μεγάλες εκτάσεις επίπεδου εδάφους (El-Ghonemy, 2012).

### **3.8 Τεχνολογίες ηλιοθερμικής συγκέντρωσης (Concentrating solar thermal power technologies - CSP)**

Οι μονάδες ηλιοθερμικής συγκέντρωσης συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία και τη μετατρέπουν στη συνέχεια σε θερμότητα. Οι τεχνολογίες του συγκεκριμένου είδους βρίσκουν εφαρμογή στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω τουρμπίνων ατμού ή αερίου καθώς και μηχανών Stirling. Ως εκ τούτου, αποτελούνται από δύο τμήματα: α) Το ηλιακό τμήμα και β) Το συμβατικό μπλοκ ισχύος. Την κυριότερη ενεργειακή τους πηγή αποτελεί η άμεση κανονική ακτινοβολία (Direct Normal Irradiation - NI), που προσπίπτει κάθετα σε μια επιφάνεια. Η προαναφερθείσα επιφάνεια είναι τοποθετημένη με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να παρακολουθεί συνεχώς τον ήλιο. Ωστόσο, το μεγαλύτερο δυναμικό



των τεχνολογιών ηλιοθερμικής συγκέντρωσης συναντάται στη «ζώνη του ηλίου» (Viebahn et al., 2011).

Στις τέσσερις βασικότερες τεχνολογίες ηλιοθερμικής συγκέντρωσης συγκαταλέγονται οι παραβολικοί συλλέκτες, το γραμμικό κάτοπτρο Fresnel, οι πύργοι ισχύος και ο κινητήρας πιάτου. Ωστόσο, ο παραβολικός συλλέκτης είναι αυτός που κρίνεται καταλληλότερος, στην περίπτωση συνδυασμού του με τις τεχνολογίες παραγωγής πόσιμου νερού (Al-Karaghoul & Kazmerski, 2013). Οι δυο κύριες διαδικασίες αφαλάτωσης που συνδυάζονται με τεχνολογίες ηλιοθερμικής συγκέντρωσης είναι η εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης και η αντίστροφη όσμωση. Εν τούτοις, ο δεύτερος συνδυασμός είναι αυτός που οδηγεί σε μείωση του κόστους των τεχνολογιών ηλιοθερμικής συγκέντρωσης (Hassabou et al., 2013).

Οι τέσσερις προαναφερθείσες τεχνολογίες ηλιοθερμικής συγκέντρωσης συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε έναν απορροφητικό σωλήνα (δέκτη). Ο δέκτης αυτός περιέχει ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας όπως το νερό, το λάδι ή το αλάτι. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το νερό στην θέση του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, η θερμότητα που παράγεται από την ηλιακή ακτινοβολία, μετατρέπει το νερό σε ατμό, μέσω της άμεσης παραγωγής ατμού. Για τις περιπτώσεις του λαδιού ή του αλατιού, το ρευστό μεταφοράς θερμότητας συμπεριφέρεται σαν ενδιάμεσος θερμικός φορέας ενέργειας, περνώντας μέσα από διαφορετικούς εναλλάκτες θερμότητας. Κατά το πέρασμα μέσα από αυτούς τους διαφορετικούς εναλλάκτες, το νερό μετατρέπεται τελικά σε ατμό (Compain, 2012).

Οι γραμμικοί ανακλαστήρες Fresnel αποτελούν την πλέον υποσχόμενη τεχνολογία ηλιοθερμικής συγκέντρωσης καθώς εμφανίζουν μια σειρά ανταγωνιστικών πλεονεκτημάτων. Καταρχάς, η διαδικασία κατασκευής τους δεν απαιτεί μεγάλη ακρίβεια, κατά την κάμψη των κατόπτρων. Συνεπώς, το κόστος προμήθειας τους είναι μικρό. Επιπροσθέτως, η δομή και ο εξοπλισμός τους είναι κατά πολύ ελαφρύτερος σε σχέση με τους παραβολικούς συλλέκτες. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται, για μια ακόμη φορά, μείωση του κόστους προμήθειας τους, δεδομένου βέβαια ότι η τοποθεσία παρασκευής τους βρίσκεται κοντά στην τοποθεσία της εγκατάστασης αφαλάτωσης (Compain, 2012).

Οι τεχνολογίες ηλιοθερμικής συγκέντρωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό της συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Η συμπαραγωγή αυτή αποτελεί την πλέον ενδιαφέρουσα εφαρμογή των συγκεκριμένων τεχνολογιών, για το λειτουργικό προσρόφησης ψύξης και τις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης (Viebahn et al., 2011).

Οι τεχνολογίες ηλιοθερμικής συγκέντρωσης αποτελούν μια ελκυστική επιλογή, στην περίπτωση ενεργειακής τροφοδότησης μονάδων αφαλάτωσης, βιομηχανικής κλίμακας. Χώρες όπως η Ιορδανία, η Σαουδική Αραβία, η Αίγυπτος και τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, έχουν ήδη αναπτύξει μεγάλα έργα, που βασίζονται στη συγκεκριμένη τεχνολογία. Το σύστημα ηλιοθερμικής ενέργειας, που προορίζεται για τη συνδυασμένη παραγωγή ενέργειας και νερού, δύναται να αποτελέσει μια ελκυστική επιλογή, στην περίπτωση συνεχούς λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης. Η ικανότητα της συγκεκριμένης τεχνολογίας να αποθηκεύει θερμότητα και να ενσωματώνεται με εφεδρικό σύστημα, αυξάνει την αξιοπιστία της και την καθιστά την πλέον κατάλληλη για εφαρμογές αφαλάτωσης μεγάλης κλίμακας (Iaquaniello, Salladini, Mari, Mabrouk, & Fath, 2014).

Στις χώρες της Νότιας Ευρώπης, οι τεχνολογίες ηλιοθερμικής συγκέντρωσης αποτελούν μια υψηλή δυνητική πηγή, για τη διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας και την αύξηση του μεριδίου των εγχώριων πηγών στον ενεργειακό ανεφοδιασμό. Ωστόσο, η τρέχουσα κατάσταση των τεχνολογιών ηλιοθερμικής συγκέντρωσης, χαρακτηρίζεται από εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες παραβολικών συλλεκτών. Στην Ισπανία, συναντώνται μονάδες ηλιοθερμικής συγκέντρωσης που αποτελούνται από παραβολικούς συλλέκτες. Στο Ηνωμένο Βασίλειο, οι συγκεκριμένες τεχνολογίες βρίσκονται ακόμη υπό κατασκευή. Όσον

αφορά τους πύργους ισχύος, αυτοί βρίσκονται ακόμη σε φάση επίδειξης (Viebahn et al., 2011).

Στα πλαίσια εύρεσης των υφιστάμενων συνδυασμών μεταξύ των τεχνολογιών ηλιοθερμικής συγκέντρωσης και των μονάδων αφαλάτωσης, έχουν δημοσιευτεί αρκετές εργασίες. Οι Trieb et al. διερεύνησαν τη δυνατότητα συνδυασμού της ηλιακής ενέργειας με μονάδες αφαλάτωσης, για τις περιοχές της Μεσογείου, της Μέσης Ανατολής και της Βόρειας Αφρικής (περιοχή MENA – Middle East and North Africa) (Palenzuela, Zaragoza, Alarcón-Padilla, & Blanco, 2013). Στις προαναφερθείσες περιοχές σημειώνεται η ύπαρξη τεράστιων ηλιακών πόρων και γης (Palenzuela, Zaragoza, Alarcón, & Blanco, 2011). Οι παραπάνω αναφερόμενοι συγγραφείς καταλήγουν τελικά στο συμπέρασμα ότι η αφαλάτωση θαλασσινού νερού, που βασίζεται στην ηλιοθερμική ενέργεια, προσφέρει εφικτά, βιώσιμα και ασφαλή δυναμικά πόσιμου νερού. Τα δυναμικά αυτά είναι αρκετά μεγάλα, με αποτέλεσμα να είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν τα αυξανόμενα ελλείμματα πόσιμου νερού, στην περιοχή της Μεσογείου και της περιοχής MENA (Palenzuela et al., 2013).

Ο Schmitz προτείνει μια ανάλυση που αποτελείται από μοντέλα προσομοίωσης. Η συγκεκριμένη ανάλυση αφορά τις ενεργειακές μονάδες παραβολικών συλλεκτών, που συνδυάζονται με την εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης και την αντίστροφη όσμωση. Μέσω της έρευνας του, ο συγγραφέας καταλήγει στο εξής συμπέρασμα: Η αντίστροφη όσμωση προσφέρεται σε μεγαλύτερο βαθμό για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού, όταν συνδυάζεται με μονάδες παραβολικών συλλεκτών (Palenzuela et al., 2013).

Το ερευνητικό έργο με κωδικό όνομα «MATS» (Multipurpose Applications by Thermodynamics Solar), χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και έχει στόχο να καταδείξει το οικονομικό ενδιαφέρον της ηλιοθερμικής τεχνολογίας, στην περίπτωση μικρών/μεσαίων εγκαταστάσεων, πολλαπλών χρήσεων. Στις προαναφερθείσες πολλαπλές χρήσεις συμπεριλαμβάνονται η παραγωγή πόσιμου νερού, ενέργειας, ψύξης και θέρμανσης, μέσω εφεδρικών πηγών ενέργειας (ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ορυκτά καύσιμα) (Iaquaniello et al., 2014).

Οι κύριες προδιαγραφές του έργου με κωδική ονομασία «MATS» παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6, που ακολουθεί:

α/α	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	1.0 MWe
1	Θερμική ισχύς εξόδου	4.0 MWth
2	Θερμική ισχύς εισόδου	5.7 MWth
3	Δυναμικότητα μονάδας αφαλάτωσης	250 m <sup>3</sup> /μέρα

Πίνακας 3.6: Κύριες προδιαγραφές του έργου «MATS» (Iaquaniello, Salladini, Mari, Mabrouk, & Fath, 2014)

Όσον αφορά το μεθοδολογικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «MATS», η μονάδα εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης βασίζεται σε δύο μόνο επιδράσεις. Ο μικρός αριθμός επιδράσεων οφείλεται στην ανάγκη να καταδειχθεί η εφικτότητα της παραγωγής πολλαπλών χρήσεων των τεχνολογιών ηλιοθερμικής συγκέντρωσης. Σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό της μονάδας αφαλάτωσης, αυτή τροφοδοτείται με ατμό, που παραλαμβάνεται από τουρμπίνα, μεγέθους παραγωγής 1.0 MWe. Καθώς ο ατμός εξέρχεται από την τουρμπίνα, τροφοδοτεί την πρώτη επίδραση σε θερμοκρασία 69 °C, προκειμένου να αποφευχθεί η εναπόθεση αλάτων και η ύπαρξη κλιμακωτών φαινομένων. Λόγω του γεγονότος ότι η προτεινόμενη πιλοτική εγκατάσταση

βρίσκεται μακριά από την θάλασσα, η μονάδα πρέπει να τροφοδοτείται με υφάλμυρο νερό καλής ποιότητας. Ωστόσο, το ζητούμενο υφάλμυρο νερό δε βρίσκεται σε αφθονία στην επιλεγμένη θέση της μονάδας (Iaquaniello, Salladini, Mari, Mabrouk, & Fath, 2014).

### **3.8.1 Αντίστροφη όσμωση με τεχνολογίες ηλιοθερμικής συγκέντρωσης**

Η θερμότητα που παράγεται από τις εγκαταστάσεις ηλιοθερμικής συγκέντρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας, στην οδήγηση των αντλιών αντίστροφης όσμωσης (Al-Karaghoul & Kazmerski, 2013). Η μονάδα ηλιοθερμικής αντίστροφης όσμωσης αποτελεί την απλούστερη επιλογή για την ταυτόχρονη παραγωγή νερού και ηλεκτρισμού (Palenzuela et al., 2013). Η παραπάνω πρόταση επιβεβαιώνεται από την Εταιρεία Bechtel Power. Η ίδια αναφέρει χαρακτηριστικά ότι η σύζευξη των δυο συγκεκριμένων τεχνολογιών είναι αποτελεσματικότερη της ηλιοθερμικής εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης. Επιπροσθέτως, απαιτείται μικρότερα ενεργειακά ποσά για τη διεκπεραίωση της (Al-Karaghoul & Kazmerski, 2013).

### **3.8.2 Εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης με τεχνολογίες ηλιοθερμικής συγκέντρωσης**

Μια τυπική διαμόρφωση παραβολικών συλλεκτών μπορεί να συνδυαστεί με ένα σύστημα εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης. Στο σύστημα αυτό, ο ατμός (υπέρθερμος ατμός γύρω στους 380 °C) που παράγεται από τον παραβολικό συλλέκτη, αναλώνεται αρχικά σε μια τουρμπίνα. Στη συνέχεια, βρίσκει εφαρμογή στην αφαλάτωση (Al-Karaghoul & Kazmerski, 2013). Η σύζευξη των δυο παραπάνω τεχνολογιών αποτελεί μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική, καθώς επιτρέπει την αντικατάσταση της συμβατικής μονάδας ψύξης του κύκλου ισχύος. Η αντικατάσταση αυτή καθίσταται εφικτή, μέσω της χρήσης του ατμού που εξατμίζεται, σαν την θερμική πηγή της μονάδας αφαλάτωσης. Με αυτόν τον τρόπο, η ενέργεια που διαφορετικά θα διαχεόταν στην ψύξη του κύκλου ισχύος, χρησιμοποιείται στην παραγωγή πόσιμου νερού (Palenzuela et al., 2013).

Η απόδοση των μονάδων εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης επιδέχεται αύξηση, μέσω χρησιμοποίησης της θερμικής συμπίεσης ατμού, που οδηγείται από τον ατμό υψηλής θερμοκρασίας. Η μονάδα θερμικής συμπίεσης ατμού – εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης συνδυάζεται με τη μονάδα ηλιοθερμικής συγκέντρωσης, χρησιμοποιώντας τον ατμό υψηλής θερμοκρασίας, που εξάγεται από την τουρμπίνα ατμού ή από το ηλιακό πεδίο (Palenzuela et al., 2011).

Η σύζευξη των τεχνολογιών ηλιοθερμικής συγκέντρωσης με την εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης αποτελεί μια ώριμη τεχνολογία. Παρόλα αυτά, δεν μπορεί να ανταγωνιστεί τις υπόλοιπες συμβατικές τεχνολογίες αφαλάτωσης (προς το παρόν τουλάχιστον), χωρίς την ύπαρξη περαιτέρω βελτιώσεων (Al-Karaghoul & Kazmerski, 2013).

## **3.9 Ηλιακή υγροποίηση – αφυγροποίηση**

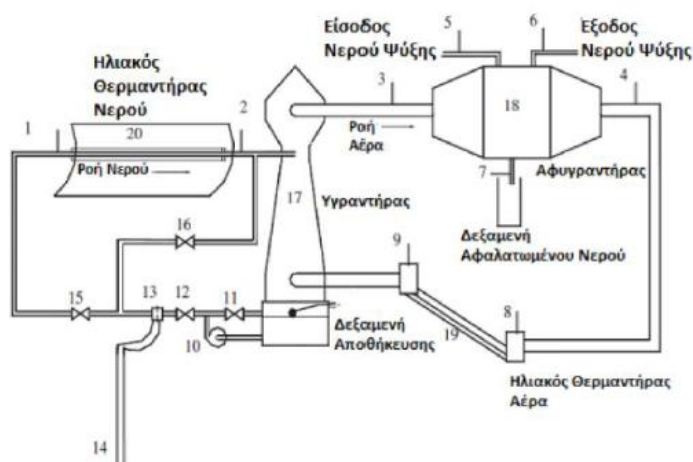
Η ηλιακή υγροποίηση συγκαταλέγεται στις μεθόδους άμεσης ηλιακής αφαλάτωσης (Ali et al., 2011). Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί την ευρέως χρησιμοποιούμενη διαδικασία ηλιακής αφαλάτωσης. Αυτό συμβαίνει διότι η συγκεκριμένη μέθοδος εμφανίζει μια σειρά ανταγωνιστικών πλεονεκτημάτων έναντι των υπολοίπων διαδικασιών. Στα πλεονεκτήματα της συγκαταλέγεται η δυνατότητα διατήρησης της ατμοσφαιρικής πίεσης. Κατά συνέπεια, εξασφαλίζεται η μεγαλύτερη αξιοπιστία και ανθεκτικότητα της μεθόδου. Επιπροσθέτως, η ηλιακή υγροποίηση – αφυγροποίηση παράγει πόσιμο νερό σε υψηλότερους ρυθμούς σε σχέση με τους ηλιακούς αποστακτήρες, υπό την επήρεια παρόμοιας ηλιακής ακτινοβολίας. Επιπλέον, στην ηλιακή υγροποίηση – αφυγροποίηση αποφεύγεται η άμεση επαφή ανάμεσα στο συλλέκτη και το υφάλμυρο νερό τροφοδοσίας (Franchini & Perdichizzi, 2014).

Η αρχή της ηλιακής υγροποίησης – αφυγροποίησης αναπτύχθηκε στα πλαίσια εύρεσης λύσης στο βασικότερο πρόβλημα των ηλιακών αποστακτήρων. Για τις ανάγκες της παρούσας Ενότητας, αναφέρουμε απλά ότι το πρόβλημα αυτό έγκειται στην ενεργειακή απώλεια, με τη μορφή της λανθάνουσας θερμότητας συμπίκνωσης. Η ηλιακή υγροποίηση – αφυγροποίηση οδηγεί σε αύξηση της αποδοτικότητας της μονάδας

αφαλάτωσης. Ως εκ τούτου, θεωρείται η καταλληλότερη επιλογή στην περίπτωση ηλιακής αφαλάτωσης (Moumouh, Tahiri, & Salouhi, 2014).

Οι ηλιακοί συλλέκτες διαδραματίζουν ουσιαστικό ρόλο στη διαδικασία της υγροποίησης – αφυγροποίησης, καθώς υποκαθιστούν τον ήλιο στον φυσικό κύκλο. Στους καταλληλότερους για υγροποίηση – αφυγροποίηση ηλιακούς συλλέκτες, συγκαταλέγονται ο ηλιακός θερμαντήρας νερού και ο ηλιακός θερμαντήρας αέρα (Moumouh et al., 2014).

Το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος ηλιακής υγροποίησης – αφυγροποίησης απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5. Τα κύρια εξαρτήματα του είναι ο υγραντήρας (πύργος ψύξης - 17), ο αφυγραντήρας (εναλλάκτης νερού ψύξης - 18), ο θερμαντήρας (επίπεδος ηλιακός συλλέκτης) και ο θερμαντήρας νερού (συγκεντρωτικός συλλέκτης - 20). Το συνολικό σύστημα αποτελείται από δύο βρόχους. Ο ένας βρόχος είναι υπεύθυνος για την θέρμανση του νερού ενώ ο άλλος για την θέρμανση του αέρα. Στο βρόχο του νερού, το τελευταίο αντλείται από τη δεξαμενή αποθήκευσης μέσω μιας αντλίας (10) και διαχωρίζεται σε δύο κύρια ρεύματα, στο ρεύμα του δοκιμαστικού τομέα (12) και στο ρεύμα παράκαμψης (11). Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το νερό ρέει μέσω της γραμμής του ηλιακού θερμαντήρα κλείνοντας τη βαλβίδα ελέγχου (16) και ανοίγοντας τη βαλβίδα ελέγχου (15). Κατά τη διάρκεια της νύχτας, το νερό ρέει απευθείας μέσω του υγραντήρα, κλείνοντας τη βαλβίδα ελέγχου (15) και ανοίγοντας τη βαλβίδα ελέγχου (16). Η θερμή άλμη καταιονίζεται από την κορυφή του υγραντήρα. Το νερό πέφτει στη δεξαμενή αποθήκευσης που βρίσκεται στον πυθμένα του υγραντήρα. Από το σημείο αυτό, χρησιμοποιείται για την επανακυκλοφορία του. Εξαιτίας αυτής της επανακυκλοφορίας, μειώνονται οι θερμικές απώλειες. Στο βρόχο του αέρα, ο αέρας αντλείται από τον πυθμένα του υγραντήρα, χρησιμοποιώντας έναν αξονικό ανεμιστήρα. Ο ανεμιστήρας αυτός εγκαθίσταται στην κορυφή του υγραντήρα. Ο αέρας ρέει μέσω του υγραντήρα, μεταφέροντας το εξατμισμένο νερό στον αφυγραντήρα. Στον αφυγραντήρα σημειώνεται ψύξη και αφύγρανση του αέρα. Χρησιμοποιώντας έναν αξονικό ανεμιστήρα που είναι τοποθετημένος στο εξωτερικό του αφυγραντήρα, ο αέρας τροφοδοτείται πίσω στον υγραντήρα, εφόσον υποστεί θέρμανση από τον ηλιακό θερμαντήρα αέρος (19) (Nafey, Fath, Soliman & El-Helaby, 2004).



Σχήμα 3.5: Σχηματικό διάγραμμα της ηλιακής υγροποίησης – αφυγροποίησης (Nafey, Fath, Soliman & El-Helaby, 2004)

Ο ηλιακός θερμαντήρας νερού είναι ένας ηλιακός συγκεντρωτικός συλλέκτης, που αποτελείται από ένα κατοπτρικό πλαίσιο παραβολικού σχήματος και χρησιμοποιείται στην θέρμανση της άλμης. Ο ηλιακός θερμαντήρας αέρα, από την άλλη πλευρά, είναι ένας επίπεδος ηλιακός συλλέκτης, ο οποίος χρησιμοποιείται στην θέρμανση του αέρα. Ο συλλέκτης του τελευταίου τύπου δε διαθέτει σωλήνες ενώ αποτελείται από ένα γυάλινο περίβλημα. Όσον αφορά τον υγραντήρα, αυτός είναι ένας πύργος ψύξης με τεχνητούς ανεμιστήρες. Ουσιαστικά λειτουργεί σαν μια στήλη ύφανσης με άμεση επαφή υγρού και



αέρα. Στο πάνω μέρος του διαθέτει ακροφύσια που ψεκάζουν με ζεστό νερό. Μορφολογικά διαθέτει και μια μεγάλη επιφάνεια συναγωγής, για μεγαλύτερη επαφή μεταξύ του υγρού και του αέρα. Έπειτα, ο αφυγραντήρας που χρησιμοποιείται στη διάταξη είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας νερού ψύξης και αποτελείται από μια εκτεταμένη επιφάνεια πολλαπλής ροής πηνίου ψύξης. Το νερό ψύξης ρέει εντός των σωλήνων εκτεταμένης επιφανείας. Τέλος, στη συνολική διάταξη ηλιακής υγροποίησης - αφυγροποίησης σημειώνεται και η ύπαρξη μιας συσκευής μέτρησης. Η συσκευή αυτή ρυθμίζει τη ροή του νερού στο σύστημα, μέσω ενός βαθμονομημένου τετραχλωράνθρακα (Nafey, Fath, Soliman & El-Helaby).

Οι Al – Hallaj et al. ανέλαβαν τη διενέργεια μιας πειραματικής μελέτης πάνω σε μια μονάδα ηλιακής υγροποίησης – αφυγροποίησης. Στη μονάδα τους, ο αέρας ανακυκλώνεται με φυσική ή εξαναγκασμένη συναγωγή και υγροποιείται με ένα σταθερό ρυθμό νερού. Ο ρυθμός αυτός αποκτάται μέσω ενός συλλέκτη (εσωτερικού τύπου) ή ενός ηλεκτρικού θερμαντήρα (εξωτερικού τύπου). Στην περίπτωση του ηλεκτρικού θερμαντήρα, τα αποτελέσματα τους απέδειξαν μεγαλύτερη παραγωγικότητα πόσιμου νερού από τους ηλιακούς αποστακτήρες (Yuan et al., 2011). Στα αποτελέσματα της μελέτης τους συγκαταλέγεται επίσης και η μεγαλύτερη οικονομική αποδοτικότητα της μεθόδου ηλιακής υγροποίησης – αφυγροποίησης, σε σχέση με τις υπόλοιπες ηλιακές μεθόδους αφαλάτωσης. Στις παραμέτρους που επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση του συστήματος βρέθηκαν να συμπεριλαμβάνονται η αναλογία του ρυθμού ροής μάζας νερού – αέρα (Liquid/Gas) και η θερμοκρασία εισόδου του νερού στον αφυγραντήρα (Zamen, Amidpour, & Soufari, 2009).

Η παραγωγή πόσιμου νερού αυξάνεται με αύξηση στο ρυθμό ροής μάζας αέρα μέχρι ένα ορισμένο σημείο. Εάν από το σημείο αυτό συνεχίσουμε να αυξάνουμε το ρυθμό ροής μάζας αέρα, σημειώνεται μια αμυδρή μείωση στην παραγωγή πόσιμου νερού. Οι Dai και Zhang απέδειξαν το ίδιο ακριβώς φαινόμενο βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων που παρουσίασαν σε καμπύλες. Ο μέγιστος ρυθμός ροής μάζας αέρα εκτιμήθηκε στα 0.6 kg/s από τους Fath και Ghazy. Ακόμη, αύξηση του ρυθμού ροής μάζας του αέρα συνεπάγεται και μείωση της απόδοσης του αφυγραντήρα, για ένα συγκεκριμένο ρυθμό ροής μάζας νερού ψύξης (Yildirim & Solmuş, 2014).

Οι Nafey et al. προέβησαν σε θεωρητική και πειραματική διερεύνηση του συστήματος αφαλάτωσης ηλιακής υγροποίησης – αφυγροποίησης (Mohamed & El-Minshawy, 2009). Στη μελέτη τους χρησιμοποίησαν ένα θερμαντήρα αέρα επίπεδης πλάκας σε συνδυασμό με ένα παραβολικό ηλιακό θερμοσίφωνα (Yildirim & Solmuş, 2014). Τα αποτελέσματα του έργου τους απέδειξαν ότι η παραγωγικότητα της μονάδας ηλιακής υγροποίησης – αφυγροποίησης, επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από το ρυθμό ροής αέρα, το ρυθμό ροής του νερού ψύξης και τη συνολική προσπίπτουσα, κατά τη διάρκεια της ημέρας, ηλιακή ενέργεια (Mohamed & El-Minshawy, 2009). Οι συγγραφείς αναφέρουν ότι με αύξηση του ρυθμού ροής μάζας του αέρα και σταθερό ρυθμό ροής μάζας αέρα, η παραγωγή πόσιμου νερού μειώνεται (Yildirim & Solmuş, 2014). Υποδεικνύουν επίσης την παραγωγή 1.2 L (πόσιμου νερού)/h ή περίπου 9.0 L (πόσιμου νερού)/μέρα (Narayan et al., 2010). Ωστόσο, η επίδραση της ταχύτητας του αέρα στην όλη διαδικασία, θεωρείται αμελητέα (Yuan et al., 2011).

Έπειτα, οι Orfi et al. απέδειξαν θεωρητικά ότι η ημερήσια παραγωγή πόσιμου νερού, από τη μονάδα ηλιακής υγροποίησης – αφυγροποίησης, εξαρτάται από την αναλογία του αλμυρού νερού προς το ρυθμό ροής μάζας αέρα (Mohamed & El-Minshawy, 2009). Η αναλογία αυτή είναι σε κάθε περίπτωση σύμφωνη με τις υπάρχουσες περιβαλλοντικές συνθήκες (Ali et al., 2011). Στη μελέτη τους χρησιμοποίησαν ένα γενικό μοντέλο που βασίζεται στο ισοζύγιο μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Επιπροσθέτως, βελτιστοποίησαν τις λειτουργικές παραμέτρους του συστήματος αφαλάτωσης, προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη παραγωγικότητα πόσιμου νερού (Yildirim & Solmuş, 2014).

Ο Chafik εργάστηκε πάνω σε ένα νέο σύστημα ηλιακής υγραποίησης – αφυγραποίησης. Ο προαναφερθέν συγγραφέας σχεδίασε ένα σύστημα βηματικής απόσταξης, χρησιμοποιώντας έναν θερμαντήρα αέρα χαμηλού κόστους. Το παρόν εξεταζόμενο σύστημα λειτούργησε σε εργαστηριακό περιβάλλον, υπό την επήρεια τεχνητού φωτός. Η ημερήσια παραγωγή πόσιμου νερού ανερχόταν στα 400.0 L ημερησίως (Yildirim & Solmuş, 2014). Παρόλα αυτά, ο συγγραφέας αναφέρει ότι το κόστος του συστήματος του είναι αρκετά υψηλό, δεδομένου ότι οι ηλιακοί συλλέκτες συνιστούν το 40.0 % του συνολικού κόστους (Narayan et al., 2010).

Το 1993, ο Khedr διενήργησε μια επιπλέον μελέτη πάνω στο κόστος της ηλιακής υγραποίησης – αφυγραποίησης. Από το γράφημα που συμπεριλαμβάνεται στο ερευνητικό του έργο, εκλαμβάνεται ότι η συγκεκριμένη μέθοδος είναι οικονομικά αποδοτική για μεγάλες μονάδες αφαλάτωσης, μεγαλύτερα των 10.0 m<sup>3</sup>/μέρα. Μια προσεγγιστική τιμή για το κόστος παραγωγής πόσιμου νερού ανέρχεται στα 3.3 \$/m<sup>3</sup>, για μέγεθος μονάδας 10.0 m<sup>3</sup>/μέρα (Al-Hallaj et al., 2006).

### 3.10 Αφαλάτωση με φωτοβολταϊκά

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από έναν αριθμό φωτοβολταϊκών μονάδων, που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε συνεχές (DC) ηλεκτρικό ρεύμα. Η τάση και το ρεύμα του συστήματος επιδέχονται αύξηση, μέσω της σύνδεσης πολλαπλών κελιών σε σειρά ή παράλληλα, αντίστοιχα (Al-Karaghoul, Renne, & Kazmerski, 2010). Ο υπόλοιπος εξοπλισμός του συστήματος περιλαμβάνει συστοιχίες φωτοβολταϊκών, ρυθμιστές φόρτισης, μετατροπέα συνεχούς ρεύματος και συστοιχία μπαταριών (Gude, 2014). Οι μετατροπείς μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα, που παράγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα, σε εναλλασσόμενο ρεύμα, για την τροφοδοσία του φορτίου (Al-Karaghoul et al., 2010). Οι ρυθμιστές φόρτισης, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιούνται για την αποτροπή της υπερφόρτισης των μπαταριών (Al-Karaghoul & Kazmerski, 2013). Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αντλίες τροφοδοσίας για αφαλάτωση και για τεχνολογίες μεμβράνης κατά κύριο λόγο (Kelley & Dubowsky, 2013).

Υπάρχουν δύο κύριες διαδικασίες μεμβρανών που τροφοδοτούνται από φωτοβολταϊκά στοιχεία. Οι διαδικασίες αυτές είναι η αντίστροφη όσμωση και η ηλεκτροδιάλυση (Eltawil et al., 2009). Το κύριο πλεονέκτημα των συστημάτων αφαλάτωσης που συνδυάζονται με φωτοβολταϊκά είναι η ικανότητα ανάπτυξης μονάδων, μικρής κλίμακας. Η αντίστροφη όσμωση χρησιμοποιεί εναλλασσόμενο ρεύμα για τις αντλίες τροφοδοσίας. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι απαιτείται και η χρήση μετατροπέων DC/AC. Η ηλεκτροδιάλυση αντιθέτως, χρησιμοποιεί συνεχές ρεύμα για τα ηλεκτρόδια, στη στοίβα των κελιών. Συνεπώς, είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει τον ενεργειακό ανεφοδιασμό από τα φωτοβολταϊκά πάνελ χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις (Al-Karaghoul et al., 2010). Ωστόσο, το βασικότερο πρόβλημα των παραπάνω τεχνολογιών είναι το υψηλό κόστος και η τωρινή στάθμη διαθεσιμότητας των φωτοβολταϊκών κελιών (Eltawil et al., 2009).

Η επίπεδη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση ηλιοπαρακολούθησης αποτελεί μια από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται σήμερα, για την αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής των φωτοβολταϊκών. Η αύξηση της συλλεφθείσας ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες. Οι Abu – Khader et al. διενήργησαν μια πειραματική έρευνα, σχετικά με την επίδραση της χρήσης συστημάτων με δυο άξονες παρακολούθησης, στην ηλεκτρική παραγωγή του επίπεδου φωτοβολταϊκού συστήματος. Στόχος της έρευνας τους ήταν η αξιολόγηση της επίδοσης του τελευταίου, στις κλιματικές συνθήκες της Ιορδανίας. Τα πειράματά τους τελικά απέδειξαν μια αύξηση της τάξης του 30.0 – 45.0 %, στο σύστημα παρακολούθησης των αξόνων Βορά – Νότου (Al-Hallaj et al., 2006).

#### 3.10.1 Αντίστροφη όσμωση με φωτοβολταϊκά

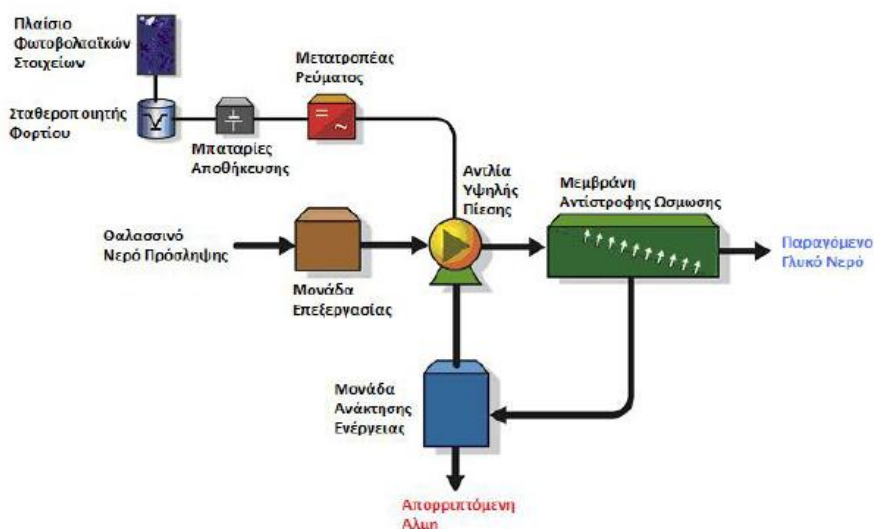
Η συγχώνευση της αντίστροφης όσμωσης με τα φωτοβολταϊκά αποτελεί έναν από τους πλέον υποσχόμενους συνδυασμούς αφαλάτωσης και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι συστημάτων αντίστροφης όσμωσης, που τροφοδοτούνται



από φωτοβολταϊκά. Ο πρώτος τύπος είναι αυτός της αντίστροφης όσμωσης υφάλμυρου νερού, που τροφοδοτείται από φωτοβολταϊκά. Ο δεύτερος τύπος είναι η αντίστροφη όσμωση θαλασσινού νερού, που αντλεί την απαιτούμενη ενέργεια λειτουργίας της από φωτοβολταϊκά. Ωστόσο, για την αφαλάτωση υφάλμυρου νερού απαιτείται χαμηλότερη οσμωτική πίεση. Ως εκ τούτου, απαιτούνται μικρότερες ενεργειακές ποσότητες καθώς και μια πολύ μικρότερη φωτοβολταϊκή γεννήτρια (Al-Karaghoul et al., 2010 - (Al-Karaghoul et al., 2010). Εξαιτίας των πολύ χαμηλότερων οσμωτικών πιέσεων, επιτρέπεται η χρήση φθηνών πλαστικών εξαρτημάτων. Στην αφαλάτωση υφάλμυρου νερού χρησιμοποιείται επίσης πλήθος διαφορετικών μεμβρανών. Το τελευταίο γεγονός συνεπάγεται την επίτευξη μεγαλύτερων λόγων ανάκτησης (Al-Karaghoul et al., 2010).

Η ποιότητα του παραγόμενου πόσιμου νερού βρίσκεται στο εύρος των 350.0 – 500.0 ppm και για τα δύο προαναφερθέντα είδη μονάδων αφαλάτωσης. Σύμφωνα με ισχύουσες δημοσιεύσεις, το κόστος παραγωγής πόσιμου νερού από θαλασσινό, ανέρχεται στα 7.98 \$/m<sup>3</sup>, για δυναμικότητα παραγωγής 12.0 m<sup>3</sup>/μέρα. Για μια μονάδα αφαλάτωσης δυναμικότητας 120.0 m<sup>3</sup>/μέρα, το αντίστοιχο κόστος ανέρχεται στα 29.0 \$/m<sup>3</sup>. Για μια μονάδα αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού, το κόστος παραγωγής πόσιμου νερού εκτιμάται γύρω στα 7.25 \$/m<sup>3</sup>, για δυναμικότητα παραγωγής 250.0 m<sup>3</sup>/μέρα (Al-Karaghoul et al., 2010).

Το σύστημα φωτοβολταϊκής αντίστροφης όσμωσης αποτελείται από δύο κύριες υπομονάδες. Οι υπομονάδες αυτές είναι η υπομονάδα παραγωγής ενέργειας και η υπομονάδα αφαλάτωσης. Στην υπομονάδα αφαλάτωσης συμπεριλαμβάνεται μια μεμβράνη διαχωρισμού, που τροφοδοτείται μέσω μιας παλινδρομικής αντλίας υψηλής πίεσης. Η αντλία αυτή είναι συνδεδεμένη με τέτοιο τρόπο με την υπομονάδα παραγωγής ενέργειας, έτσι ώστε να ανακτάται η ενέργεια από το ρεύμα της άλμης, που εγκαταλείπει το σύστημα. Το ρεύμα διηθήματος που αφήνει τη μεμβράνη, αποτελεί το καθαρό προϊόν του συστήματος. Η αντλία υψηλής πίεσης λειτουργεί μέσω ενός τριφασικού μοτέρ. Το μοτέρ αυτό λειτουργεί με ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από την υπομονάδα παραγωγής ενέργειας. Η τελευταία υπομονάδα αποτελείται από συστοιχίες φωτοβολταϊκών, συσσωρευτές αποθήκευσης, ελεγκτή φορτίου μπαταρίας και έναν αντιστροφέα συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (Al-Karaghoul et al., 2010). Στο Σχήμα 3.6 δίδεται το σχηματικό διάγραμμα της φωτοβολταϊκής αντίστροφης όσμωσης.



Σχήμα 3.6: Σχηματικό διάγραμμα της φωτοβολταϊκής αντίστροφης όσμωσης (Al-Karaghoul, Renne, & Kazmerski, 2010)

Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών, μετατρέπεται σε συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα και μεταφέρεται στον ελεγκτή φορτίου μπαταρίας. Ο ελεγκτής αυτός προστατεύει τις μπαταρίες από υπερφόρτωση ή υπερβολικές ενεργειακές απώλειες. Η ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη στις μπαταρίες δύναται να χρησιμοποιηθεί σαν εφεδρική πηγή ενέργειας, κατά τις περιόδους χαμηλής ηλιοφάνειας (Al-Karaghoul et al., 2010).

Η ημερήσια παραγωγή του συγκεκριμένου συνδυασμένου συστήματος δύναται να σημειώσει σημαντική αύξηση. Η αύξηση αυτή μπορεί να επιτευχθεί μέσω της εκμετάλλευσης των συμπληρωματικών χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών πάνελ και των μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης. Η ψύξη των ηλιακών πάνελ και η χρήση του θερμαινόμενου νερού τροφοδοσίας της αντίστροφης όσμωσης, συνεπάγεται αύξηση στην ημερήσια παραγωγή του συστήματος. Συγκεκριμένα, η ψύξη των ηλιακών πάνελ οδηγεί σε αύξηση της ηλεκτρικής παραγωγής τους. Από την άλλη πλευρά, η χρήση του θερμαινόμενου νερού της αντίστροφης όσμωσης αυξάνει το ρυθμό ροής του πόσιμου νερού, κατά μήκος της μεμβράνης αντίστροφης όσμωσης. Αύξηση στην ηλεκτρική παραγωγή των φωτοβολταϊκών πάνελ μπορεί επίσης να επιτευχθεί, μέσω της προσθήκη συγκεντρωτικών καθρεφτών. Ωστόσο, η προσθήκη συγκεντρωτικών καθρεφτών πραγματοποιείται μόνο με ψύξη των ηλιακών πάνελ (Kelley & Dubowsky, 2013).

Μονάδες αντίστροφης όσμωσης που συνδυάζονται με φωτοβολταϊκά στοιχεία, συναντώνται σε διάφορα μέρη ανά τον κόσμο (Al-Karaghoul & Kazmerski, 2013). Η πλειοψηφία των προαναφερθέντων μονάδων βρίσκεται σε αγροτικές περιοχές, με μικρές δυνατότητες αφαλάτωσης ( $1.0 - 5.0 \text{ m}^3/\text{μέρα}$ ) (Gude, 2014). Ωστόσο, στις περιοχές αυτές σημειώνεται η απαίτηση μεγάλων ποσοτήτων χημικών προϊόντων, ανταλλακτικών και καταρτισμένων εργαζομένων (Garcia-rodriguez, 2002). Ενδεικτικές εγκαταστάσεις του συγκεκριμένου τύπου έχουμε στην Ιορδανία, την έρημο της Αιγύπτου και τις απομακρυσμένες κοινότητες της Αυστραλίας (Charcosset, 2009). Ένας αριθμός των παραπάνω μονάδων χρησιμοποιεί μπαταρίες ή εφεδρική ενέργεια για τη λειτουργία του συστήματος σε 24ωρη βάση (Al-Karaghoul & Kazmerski, 2013). Εν τούτοις, το σύστημα αντίστροφης όσμωσης που συνδυάζεται με φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορεί να καταστεί οικονομικά εφικτό για τις απομακρυσμένες περιοχές. Η οικονομική εφικτότητα μπορεί να επιτευχθεί μέσω του ενεργού ελέγχου των θερμοκρασιών των φωτοβολταϊκών πάνελ και του νερού τροφοδοσίας. Η οικονομική εφικτότητα μπορεί επίσης να διασφαλιστεί μέσω της χρήσης συγκεντρωτικών καθρεφτών (Kelley & Dubowsky, 2013).

Παρόλο που ο συνδυασμός των δύο επιμέρους τεχνολογιών είναι ιδιαίτερα απλός, οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες δυσχεραίνουν τη λειτουργία του συστήματος. Αυτό συμβαίνει διότι οι τελευταίες απαιτούν υψηλό κόστος κεφαλαίου και περιοδική συντήρηση. Στα ενδεχόμενα προβλήματα τους συμπεριλαμβάνονται η πρόωρη βλάβη τους, η διαρροή από μπαταρίες οξέος μολύβδου καθώς και το εύρος της αποδοτικότητας τους. Η τυπική απόδοση της μπαταρίας είναι γύρω στο  $75.0 - 80.0 \%$ . Εξαιτίας του τελευταίου γεγονότος, υποδεικνύεται η χρήση μεγαλύτερων φωτοβολταϊκών συστοιχιών, κατά  $20.0 - 25.0 \%$  (Gude, 2014).

Για τη μείωση του κόστους των συστημάτων αντίστροφης όσμωσης που συνδυάζονται με φωτοβολταϊκά στοιχεία, προτείνονται οι εξής μετατροπές (Gude, 2014):

1. Η κατασκευή φωτοβολταϊκών συστημάτων που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια αλλά απαιτούν μικρότερο αριθμό μπαταριών.
2. Η ανάπτυξη υβριδικών διαδικασιών για μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση (PV – RO/NF/UF).
3. Η υιοθέτηση μεταβλητής ταχύτητας θετικής μετατόπισης στις αντλίες ανάκτησης ενέργειας.

Η ελάχιστη ειδική ενεργειακή κατανάλωση της φωτοβολταϊκής αντίστροφης όσμωσης βρίσκεται στο εύρος των  $1.1 - 1.8 \text{ kWh/m}^3$ . Η προαναφερθείσα ειδική ενεργειακή

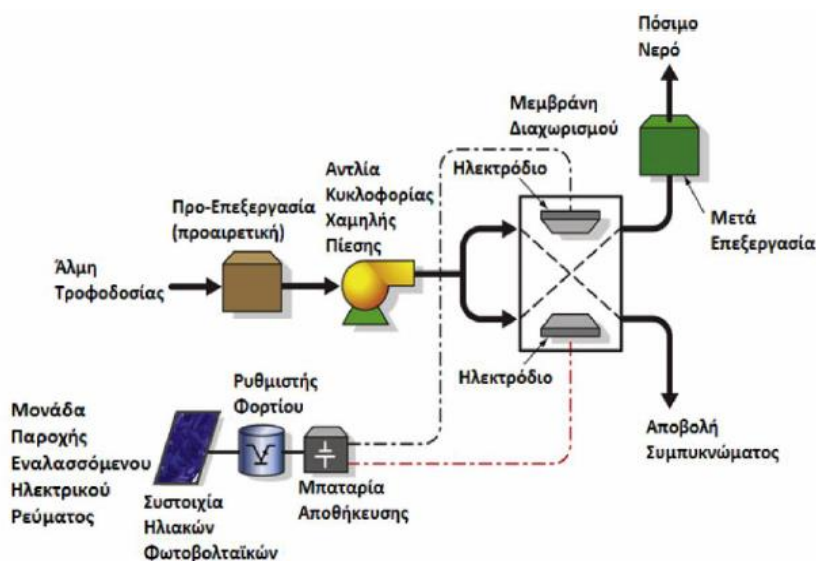
κατανάλωση είναι εξαρτώμενη από την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας αλλά και από την αποδοτικότητα της εκάστοτε τεχνολογίας μεμβρανών (Gude, 2014).

Το όφελος από την χρήση μπαταριών στο σύστημα της φωτοβολταϊκής αντίστροφης όσμωσης, διερευνήθηκε στην Ελλάδα. Το σύστημα που υπέστη μελέτη χρησιμοποιήθηκε στην αφαλάτωση νερού τροφοδοσίας των 35,000 ppm και διέθετε σύστημα ενεργειακής ανάκτησης. Ο μέσος ημερήσιος ρυθμός παραγωγής του και η μέση ειδική του ενεργειακή κατανάλωση αναφέρονται στα 8.0 m<sup>3</sup>/μέρα και 4.3 - 4.6 kWh/m<sup>3</sup>, αντίστοιχα. Ωστόσο, η χρήση μπαταριών δεν οδήγησε σε σημαντικές αυξήσεις στην παραγωγή πόσιμου νερού. Το κόστος παραγωγής πόσιμου νερού έχει καταγραφεί στα 7.8 \$/m<sup>3</sup>, χωρίς χρήση μπαταριών και στα 8.3 \$/m<sup>3</sup>, με χρήση μπαταριών (Ali et al., 2011).

### 3.10.2 Ηλεκτροδιάλυση με φωτοβολταικά

Η ηλεκτροδιάλυση που τροφοδοτείται από φωτοβολταϊκά στοιχεία, αποτελεί την πλέον ελκυστικότερη μέθοδο αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού, χαμηλής συγκέντρωσης. Ενδεικνυόμενες συγκεντρώσεις υφάλμυρου νερού κρίνονται αυτές που είναι μικρότερες των 2,500 ppm (Al-Karaghoulis & Kazmerski, 2013).

Κατά τη διεργασία αυτή, τα ιόντα μεταφέρονται μέσω μιας μεμβράνης. Η μεταφορά των ιόντων πραγματοποιείται από το ηλεκτρικό πεδίο, που εφαρμόζεται κατά μήκος της μεμβράνης. Μια μονάδα ηλεκτροδιάλυσης που συνδυάζεται με φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελείται από το σύστημα προ – επεξεργασίας, τη μεμβράνη διαχωρισμού, την αντλία κυκλοφορίας χαμηλής πίεσης, το σύστημα τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος και το σύστημα επεξεργασίας του παραγόμενου νερού. Στην προκειμένη περίπτωση, το σύστημα τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος αποτελεί η φωτοβολταϊκή συστοιχία (Al-Karaghoulis et al., 2010). Το σχηματικό διάγραμμα του συνδυασμένου συστήματος αφαλάτωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7 που ακολουθεί.



Σχήμα 3.7: Σχηματικό διάγραμμα φωτοβολταϊκής ηλεκτροδιάλυσης (Al-Karaghoulis et al., 2010)

Το μεθοδολογικό πλαίσιο του συστήματος επεξηγείται στη συνέχεια: Τα ηλεκτρόδια συνδέονται με μια εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος, σε ένα δοχείο αλμυρού νερού. Την εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος αποτελούν οι μπαταρίες ή τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται μέσω του διαλύματος, με τα ιόντα να τείνουν να μεταναστεύσουν στο ηλεκτρόδιο αντίθετου φορτίου. Η αλατότητα του νερού απομακρύνεται καθώς το νερό διέρχεται μέσα από τις μεμβράνες επιλεκτικού διαχωρισμού (Al-Karaghoulis et al., 2010).

Πιλοτικές μονάδες φωτοβολταϊκής ηλεκτροδίαλυσης, συναντώνται σε διάφορα μέρη ανά τον κόσμο (García-rodriguez, 2002). Ωστόσο, όλες οι εφαρμογές του συγκεκριμένου συνδυασμού τεχνολογιών είναι αυτόνομες (Al-Karaghoulí et al., 2010). Ακολουθεί αναφορά σε ενδεικτικές μονάδες του είδους (Ali et al., 2011):

1. Έρημος Ταρ, Ινδία (1.0 m<sup>3</sup>/μέρα, υφάλμυρο νερό)
2. Νησί Οσίμα, Ναγκασάκι (10.0 m<sup>3</sup>/μέρα, θαλασσινό νερό)
3. Κοιλάδα Σπένσερ, Νέο Μεξικό (2.8 m<sup>3</sup>/μέρα, υφάλμυρο νερό)
4. Πανεπιστήμιο Αλικάντε, Ισπανία (1.32 m<sup>3</sup>/μέρα, υφάλμυρο νερό)
5. Πόλη Ίσα, Μπαχρέιν (1.14 m<sup>3</sup>/μέρα, υφάλμυρο νερό)

Οι μονάδες ηλεκτροδίαλυσης που συνδυάζονται με φωτοβολταϊκά στοιχεία παρουσιάζουν δυναμικότητες αφαλάτωσης μικρότερες των 100.0 m<sup>3</sup>/μέρα. Το πόσιμο νερό που παράγεται μέσω αυτών των μονάδων, έχει μοναδιαίο κόστος στο εύρος των 5.8 - 16 \$/m<sup>3</sup> (Al-Karaghoulí & Kazmerski, 2013).

### 3.11 Αφαλάτωση με την χρήση της αιολικής ενέργειας

Η αιολική ενέργεια αποτελεί τη δεύτερη ευρέως χρησιμοποιούμενη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, στην αφαλάτωση μονάδων μικρής δυναμικότητας (Subramani, Badruzzaman, Oppenheimer, & Jacangelo, 2011). Οι παράκτιες περιοχές διαθέτουν ένα σημαντικό αιολικό δυναμικό. Ωστόσο, για την εκμετάλλευση αυτού του σημαντικού αιολικού δυναμικού, προτείνεται η χρήση ανεμογεννητριών (Gavin L. Park, Schäfer, & Richards, 2011).

Η αιολική αφαλάτωση προτείνεται στην περίπτωση περιοχών με ελάχιστη ταχύτητα ανέμου 5.0 m/s (Saravani & Rahini, 2014). Ο συγκεκριμένος συνδυασμός τεχνολογιών αφαλάτωσης και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συνεπάγεται χαμηλό περιβαλλοντικό αντίκτυπο, σύμφωνα με το Πρωτόκολλο του Κιότο (Forstmeier et al., 2007). Ωστόσο, οι κυριότερες προκλήσεις που συνοδεύουν την χρήση ανεμογεννητριών είναι η διαλείπουσα φύση και οι διακυμάνσεις του ανέμου. Τα δυο προαναφερθέντα προβλήματα ανάγονται σε αναταραχές και απότομα ρεύματα ανέμου, που διαρκούν από μερικά δευτερόλεπτα έως και λίγα λεπτά. Για το ίδιο πρόβλημα ευθύνονται όμως και οι μαζικές μετακινήσεις του αέρα, που διαρκούν δεκάδες έως και εκατοντάδες ώρες. Στην περίπτωση αιολικών συστημάτων αφαλάτωσης, οι διακυμάνσεις μικρής διάρκειας, που διαρκούν έως και μια ώρα, αποτελούν τον πλέον σημαντικό παράγοντα. Οι διακυμάνσεις αυτού του τύπου λαμβάνονται ως στοχαστικές διαφοροποιήσεις στην ταχύτητα του ανέμου, για 10.0 λεπτά κατά μέσο όρο (Gavin L. Park et al., 2011).

Ωστόσο, η μεταβαλλόμενη φύση της αιολικής ενέργειας δεν αποτελεί πρόβλημα. Αυτό συμβαίνει διότι το νερό μπορεί να αποθηκευτεί για μεγάλες χρονικές περιόδους. Κατά τη διάρκεια αυτών των χρονικών περιόδων, η ποιότητα του νερού παραμένει αμετάβλητη (Saravani & Rahini, 2014).

Όσον αφορά τον τρόπο σύζευξης των δύο τεχνολογιών, δύο είναι οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται ευρέως. Η πρώτη προσέγγιση περιλαμβάνει την ενσωμάτωση αμφοτέρων των ανεμογεννητριών και της μονάδας αφαλάτωσης, στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η δεύτερη βασικότερη προσέγγιση αναφέρεται στην άμεση σύζευξη των ανεμογεννητριών στο σύστημα αφαλάτωσης. Η δεύτερη προσέγγιση είναι αντιπροσωπευτική στην περίπτωση συστημάτων αφαλάτωσης απομακρυσμένων περιοχών, που δεν έχουν ηλεκτρικό δίκτυο. Ωστόσο, στην περίπτωση μη ύπαρξης ηλεκτρικού δικτύου, το σύστημα αφαλάτωσης δύναται να επηρεαστεί από διαφοροποιήσεις στην ισχύ και διακοπές στη λειτουργία του. Οι τελευταίες αναταραχές οφείλονται στη μεταβαλλόμενη φύση της αιολικής ενέργειας. Ως εκ τούτου, τα αιολικά αυτόνομα συστήματα αφαλάτωσης είναι συχνά υβριδικά συστήματα. Τα υβριδικά συστήματα συνδυάζονται με άλλα είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (την ηλιακή ενέργεια για παράδειγμα) ή ένα εφεδρικό ενεργειακό σύστημα (για παράδειγμα μπαταρίες ή γεννήτριες Diesel) (Subramani, Badruzzaman, Oppenheimer, & Jacangelo, 2011).



Η αιολική ενέργεια τροφοδοτεί άμεσα ή έμμεσα τις μονάδες αφαλάτωσης. Η ενεργειακή τροφοδότηση λαμβάνει χώρα μέσω τεσσάρων διαφορετικών μορφών ενέργειας. Οι ενεργειακές αυτές μορφές είναι η ηλεκτρική ενέργεια, η θερμική ενέργεια, η βαρυτική δυναμική ενέργεια και η κινηματική δύναμη (δύναμη άξονα) (Ma & Lu, 2011).

Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την κίνηση του αέρα σε περιστροφική ενέργεια, για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας. Η παραγόμενη περιστροφική ενέργεια χρησιμοποιείται στην οδήγηση μιας γεννήτριας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Al-Karaghoulis & Kazmerski, 2013).

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανεμογεννήτριες, τροφοδοτεί κατά κύριο λόγο τις μονάδες αφαλάτωσης (Ma & Lu, 2011). Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται στην περίπτωση ενεργειακής τροφοδότησης μονάδων αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης, ηλεκτροδιάλυσης και μηχανικής συμπίεσης ατμού (Al-Karaghoulis & Kazmerski, 2013). Ωστόσο, όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει τα επιθυμητά όρια ή δεν μπορεί καν να τα επιτύχει, απαιτείται η ενσωμάτωση διαφόρων συσκευών στο σύστημα. Στις συσκευές αυτές συγκαταλέγονται οι μπαταρίες, οι δεξαμενές νερού και το σύστημα σφονδύλου (Ma & Lu, 2011). Η υψηλή διακύμανση της αιολικής ενέργειας απαιτεί ένα σύστημα ελέγχου. Το σύστημα αυτό ταιριάζει τη διαθέσιμη αιολική ενέργεια με την απαιτούμενη ενέργεια αφαλάτωσης. Το ίδιο σύστημα απορρίπτει επίσης το ενεργειακό πλεόνασμα, στην περίπτωση πολύ υψηλών αιολικών ταχυτήτων. Με αυτόν τον τρόπο, εξομαλύνεται η λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης (Al-Karaghoulis & Kazmerski, 2013).

Το κόστος των αιολικών συστημάτων αφαλάτωσης διαφέρει σημαντικά από το κόστος των συμβατικών μονάδων αφαλάτωσης. Αυτό συμβαίνει διότι στα αιολικά συστήματα αφαλάτωσης, το κόστος βασίζεται εξ' ολοκλήρου στα πάγια έξοδα του συστήματος. Στο κόστος αυτό δεν συμπεριλαμβάνονται κόστη ορυκτών καυσίμων καθώς οι ανεμογεννήτριες, σαν κεφαλαιουχική δαπάνη, τα υποκαθιστούν (Forstmeier et al., 2007). Στην περίπτωση αυτόνομων αιολικών συστημάτων αφαλάτωσης, το μοναδιαίο κόστος παραγωγής πόσιμου νερού βρίσκεται στο εύρος μεταξύ των 1.35 και των 6.7 \$/m<sup>3</sup> (Subramani, Badruzzaman, Oppenheimer, & Jacangelo, 2011).

### **3.11.1 Αιολική αντίστροφη όσμωση**

Η αντίστροφη όσμωση αποτελεί τη μέθοδο αφαλάτωσης με τις μικρότερες ενεργειακές απαιτήσεις (Ma & Lu, 2011). Η ειδική ενεργειακή της κατανάλωση αναφέρεται στα 3.0 kWh/m<sup>3</sup> αφαλατωμένου νερού (Forstmeier et al., 2007). Όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω, στις παράκτιες περιοχές σημειώνεται η ύπαρξη ενός σημαντικού αιολικού δυναμικού (Ma & Lu, 2011). Κατά συνέπεια, η σύζευξη της αντίστροφης όσμωσης με την αιολική ενέργεια, εμφανίζεται ιδιαίτερα ελκυστική στην περίπτωση απομακρυσμένων περιοχών, με κατάλληλη ταχύτητα ανέμου (Al-Karaghoulis & Kazmerski, 2013).

Η αρθρωτή φύση των συστημάτων αντίστροφης όσμωσης επιτρέπει τη γρήγορη προσαρμογή τους, στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του ανέμου. Επιπροσθέτως, στην περίπτωση της αντίστροφης όσμωσης μπορεί να επιτευχθεί αντιστοιχία μεταξύ της απαιτούμενης ενεργειακής κατανάλωσης και του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού. Η αντιστοιχία αυτή επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης βαλβίδων στο σύστημα. Οι προαναφερθείσες βαλβίδες ενεργοποιούν ή απενεργοποιούν τα δοχεία πίεσεως της αντίστροφης όσμωσης. Η χρήση τους συνεπάγεται και μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό του συστήματος αφαλάτωσης καθώς και μείωση στο ολικό κόστος παραγωγής πόσιμου νερού (Forstmeier et al., 2007).

Οι μονάδες αντίστροφης όσμωσης που τροφοδοτούνται από ανεμογεννήτριες, έχουν υπάρξει αντικείμενο αρκετών μελετών. Οι μελέτες αυτές καλύπτουν τις μονάδες αντίστροφης όσμωσης μικρής (10.0 m<sup>3</sup>/μέρα) και μεγάλης κλίμακας (>100.0 m<sup>3</sup>/μέρα). Η πλειοψηφία των αιολικών συστημάτων αφαλάτωσης αποτελείται από ανεμόμυλους πολλαπλών πτερυγίων ή ηλεκτροκίνητα συστήματα που κάνουν χρήση ανεμογεννητριών, μικρής κλίμακας. Τα δυο προαναφερθέντα είδη αιολικών συστημάτων αφαλάτωσης

απαιτούν την ισχύ εξόδου των ανεμογεννητριών, για την ενεργειακή τροφοδότηση μιας αντλίας. Η αντλία αυτή χρησιμοποιείται στην αύξηση της πίεσεως του νερού τροφοδοσίας. Η διαδικασία αυτή αποσκοπεί στο πέρασμα του νερού μέσα από ένα σύστημα διήθησης μεμβράνης. Ωστόσο, η απαιτούμενη πίεση του νερού τροφοδοσίας συνδέεται στενά με την απόδοση του συστήματος και την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας (G.L. Park, Schäfer, & Richards, 2009).

Για τον προσδιορισμό της εφικτότητας των αιολικών συστημάτων αφαλάτωσης, λαμβάνεται σοβαρά υπόψη η ειδική ενεργειακή τους κατανάλωση (Specific Energy Consumption – SEC, μονάδα: kWh/m<sup>3</sup>). Αυτό συμβαίνει διότι η ειδική ενεργειακή κατανάλωση καταδεικνύει την παραγωγικότητα του νερού και την κατανάλωση ισχύος. Στην περίπτωση της αιολικής αντίστροφης όσμωσης, η κατανάλωση ισχύος αναφέρεται στην απαιτούμενη αιολική παραγωγή των ανεμογεννητριών. Κατά συνέπεια, αφορά και την επένδυση κεφαλαίου (G.L. Park et al., 2009).

Οι Garcia Rodriguez et al. ανέλυσαν τις παραμέτρους που επιδρούν κατά κύριο λόγο στην παραγωγή πόσιμου νερού. Στις παραμέτρους αυτές συγκαταλέγονται οι κλιματικές συνθήκες, η ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας, η συγκέντρωση άλατος του θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού, η διευθέτηση του σχεδιασμού, οι λειτουργικές συνθήκες, η δυναμικότητα της μονάδας, το κόστος των διατάξεων αντίστροφης όσμωσης και το κόστος των ανεμογεννητριών (Charcosset, 2009).

Ο Feron υπήρξε από τους πρώτους μελετητές της οικονομικής βιωσιμότητας της αιολικής αντίστροφης όσμωσης. Η μελέτη που διενήργησε στηρίζεται σε μαθηματική μοντελοποίηση, υπό την ύπαρξη κάποιων προϋποθέσεων. Ο συγγραφέας καταλήγει στο εξής συμπέρασμα: Η αιολική αντίστροφη όσμωση μπορεί να καταστεί απαγορευτική, υπό την επήρεια συγκεκριμένων συνθηκών. Στις συνθήκες αυτές συμπεριλαμβάνονται οι υψηλές ταχύτητες ανέμου και οι υψηλές τιμές ορυκτών καυσίμων (Ma & Lu, 2011).

Στην περίπτωση της αιολικής αντίστροφης όσμωσης, το μοναδιαίο κόστος παραγωγής πόσιμου νερού μπορεί να μειωθεί έως και κατά 20.0 %. Η παραπάνω πρόταση προκύπτει μέσω δοκιμών σε μονάδα αιολικής αντίστροφης όσμωσης, ισχύος μεγαλύτερης των 50.0 kW. Ωστόσο, η μείωση αυτή αφορά περιοχές με μέση ταχύτητα ανέμου που είναι υψηλότερη των 5.0 m/s (G.L. Park et al., 2009).

Το κόστος παραγωγής πόσιμου νερού επηρεάζεται από τη δυναμικότητα της μονάδας, την ειδική ενεργειακή της κατανάλωση, τη λειτουργία και τη συντήρηση της, τη μέση ταχύτητα του ανέμου αλλά και από το πραγματικό προεξοφλητικό επιτόκιο. Το τελευταίο αντιπροσωπεύει τη διαφορά ανάμεσα στο κόστος του νερού που παράγεται από τη μονάδα αιολικής αντίστροφης όσμωσης και αυτού που παράγεται από μονάδα συμβατικών καυσίμων (Ma & Lu, 2011).

Οι Fortsmeier et al. αποδεικνύουν ότι το κόστος του συστήματος αιολικής αντίστροφης όσμωσης συμβαδίζει με αυτό των συμβατικών συστημάτων αφαλάτωσης. Κατά συνέπεια, τα αιολικά συστήματα αφαλάτωσης προσφέρονται κυρίως για περιοχές, με σημαντικό αιολικό δυναμικό και υψηλά ενεργειακά κόστη (Charcosset, 2009).

Στην περίπτωση της αιολικής αντίστροφης όσμωσης, το κόστος παραγωγής πόσιμου νερού συμπεριλαμβάνει τις εξής συνιστώσες: τα πάγια τέλη της αντίστροφης όσμωσης, τα πάγια τέλη των ανεμογεννητριών, τη συντήρηση των ανεμογεννητριών, τη συντήρηση της μονάδας αντίστροφης όσμωσης και τις πρώτες ύλες (Forstmeier et al., 2007). Το κόστος παραγωγής πόσιμου νερού βρίσκεται στο εύρος των 1.8 – 5.2 \$/m<sup>3</sup>, για την περίπτωση μονάδων αφαλάτωσης μεσαίου μεγέθους. Για μονάδες μικρού μεγέθους, το αντίστοιχο κόστος βρίσκεται στο εύρος των 3.9 – 9.1 \$/m<sup>3</sup> (Al-Karaghoulis & Kazmerski, 2013).

Συστήματα αιολικής αντίστροφης όσμωσης συναντώνται σε διάφορα μέρη ανά την Ευρώπη. Αναφέρουμε ενδεικτικά τις τοποθεσίες μερικών εξ' αυτών (Ma & Lu, 2011):



1. Στο Νησί της Χώρας Σπλιτ και της Δαλματίας.
2. Στο Νησί Suderoog, Βόρεια Θάλασσα.
3. Στο Νησί της Ελγολάνδης, Γερμανία.
4. Στο Νησί Drenec, Γαλλία.

### 3.11.2 Αιολική μηχανική συμπίεση ατμού

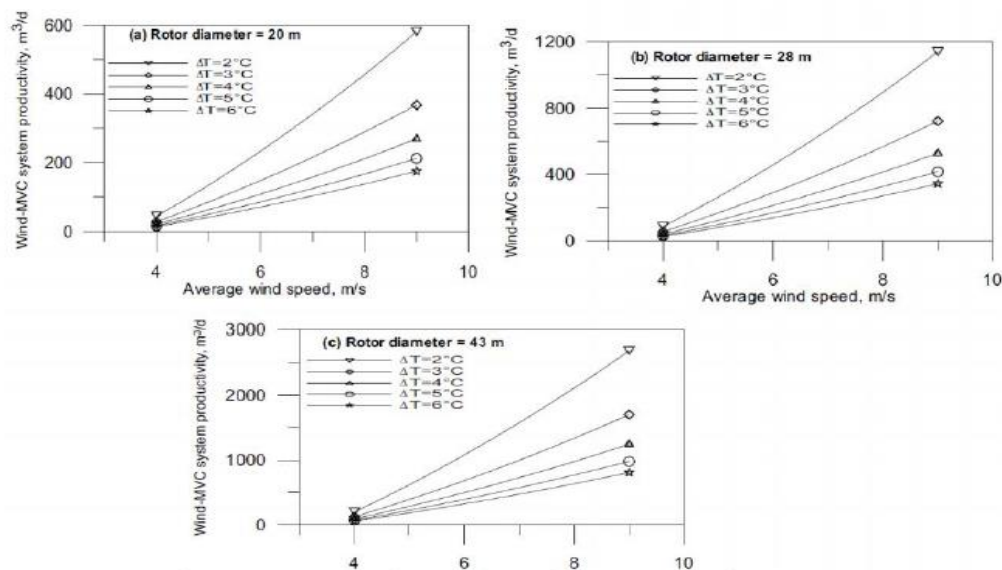
Η αιολική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ενεργειακή τροφοδότηση ενός μηχανικού συμπιεστή ή ενός συμπιεστή ηλεκτρικού ρεύματος (Al-Karaghoul & Kazmerski, 2013). Παρόλα αυτά, οι μονάδες αιολικής μηχανικής συμπίεσης ατμού συναντώνται δύσκολα ανά τον κόσμο (Ma & Lu, 2011).

Οι ανεμογεννήτριες εμφανίζουν παρόμοια μηχανικά χαρακτηριστικά με το συμπιεστή, που χρησιμοποιείται στη μηχανική συμπίεση ατμού. Η ομοιότητα των δυο παραπάνω μηχανών έγκειται στο ότι και οι δυο αποτελούν μηχανές ροής ρευστού. Αυτή τους η ομοιότητα συνεπάγεται την ύπαρξη δύο εξόδων ισχύος, που διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Κατά συνέπεια, το σύστημα λειτουργεί αποτελεσματικά ακόμη υπό την επήρεια μεταβαλλόμενης ταχύτητας ανέμου. Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση της μεταβαλλόμενης ταχύτητας ανέμου, συνίσταται η χρήση μιας βοηθητικής πηγής θέρμανσης καθώς και η παροχή της απαιτούμενης ενέργειας εκκίνησης (Forstmeier et al., 2007).

Το 1991, στο Νησί Borkum της Γερμανίας, ιδρύθηκε πιλοτική μονάδα αιολικής μηχανικής συμπίεσης ατμού. Στη μονάδα αυτή, ο μηχανικός συμπιεστής με δυναμικότητα 48.0 m<sup>3</sup>/μέρα, συνδέεται με μια ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 45.0 kW (Ma & Lu, 2011).

Το 1995, στη Βαλτική Θάλασσα και συγκεκριμένα στο Νησί Ρούγκεν, εγκαταστάθηκε μια μεγαλύτερη (από την παραπάνω) μονάδα αιολικής μηχανικής συμπίεσης ατμού.

Το Σχήμα 3.8 απεικονίζει την εναλλαγή της παραγωγικότητας ενός συστήματος μηχανικής συμπίεσης ατμού, συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου, σε διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας του εξατμιστήρα. Η παραγωγικότητα του συστήματος αυξάνεται με αύξηση της ταχύτητας ανέμου ή/και της διαμέτρου του ρομπίν. Αμυδρή αύξηση στην παραγωγικότητα του συστήματος σημειώνεται και με αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του εξατμιστήρα. Η τελευταία αύξηση σημειώνεται εξαιτίας της μείωσης στο έργο του συμπιεστή. Το έργο του συμπιεστή μειώνεται λόγω μείωσης του ειδικού όγκου των συμπιεσμένων ατμών, καθώς η θερμοκρασία λειτουργίας του εξατμιστήρα αυξάνεται (Karameldin et al., 2002).



Σχήμα 3.8: Η παραγωγικότητα ενός συστήματος αιολικής μηχανικής συμπίεσης ατμού, για διαφορετικές τιμές ταχύτητας του ανέμου και  $\Delta T$  (Karameldin et al., 2002)

Ανάλογα με τα τοπικά χαρακτηριστικά και τις οικονομικές συνθήκες, η αιολική μηχανική συμπίεση ατμού μπορεί να ανταγωνιστεί οικονομικά την αιολική μονάδα αντίστροφης όσμωσης (Forstmeier et al., 2007). Για μικρά συστήματα αιολικής μηχανικής συμπίεσης ατμού, το μοναδιαίο κόστος παραγωγής πόσιμου νερού βρίσκεται στο εύρος των 5.2 – 7.8 \$/m<sup>3</sup> (Al-Karaghoulis & Kazmerski, 2013).

### 3.12 Αφαλάτωση με την χρήση της γεωθερμικής ενέργειας

Η γεωθερμική ενέργεια αξιοποιεί την θερμική ενέργεια που διατίθεται στο εσωτερικό της γης. Το κύριο πλεονέκτημα της είναι η μη απαίτηση θερμικής αποθήκευσης. Οι γεωθερμικές δεξαμενές ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις γεωθερμικές δεξαμενές υψηλής θερμοκρασίας (>150° C) και τις γεωθερμικές δεξαμενές χαμηλής θερμοκρασίας (<150° C) (Al-Karaghoulis & Kazmerski, 2013). Η πλειοψηφία των θερμικών διεργασιών αφαλάτωσης εκτελείται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Συνεπώς, η γεωθερμική ενέργεια χαμηλής ενθαλπίας (μέχρι και τους 100 °C) αποδεικνύεται μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, με ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα στην παραγωγή πόσιμου νερού (Mohamed & El-Minshawy, 2009).

Ο Καλογήρου αποδεικνύει ότι η θερμοκρασία του εδάφους, κάτω από ένα ορισμένο βάθος, παραμένει σχετικά σταθερή, κατά τη διάρκεια του έτους. Οι Poriel et al. διενήργησαν έκθεση σχετικά με τη θερμοκρασιακή διανομή του εδάφους, κατά τη διάρκεια μιας περιόδου δύο ετών. Μέσω της έρευνας τους διακρίνουν τρεις ζώνες εδάφους: την επιφανειακή (<100 °C), τη ρηχή (100 – 150 °C) και τη βαθεία (>150 °C) (Mahmoudi et al., 2010). Στον Πίνακα 3.7 παρατίθενται τα τυπικά πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα, που παρουσιάζει η γεωθερμική αφαλάτωση σαν μέθοδος:

α/α	Πλεονεκτήματα γεωθερμικής ενέργειας	Μειονεκτήματα γεωθερμικής ενέργειας
1	Προσφέρει μια σταθερή και αξιόπιστη παροχή θερμότητας. Η παροχή αυτή είναι ικανή να εξασφαλίσει τη σταθερότητα της θερμικής αφαλάτωσης καθώς και της αντίστροφης όσμωσης.	Οι γεωθερμικές άλμες εμφανίζουν το μειονέκτημα της υψηλής συγκέντρωσης άλατος. Η υψηλή αυτή συγκέντρωση δημιουργεί σοβαρά λειτουργικά προβλήματα, σχηματισμό σκληρής κλίμακας και συμπύκνωση της εναποτιθέμενης άλμης.
2	Η γεωθερμική τεχνολογία ενεργειακής παραγωγής αποτελεί μια σχετικά ώριμη τεχνολογία.	
3	Η γεωθερμική αφαλάτωση συνεπάγεται εξοικονόμηση των εισαγόμενων ορυκτών καυσίμων. Κατά συνέπεια, τα καύσιμα αυτά μπορούν να βρουν εφαρμογή σε διαφορετικούς τομείς.	
4	Η γεωθερμική αφαλάτωση θεωρείται οικονομικά αποδοτική. Καθιστά επίσης εφικτή την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.	
5	Η γεωθερμική αφαλάτωση είναι φιλική προς το περιβάλλον καθώς δεν προκαλεί την εκπομπή αερίων ρύπων και αερίων του θερμοκηπίου.	
6	Οι τυπικές θερμοκρασίες μιας γεωθερμικής πηγής βρίσκονται στο εύρος των <b>70.0 C ° - 90.0 °C</b> . Το προαναφερθέν εύρος θεωρείται ιδανικό στην περίπτωση αφαλάτωσης με εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης.	
7	Τα γεωθερμικά νερά χρησιμεύουν ως νερό τροφοδοσίας των μονάδων αφαλάτωσης αλλά και	

Πίνακας 3.7: Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα γεωθερμικής αφαλάτωσης (Gude, 2014)

Η αφαλάτωση υφάλμυρου νερού αποτελεί μια από τις πλέον υποσχόμενες εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας. Η χρήση της τελευταίας στις μονάδες αφαλάτωσης συνεπάγεται την αποφυγή προβλημάτων θερμικής αποθήκευσης. Επιπλέον, η ενεργειακή απόδοση της γεωθερμικής ενέργειας είναι γενικά σταθερή, συγκριτικά με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (αιολική, ηλιακή ενέργεια) (Mahmoudi et al., 2010).

Τα γεωθερμικά ρευστά χαμηλής θερμοκρασίας που βρίσκονται στα ανώτερα 100.0 m του υπεδάφους, αποτελούν μια εφικτή ενεργειακή πηγή αφαλάτωσης (Kalogirou, 2005). Στην περίπτωση των μονάδων αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης, η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην θέρμανση του αλατούχου νερού ή/και στην ηλεκτροπαραγωγή (Mahmoudi et al., 2010). Οι El Amali et al. προτείνουν μια εφαρμογή αυτού του τύπου της γεωθερμικής ενέργειας στην απόσταξη μεμβρανών (Garcia-rodriguez, 2002). Ωστόσο, την πλέον ελπιδοφόρα επιλογή γεωθερμικής αφαλάτωσης αποτελεί η άμεση χρήση του γεωθερμικού ρευστού υψηλής θερμοκρασίας, σε συνδυασμό με τις τεχνολογίες θερμικής αφαλάτωσης. Στην περίπτωση της μηχανοκίνητης αφαλάτωσης, επιτρέπεται η άμεση χρήση της δύναμης άξονα. Η χρήση αυτή καθίσταται εφικτή μέσω μιας γεωθερμικής πηγής υψηλής πίεσης (Gude, 2014).

Η αφαλάτωση των γεωθερμικών ρευστών εξετάζεται σε πολλές περιοχές ανά τον κόσμο. Η εξέταση αυτή λαμβάνει χώρα σε άνυδρες κυρίως περιοχές, προκειμένου να μειωθούν οι αρνητικές επιπτώσεις των αλατούχων γεωθερμικών ρευστών, στα υδάτινα σώματα και τις γεωργικές περιοχές. Η γεωθερμική αφαλάτωση προσφέρεται όμως και σαν λύση στο πρόβλημα της αποκέντρωσης της παροχής πόσιμου νερού (Tomaszewska & Bodzek, 2013).

Η ανάπτυξη του κλάδου της γεωθερμικής ενέργειας αποσκοπεί στην ηλεκτροπαραγωγή και την αφαλάτωση. Ο συνδυασμός τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής και αφαλάτωσης είναι κρίσιμης σημασίας, για τη μεγιστοποίηση της συνολικής διατήρησης θερμότητας. Ωστόσο, το πλέον αποτελεσματικό σύστημα γεωθερμικής αφαλάτωσης περιλαμβάνει έναν κλειστό βρόχο και ένα σύστημα πολλαπλών φρεατίων. Σε αυτόν το μηχανισμό, το νερό εγχέεται μέσω ενός η περισσοτέρων διανοιγόμενων φρεατίων. Τα φρεάτια αυτά κατασκευάζονται σε συνδυασμό με μια οριζόντια μετατόπιση και υδραυλικά θραύσματα. Σκοπός της παραπάνω σχεδίασης είναι η παραγωγή ενός πορώδους μέσου (σύστημα HDR). Το αποσταγμένο νερό ρέει μέσω της έγχυσης στο λαβύρινθο των θραυσμάτων και στη συνέχεια αντλείται. Το νερό διατηρείται υπό πίεση μέχρι να φτάσει την εγγύτητα ενός συστήματος τουρμπίνας, όπου τελικά ενεργοποιείται η ηλεκτροπαραγωγή (Ghaffour et al., 2014).

Κατά το ταίριασμα της γεωθερμικής ενέργειας με τις μονάδες αφαλάτωσης, χρησιμοποιούνται διάφορες διαμορφώσεις. Η πρώτη διαμόρφωση περιλαμβάνει το συνδυασμό της γεωθερμικής ενέργειας με την εξάτμιση πολλαπλής επίδρασης. Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα λειτουργεί μέσω του ξηρού ατμού, που παράγεται από φρέατα ή ένα πορώδες μέσο (σύστημα HDR) με ηλεκτροπαραγωγή (Ghaffour et al., 2014).

Ο Ophir διενήργησε μια οικονομική μελέτη μιας μονάδας αφαλάτωσης, που τροφοδοτείται από γεωθερμική πηγή, με θερμοκρασίες στο εύρος των 110 – 130.0 °C (Mahmoudi et al., 2010). Ο Καρυτσάς, με τη σειρά του, ανέπτυξε μια τεχνοοικονομική ανάλυση για την χρήση των γεωθερμικών πηγών, μεταξύ των θερμοκρασιών 75.0 – 90.0 °C. Η εγκατάσταση μια τέτοιας πρότυπης μονάδας προτείνεται στην περίπτωση των νησιών του Αιγαίου (Garcia-rodriguez, 2002). Επιπροσθέτως, τα γεωθερμικά ρευστά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, που τροφοδοτεί ενεργειακά μονάδες αντίστροφης

όσμωσης, ηλεκτροδιάλυσης και μηχανικής συμπίεσης ατμού. Οι τεχνικές θερμικής απόσταξης, που βασίζονται στην άμεση θέρμανση μέσω της γεωθερμικής ενέργειας, είναι η μέθοδος που επιλέγεται στην πλειοψηφία των μονάδων αφαλάτωσης (Al-Karaghoulis & Kazmerski, 2013). Ωστόσο, η χρήση της γεωθερμικής άλμης με θερμοκρασία έως 60.0 °C αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη επιλογή αφαλάτωσης (Mahmoudi et al., 2010).

Η πρώτη γεωθερμική μονάδα αφαλάτωσης κατασκευάστηκε το 1972, στις ΗΠΑ. Πανομοιότυπα εργοστάσια αφαλάτωσης ιδρύθηκαν αργότερα στην Ελλάδα, τη Γαλλία και την Τυνησία. Στο νησί της Κιμώλου εγκαταστάθηκε το 2000, μια γεωθερμική μονάδα εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης (Al-Karaghoulis & Kazmerski, 2013).

Ακόμη και στην περίπτωση περιορισμένων γεωθερμικών πηγών ενέργειας, οι διαδικασίες θερμικής αφαλάτωσης (απόσταξη πολλαπλής επίδρασης, απόσταξη πολλαπλής φάσης, θερμική συμπίεση ατμού) επωφελούνται σε σημαντικό βαθμό, όταν συνδυάζονται μαζί τους. Το όφελος που παρουσιάζουν έγκειται στην εξοικονόμηση σημαντικών ποσών ενέργειας. Τα ποσά αυτά καθίστανται απαραίτητα στην προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας της μονάδας αφαλάτωσης (Gude, 2014).

Ο Καρυτσάς περιγράφει μια μελέτη περίπτωσης, όσον αφορά το νησί της Μήλου. Στη μελέτη που διενήργησε, μια μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού τροφοδοτείται από γεωθερμική πηγή ενέργειας, χαμηλής ενθαλπίας. Το σχέδιο του περιλαμβάνει τη σύζευξη μιας μονάδας εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης με υπόγεια γεωθερμικά ύδατα, θερμοκρασιακού εύρους 75.0 °C – 90.0 °C. Η μελέτη του τελικά αποδεικνύει ότι η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας χαμηλής ενθαλπίας, εξοικονομεί το ισοδύναμο ποσό των 5,000.0 ΤΟΕ/έτος, για μια δεδομένη δυναμικότητα μονάδας αφαλάτωσης 600.0 – 800.0 m<sup>3</sup> πόσιμου νερού/μέρα (Gude, 2014).

### 3.13 Μονάδες αφαλάτωσης στα νησιά του Αιγαίου

#### 3.13.1 Εισαγωγή

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των νησιών του Αιγαίου είναι το ξηρό μεσογειακό κλίμα. Τα νησιά αυτά απέχουν επίσης κατά πολύ από την κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα. Για την πλειοψηφία των νησιών του Αιγαίου, οι υδάτινοι πόροι είναι σχετικά περιορισμένοι. Εκτός αυτού, σε πολλά νησιά παρατηρείται και το φαινόμενο εισροής αλατούχου νερού στους αγωγούς ύδρευσης. Για τους παραπάνω προαναφερθέντες λόγους, η πλειοψηφία των Αιγαίοπελαγίτικων νησιών, αντιμετωπίζει ένα σημαντικό πρόβλημα λειψυδρίας (Kaldellis, Kavadias, & Kondili, 2004). Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος, περισσότερα από 1,000.0 m<sup>3</sup> πόσιμου νερού, μεταφέρονται σε ετήσια βάση, στα νησιά αυτά. Το κόστος μεταφοράς υπερβαίνει σε πολλές περιπτώσεις τα 7.0 €/m<sup>3</sup> (Kaldellis & Kondili, 2007).

Στα νησιωτικά συμπλέγματα που αντιμετωπίζουν το σημαντικότερο πρόβλημα λειψυδρίας συγκαταλέγονται αυτά του Νοτίου Αιγαίου (Κυκλάδες, Δωδεκάνησα). Το κόστος μεταφοράς νερού ανέρχεται περίπου στα 7.60 €/m<sup>3</sup> (συμπεριλαμβανομένου Φ.Π.Α) για τις Κυκλάδες και στα 5.35 € (συμπεριλαμβανομένου Φ.Π.Α) για τα Δωδεκάνησα (Karagiannis & Soldatos, 2007). Η διαφορά αυτή στο κόστος μεταφοράς έγκειται στο γεγονός ότι το νερό μεταφέρεται στις Κυκλάδες, μέσω της Εταιρείας Ύδρευσης και Αποχέτευσης στην Πρωτεύουσα (Αθήνα). Αντιθέτως, στην περίπτωση των Δωδεκανήσων η μεταφορά πραγματοποιείται μέσω της Ρόδου. Για την ύπαρξη περαιτέρω μείωσης στο κόστος μεταφοράς του νερού στη μειοψηφία των νησιών των Κυκλάδων (Αμοργός, Κουφονήσι, Δονούσα, Ηράκλεια και Σχοινούσα), το Ελληνικό Υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας, Αιγαίου και Νησιωτικής Πολιτικής εξετάζει το ενδεχόμενο μεταφοράς του, μέσω της Νάξου (Gikas & Angelakis, 2009). Οι μέσοι μηνιαίοι όγκοι νερού που εισάγονται σε κάθε νησί παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.8, που ακολουθεί:

α/α	Μήνας	Όγκος νερού (m <sup>3</sup> /μήνα)	
		Κυκλάδες	Δωδεκάνησα
1	Ιανουάριος	25,900	50,600
2	Φεβρουάριος	23,600	38,500
3	Μάρτιος	29,600	61,700
4	Απρίλιος	44,300	73,400
5	Μάιος	51,200	90,900
6	Ιούνιος	64,300	112,400
7	Ιούλιος	70,000	111,300
8	Αύγουστος	78,300	119,200
9	Σεπτέμβριος	72,100	107,000
10	Οκτώβριος	52,600	99,200
11	Νοέμβριος	31,300	81,500
12	Δεκέμβριος	27,700	63,800
13	Σύνολο	570,900	1,009,500

Πίνακας 3. 8: Μηνιαίοι όγκοι νερού που αποστάλθηκαν στα νησιά των Κυκλάδων και της Δωδεκανήσου, κατά το έτος 2007 (Gikas & Angelakis, 2009)

Τα έργα διαχείρισης τοπικών υδάτων είναι τοπικής εμβέλειας και στο νησί της Κρήτης. Ωστόσο, λόγω γεωγραφικής ενότητας της συγκεκριμένης περιοχής, κρίνεται εφαρμόσιμος ένας ολοκληρωμένος σχεδιασμός, για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων. Μια οικονομικά αποδοτική λύση για τη μεταφορά του νερού κατά μήκος της βόρειας ακτής της Κρήτης, είναι η κατασκευή ενός αγωγού νερού σε συνδυασμό με την Κρητική Εθνική Οδό. Με την ύπαρξη αυτού του αγωγού, το νερό διανέμεται μεταξύ των διαφορετικών γεωγραφικών περιοχών της Κρήτης, σε σχετικά χαμηλό κόστος (Gikas & Angelakis, 2009).

Η περιοχή του Αιγαίου διαθέτει άφθονο αιολικό δυναμικό. Σε πολλά νησιά, η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει τα 9.0 m/s, στο ύψος των 30.0 m. Το συγκεκριμένο αιολικό δυναμικό εκμεταλλεύονται τα αιολικά πάρκα, που είναι εγκατεστημένα σε πολλά νησιά του Αιγαίου. Ωστόσο, η στοχαστική συμπεριφορά του ανέμου και η αξιοσημείωτη διακύμανση των ημερήσιων και εποχιακών φορτίων ηλεκτρικής ενέργειας, έχει οδηγήσει σε σημαντική διείσδυση των ορίων της αιολικής ενέργειας. Σε πολλές περιπτώσεις, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια δεν μπορεί να απορροφηθεί από το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο και χρησιμοποιείται στην κατεύθυνση συμπληρωματικών δραστηριοτήτων, όπως για παράδειγμα η αφαλάτωση (Karagiannis & Soldatos, 2007).

Επίσης, τα νησιά του Αιγαίου βρίσκονται σε περιοχές με τακτικό όφελος μιας άφθονης και αξιόπιστης ηλιακής ενεργειακής παροχής. Αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι τα ποσά της ετήσιας ηλιακής ενέργειας προσεγγίζουν τις 1,700.0 kWh/m<sup>2</sup>. Τα ποσά της ηλιακής ενέργειας εμφανίζονται μεγαλύτερα κατά την περίοδο των καλοκαιρινών μηνών. Την περίοδο δηλαδή, που οι ανάγκες σε πόσιμο νερό είναι επίσης σημαντικά ενισχυμένες (Karagiannis & Soldatos, 2007).

Επιπροσθέτως, σε πολλές περιοχές του Αιγαίου έχει ανακύψει ένα σημαντικό γεωθερμικό δυναμικό. Το συγκεκριμένο γεωθερμικό δυναμικό οφείλεται στην ύπαρξη μιας αξιοσημείωτης δυναμικότητας γεωθερμικών πεδίων, υψηλής και χαμηλής ενθαλπίας. Κατά συνέπεια, το διαθέσιμο γεωθερμικό δυναμικό δύναται να αντικαταστήσει το συμβατικό πετρέλαιο καύσης ενδεχόμενων μονάδων αφαλάτωσης, στα νησιά αυτά (Karagiannis & Soldatos, 2007).

Ανακεφαλαιώνοντας, τα νησιά του Αιγαίου διαθέτουν ένα εξαιρετικό δυναμικό ανανέωσιμων πηγών ενέργειας. Στις ανανεώσιμες αυτές πηγές ενέργειας συγκαταλέγονται η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια και η γεωθερμική ενέργεια. Οι προαναφερθείσες ενεργειακές μορφές είναι εφαρμόσιμες στην περίπτωση ενεργειακής



τροφοδότησης μονάδων αφαλάτωσης. Με αυτόν τον τρόπο, η αναγκαία ζήτηση σε πόσιμο νερό δε θα καλύπτεται πλέον μέσω των θαλάσσιων μεταφορών.

### **3.13.2 Αφαλάτωση νερού στις Κυκλάδες και τα Δωδεκάνησα**

Τα άνυδρα νησιά ταξινομούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες. Η ταξινόμηση που ακολουθεί, γίνεται με βάση τη μέση ημερήσια έλλειψη νερού, κατά την περίοδο των καλοκαιρινών μηνών (Karagiannis & Soldatos, 2007):

1. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τα νησιά που παρουσιάζουν μια μέση ημερήσια έλλειψη, της τάξης των 1,000.0 – 2,500.0 m<sup>3</sup>/μέρα. Στα νησιά αυτά συμπεριλαμβάνονται τα Κουφονήσια, η Κίμωλος, η Τήνος, η Μήλος, οι Λειψοί, η Νίσυρος, η Πάτμος, η Σύμη και η Χάλκη.

2. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τα νησιά των οποίων η μέση ημερήσια έλλειψη νερού ανέρχεται στα 100.0 – 250.0 m<sup>3</sup>/μέρα. Τα νησιά αυτά είναι η Αμοργός, η Φολέγανδρος, η Σίκινο, η Θηρασία, το Αγαθονήσι και η Σχοινούσα.

3. Η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει τα νησιά Δονούσα, Παλιόνησο (Βόρεια Κάλυμνος) και την Ψέριμο. Τα προαναφερθέντα νησιά παρουσιάζουν μια μέση ημερήσια έλλειψη νερού, μεταξύ των 10.0 και των 25.0 m<sup>3</sup>/μέρα.

Το πρόβλημα της λειψυδρίας στα νησιά του Αιγαίου έχει μελετηθεί διεξοδικά, τα τελευταία χρόνια. Οι πλέον αξιοσημείωτες προτάσεις που προέκυψαν μέσω των μελετών αυτών περιλαμβάνουν:

1. Τη μεταφορά του αναγκαίου πόσιμου νερού από άλλα γειτονικά νησιά ή ακόμη και την Ηπειρωτική Ελλάδα (Kaldellis et al., 2004) - (Karagiannis & Soldatos, 2007).

2. Την αφαλάτωση (Kaldellis et al., 2004) - (Karagiannis & Soldatos, 2007).

3. Την κατασκευή νέων φραγμάτων νερού (Kaldellis et al., 2004) - (Karagiannis & Soldatos, 2007).

4. Τη βελτίωση της νησιωτικής υποδομής: Η βελτίωση αυτή μπορεί για παράδειγμα να συμπεριλαμβάνει τη συντήρηση των υπαρχόντων δικτύων ύδρευσης. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζονται οι ενδεχόμενες απώλειες νερού (Kaldellis et al., 2004) - (Karagiannis & Soldatos, 2007).

5. Την κατασκευή επιφανειακών δεξαμενών νερού: Οι δεξαμενές αυτές δεν παρουσιάζουν σημαντικά λειτουργικά κόστη και αποτελούν μια μακροπρόθεσμη λύση στο πρόβλημα της λειψυδρίας (Kaldellis et al., 2004) - (Karagiannis & Soldatos, 2007).

6. Τη συλλογή του νερού της βροχής σε δημόσιες ή οικιακές δεξαμενές νερού (Kaldellis et al., 2004).

7. Την κατασκευή ενός δεύτερου παράλληλου δικτύου τροφοδοσίας, για χρήσεις που δεν απαιτούν υψηλή ποιότητα νερού (Kaldellis et al., 2004)

8. Την κατάλληλη πολιτική τιμολόγησης και την ορθολογική διαχείριση της ζήτησης (Kaldellis et al., 2004)

9. Την επεξεργασία λυμάτων και την εκ νέου χρησιμοποίηση των εκροών νερού, για δευτερεύουσες χρήσεις (άρδευση, κατασκευαστικές εργασίες, καθάρισμα, λιμάνια κ.ο.κ) (Kaldellis et al., 2004)

Στα πλαίσια κάλυψης των αναγκών σε πόσιμο νερό, προτείνεται η κατασκευή δεξαμενών νερού σε συνδυασμό με εγκαταστάσεις επεξεργασίας του. Οι δεξαμενές νερού δεν εμφανίζουν σχεδόν κανένα λειτουργικό κόστος και αποτελούν μια μακροπρόθεσμη και βιώσιμη λύση στο πρόβλημα της λειψυδρίας. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή απαιτεί την ύπαρξη σημαντικών βροχοπτώσεων και κατάλληλης γης και χώματος ((Kaldellis et al., 2004).

Μια εναλλακτική λύση είναι αυτή της κατασκευής και λειτουργίας μονάδων αφαλάτωσης. Το λειτουργικό κόστος των σημερινών μονάδων αφαλάτωσης παραμένει υψηλό, εξαιτίας της υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης και του κόστους αντικατάστασης των μεμβρανών, στην περίπτωση της αντίστροφης όσμωσης. Ως εκ τούτου, η μείωση του συνολικού ενεργειακού κόστους θεωρείται εξέχουσας σημασίας για τη βιώσιμη λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης (Kaldellis et al., 2004). Το κόστος του αφαλατωμένου νερού στην Ελλάδα, κυμαίνεται μεταξύ των 0.5 €/m<sup>3</sup> και των 3.5 €/m<sup>3</sup> (Gikas & Angelakis, 2009). Η

μέθοδος αφαλάτωσης που χρησιμοποιείται κυρίως στα νησιά του Αιγαίου είναι η αντίστροφη όσμωση (Karagiannis & Soldatos, 2007). Στον Πίνακα 3.9 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι εγκατεστημένες μονάδες αφαλάτωσης, στα νησιά του Αιγαίου.

α/α	Νησί	Τοποθεσία	Χωρητικότητα νερού	Χρόνος εγκατάστασης
<b>Κυκλάδες</b>				
<b>1</b>	<b>Σύρος</b>	Άνω Σύρος	120	1993
			250	2000
			500	2002
		Ερμούπολη	800	1992
			800	1997
			250 (2 μονάδες)	2001
			800 (4 μονάδες)	2002
		Ποσειδωνία	750 (3 μονάδες)	2002
<b>2</b>	<b>Ίος</b>	Μυλοπότας	1,000	2001
<b>3</b>	<b>Μύκονος</b>	Κόρφος	1,200 (2 μονάδες)	1989
			2,250 (3 μονάδες)	2001
<b>4</b>	<b>Πάρος</b>	Νάουσα	1,200	2002
<b>5</b>	<b>Σίφνος</b>	Καμάρες	500	2001
<b>6</b>	<b>Τήνος</b>	Τήνος	500	2001
<b>7</b>	<b>Σαντορίνη</b>	Οία	380	1995
<b>Δωδεκάνησα</b>				
<b>1</b>	<b>Μεγίστη</b>	Μεγίστη	50	1990
<b>2</b>	<b>Νίσυρος</b>	Νίσυρος	300	1991
<b>3</b>			350	2002

Πίνακας 3.9: Υπάρχουσες μονάδες αφαλάτωσης στα νησιά του Αιγαίου (Karagiannis & Soldatos, 2007)

Ωστόσο, η πλειοψηφία των παραπάνω μονάδων αφαλάτωσης είναι πεπερασμένης δυναμικότητας και κατασκευάστηκε ως έργο έρευνας ή επίδειξης (Kaldellis et al., 2004). Σε νησιά του Αιγαίου που ο δείκτης κατανάλωσης νερού παίρνει υψηλές τιμές (πάνω από 130%), εξετάζεται η εγκατάσταση μιας μονάδας αντίστροφης όσμωσης. Η μονάδα αυτή τροφοδοτείται ενεργειακά μέσω της αιολικής ενέργειας. Η επιλογή των αιολικών σταθμών αφαλάτωσης πρέπει να λαμβάνει υπόψη της τους ακόλουθους περιορισμούς (Voivontas et al., 1999):

Για τη μονάδα αφαλάτωσης:

1. Μέγιστη απόσταση από την ακτή 500.0 m
2. Μέγιστο υψόμετρο: 100.0 m

Για τις ανεμογεννήτριες:

1. Ελάχιστη ταχύτητα ανέμου στις εξεταζόμενες περιοχές: 6.0 m/s
2. Μέγιστη απόσταση από τη μονάδα αφαλάτωσης: 500.0 m
3. Απορρίπτονται περιοχές που είναι δύσκολα προσβάσιμες λόγω μεγάλου υψομέτρου ή απότομης κλίσης του εδάφους.
4. Απορρίπτονται επίσης περιοχές που βρίσκονται κοντά σε αρχαιολογικούς χώρους, αεροδρόμια και πόλεις.

Για τη συνολική μονάδα:

1. Μέγιστη απόσταση μεταξύ της μονάδας αφαλάτωσης και των ανεμογεννητριών: 500.0 m.

Σύμφωνα με υπάρχοντες περιορισμούς, η μέγιστη δύναμη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που δύναται να εγκατασταθεί στο αυτόνομο ηλεκτρικό σύστημα των νησιών του Αιγαίου, δεν πρέπει να ξεπερνά το 30.0 % των ενεργειακών τους αναγκών. Σε περίπτωση που υπάρξει υπέρβαση αυτού του ορίου, το αιολικό πάρκο θεωρείται αυτόνομο σύστημα (Voivontas et al., 1999).

Στον παρακάτω Πίνακα 3.10 παρουσιάζονται τα επενδυτικά και λειτουργικά κόστη μιας μονάδας αντίστροφης όσμωσης, που τροφοδοτείται από ανεμογεννήτριες. Στον ίδιο Πίνακα παρουσιάζονται και οι τιμές πώλησης του νερού – ηλεκτρικού ρεύματος, που παράγονται από τις ανεμογεννήτριες.

α/α	Συνολικό επενδυτικό κόστος ανεμογεννητριών, ECU ανά εγκατεστημένη kWh	1,300
1	Συνολικό επενδυτικό κόστος για τη μονάδα αντίστροφης όσμωσης (RO), ECU ανά παραγόμενου m <sup>3</sup> /d	2,000
2	Κόστος λειτουργίας και συντήρησης των ανεμογεννητριών, % του συνολικού επενδυτικού κόστους	2.5
3	Χημικά της μονάδας αντίστροφης όσμωσης (RO), ECU/m <sup>3</sup> /y	0.15
4	Αντικατάσταση μεμβρανών της μονάδας αντίστροφης όσμωσης (RO), ECU/m <sup>3</sup> /y	0.13
5	Εργατικά κόστη της μονάδας αντίστροφης όσμωσης (RO), ECU/m <sup>3</sup> /y	0.11
6	Ανταλλακτικά της μονάδας αντίστροφης όσμωσης, ECU/m <sup>3</sup> /y	0.06
7	Διάρκεια ζωής της επένδυσης (y)	20.0
8	Τιμή πώλησης του νερού	Διαφέρει ανάλογα με την περίπτωση
9	Τιμή πώλησης του ηλεκτρικού ρεύματος (ECU/kWh)	0.056

Πίνακας 3.10: Οικονομική ανάλυση μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης, που τροφοδοτείται από ανεμογεννήτριες (Voivontas, Yannopoulos, Rados, Zervos, & Assimacopoulos, 1999)

Παρόλα αυτά, το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης των νησιών του Αιγαίου καλύπτεται, μέσω των σκαφών μεταφοράς νερού. Τη σήμερον ημέρα, έχουμε θαλάσσια μεταφορά νερού σε έντεκα νησιά των Κυκλάδων και εννέα των Δωδεκανήσων (Kaldellis et al., 2004). Η κατασκευή των αναγκαίων μονάδων αφαλάτωσης αποφεύγεται, λόγω της υψηλής απαιτούμενης επένδυσης και της εποχιακής διακύμανσης των αναγκών σε νερό (Kaldellis & Kondili, 2007).

Αναφέρουμε ενδεικτικά την κατανάλωση ενός ποσού, της τάξης των 7,000,000 €, για την κάλυψη των αναγκών σε πόσιμο νερό των συγκεκριμένων περιοχών. Κατά συνέπεια, η μεταφορά νερού δεν αποτελεί μια βιώσιμη και μακροπρόθεσμη λύση στο πρόβλημα της λειψυδρίας. Το κόστος της είναι αρκετά υψηλό ενώ ταυτόχρονα δε δημιουργεί μελλοντικές υποδομές αφαλάτωσης (Kaldellis & Kondili, 2007).

### **3.13.3 Η περίπτωση του νησιού της Μήλου**

Η Μήλος αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα νησιά των Κυκλάδων. Ο πληθυσμός της αγγίζει τους 5,000 κατοίκους. Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι ανάγκες της σε πόσιμο νερό, υφίσταται το φαινόμενο της θαλάσσιας μεταφοράς νερού (όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες). Η πρώτη μεταφορά νερού πραγματοποιήθηκε το 2001 και διήρκεσε συνολικά δύο μήνες. Ωστόσο, μικρές ήταν οι ποσότητες νερού που μεταφέρθηκαν από την Εταιρεία Νερού και Υγιεινής του Δικτύου των Αθηνών (Water and Sanitary Company of Athens Network). Τα επόμενα χρόνια, οι μεταφερόμενες ποσότητες αυξήθηκαν, φτάνοντας τα 150.0 – 200.0 χιλιάδες m<sup>3</sup>/χρόνο (Karagiannis & Soldatos, 2007).

Για την καθημερινή επιβίωση του, ο άνθρωπος χρειάζεται κατά προσέγγιση 0.2 m<sup>3</sup> πόσιμο νερό. Συνεπώς, μια κατάλληλη χωρητικότητα μονάδας αφαλάτωσης, που θα σταθεί ικανή να καλύψει τις ετήσιες ανάγκες του τοπικού πληθυσμού της Μήλου, είναι αυτή των 1,000.0 m<sup>3</sup>/μέρα. Στην πραγματικότητα, η χωρητικότητα των 1,000.0 m<sup>3</sup>/μέρα είναι μη εφικτή για τεχνικούς λόγους. Μια τιμή χωρητικότητας που παρουσιάζεται περισσότερο ρεαλιστική είναι αυτή των 310,000 m<sup>3</sup>/χρόνο. Για τη δεδομένη χωρητικότητα μονάδας αφαλάτωσης, το κόστος παραγωγής πόσιμου νερού ανέρχεται γύρω στα 0.79 €/m<sup>3</sup> (Karagiannis & Soldatos, 2007).

Εξαιτίας της υπάρχουσας γεωλογικής και ηφαιστειακής δραστηριότητας, η Μήλος διαθέτει ένα από τα πλέον σημαντικά γεωθερμικά πεδία στην Ευρώπη. Η μακροχρόνια ηφαιστειακή δραστηριότητα (συνολικής χρονικής διάρκειας 80,000 ετών), δημιούργησε μια συνεχόμενη ανάπτυξη των λιωμένων βράχων, που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη. Εκτός αυτού, σημειώνεται το φαινόμενο της συγκέντρωσης των λιωμένων βράχων, σε βάθος 4.0 – 5.0 χιλιομέτρων, από την επιφάνεια του εδάφους. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τις τεκτονικές ρωγμές που δημιουργούν οπές ανύψωσης, οδήγησε σε μια αξιοσημείωτη γεωθερμική ανωμαλία. Η ανωμαλία αυτή αναφέρεται στην ύπαρξη μιας γεωθερμικής βαθμίδας που είναι κατά 30 φορές μεγαλύτερη από τη μέση γήινη, στην ευρύτερη περιοχή της Ζεφυριάς. Συγκεκριμένα, το γεωθερμικό δυναμικό της Ζεφυριάς, ξεπερνά τα 280.0 m<sup>3</sup>/ώρα (Manologlou, Tsartas, & Markou, 2004). Συνεπώς, η περιοχή της Ζεφυριάς εμφανίζεται από τις πλέον υποσχόμενες, όσον αφορά την ύπαρξη γεωθερμικού δυναμικού, υψηλής ενθαλπίας (Low, Geothermal, For, Generation, & Desalination, 2004). Η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρικού Ρεύματος (ΔΕΗ) ανέλαβε κατά το παρελθόν, τη διάνοιξη γεωτρήσεων στην περιοχή της Μήλου. Οι γεωτρήσεις αυτές υπέδειξαν την ύπαρξη γεωθερμικών ρευστών, θερμοκρασιακού εύρους 300.0 – 323.0 °C, σε βάθος 1,400.0 m κάτω από το θαλάσσιο επίπεδο της κοιλάδας της Ζεφυριάς (Low et al., 2004). Σε αντίθεση με τα αποτελέσματα της παραπάνω μελέτης βρίσκονται τα ερευνητικά συμπεράσματα των Καρυτσάς et al. Οι τελευταίοι ισχυρίζονται την ύπαρξη γεωθερμικών ρευστών χαμηλής ενθαλπίας στη μισή ανατολική πλευρά του νησιού. Συγκεκριμένα, αναφέρουν ότι τα βαθιά γεωθερμικά ρευστά αντιστοιχούν σε βραστό θαλασσινό νερό, αλατότητας 80,000 ppm (Mahmoudi et al., 2010).

Οι Καρυτσάς, Μενδρινός, Ραδόγλου μελέτησαν το ενδεχόμενο κατασκευής και λειτουργίας μιας γεωθερμικής μονάδας αφαλάτωσης χαμηλής ενθαλπίας σε συνδυασμό με μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η προτεινόμενη μονάδα αφαλάτωσης προσφέρεται για την παραγωγή 75.0 – 80.0 m<sup>3</sup> πόσιμου νερού/μέρα. Η γεωθερμική θερμότητα αποτελεί τη μοναδική πηγή ενέργειας του συστήματος. Επιπροσθέτως, το χρησιμοποιούμενο νερό αντλείται από γεωθερμικές γεωτρήσεις και χρησιμοποιείται στη λειτουργία τουρμπίνων, οργανικού κύκλου Rankine (ORC). Εκτός αυτού, το αντλούμενο γεωθερμικό νερό χρησιμοποιείται και στη λειτουργία ενός λέβητα πολλαπλής επίδρασης (Multiple effect boiler - MEB) ή μιας μονάδας απόσταξης πολλαπλής φάσης (Mahmoudi et al., 2010).

Η προτεινόμενη γεωθερμική μονάδα αφαλάτωσης και ενεργειακής παραγωγής αποτελείται από τα παρακάτω εξαρτήματα (Mahmoudi et al., 2010):

1. Γεωθερμικές γεωτρήσεις παραγωγής.
2. Γεωθερμικές υποβρύχιες αντλίες και μετατροπείς, εγκατεστημένους στα πηγάδια παραγωγής.
3. Δικτυακούς σωλήνες μεταφοράς νερού στην κύρια μονάδα.
4. Μονάδα οργανικού κύκλου Rankine (ORC): Μετατρέπει σχεδόν το 75.0 % της γεωθερμικής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Η ισχύς λειτουργίας του ανέρχεται στα 470.0 kWe.
5. Μονάδα αφαλάτωσης εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης και θερμικής συμπίεσης ατμού.
6. Έναν κύριο εναλλάκτη θερμότητας: Μεταφέρει την ενέργεια του ζεστού γεωθερμικού νερού που εξέρχεται της μονάδας ORC, στη μονάδα αφαλάτωσης εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης – θερμικής συμπίεσης ατμού.
7. Γεωθερμικές γραμμές μεταφοράς νερού, από τον κεντρικό εναλλάκτη θερμότητας στις γεωτρήσεις επανεισαγωγής.
8. Γεωτρήσεις επανεισαγωγής τοποθετημένες στο περιθώριο του γεωθερμικού πεδίου, κοντά στην ακτή και σε χαμηλότερο υψόμετρο από την κύρια μονάδα.
9. Γραμμές μεταφοράς θαλασσινού νερού: Μεταφέρουν 1000.0 m<sup>3</sup>/ώρα ψυκτικού νερού στη μονάδα εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης – θερμικής συμπίεσης ατμού και 200.0 – 575.0 m<sup>3</sup>/h ψυκτικού νερού στη μονάδα του οργανικού κύκλου Rankine.
10. Γραμμή μεταφοράς αφαλατωμένου νερού από τη μονάδα στις δεξαμενές αποθήκευσης, κοντά στην παρακείμενη πόλη.
11. Υποσταθμό ισχύος για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας ή την παράδοση στο τοπικό δίκτυο, ισχύος 500.0 kWe.
12. Κύριο υπολογιστικό σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης για την καταγραφή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και αυτόματο έλεγχο.

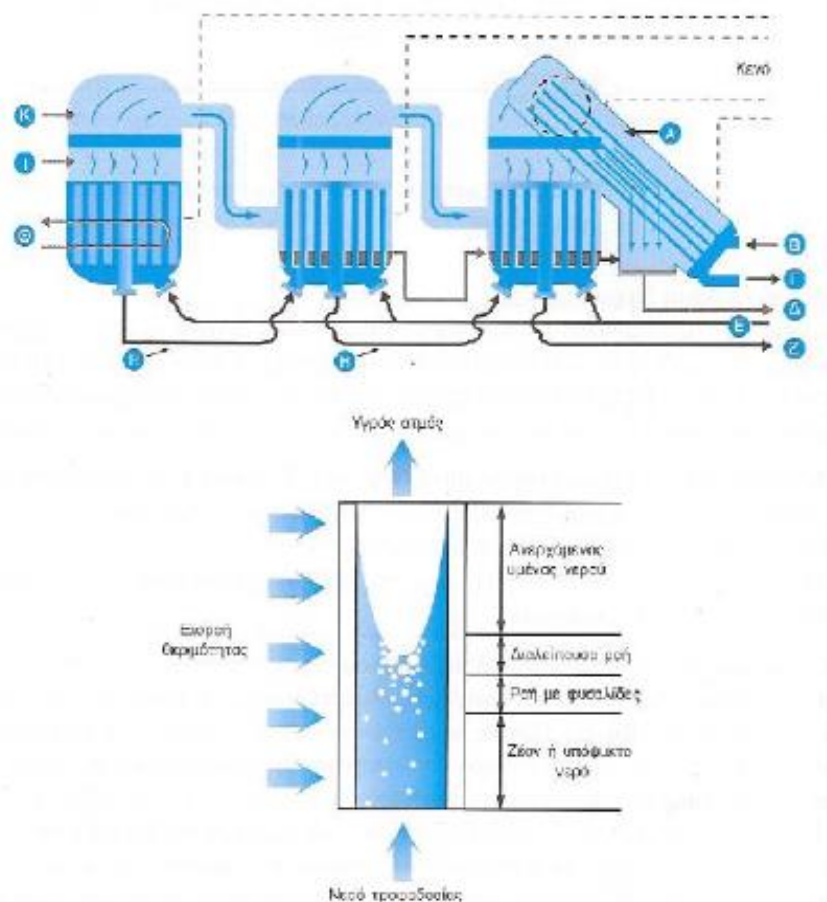
Η τοπική κοινωνία της Μήλου θα επωφελούνταν σημαντικά από την κατασκευή της παραπάνω μονάδας αφαλάτωσης καθώς το μοναδιαίο κόστος παραγωγής πόσιμου νερού εμφανίζεται ιδιαίτερα ελκυστικό. Συγκεκριμένα, ανέρχεται στα 1.5 €/m<sup>3</sup> (Low et al., 2004).

Στο νησί της Μήλου λειτουργεί από το καλοκαίρι του 2007, μια αιολική μονάδα αφαλάτωσης. Οι τωρινές συνθήκες λειτουργίας της μονάδας αντιστοιχούν σε παραγωγή 2,000 m<sup>3</sup>/μέρα πόσιμου νερού. Πρόκειται για μια ιδιωτική επιχείρηση που χρηματοδοτείται από το κράτος. Το παραγόμενο πόσιμο νερό πωλείται μέσω αυτής της επιχείρησης στο νησί της Μήλου. Σύμφωνα με το συμβόλαιο που υπογράφηκε ανάμεσα στην τελευταία και το Δήμο της Μήλου, το κόστος παραγωγής πόσιμου νερού ανέρχεται στα 1.8 €/m<sup>3</sup>. Η μονάδα συμπεριλαμβάνει τη μονάδα αφαλάτωσης, μια ανεμογεννήτρια ισχύος 600.0 kW, τις δεξαμενές αποθήκευσης χωρητικότητας 3,000.0 m<sup>3</sup> και το απομακρυσμένο σύστημα ελέγχου. Για την αποφυγή των ακουστικών – οπτικών διαταραχών, η μονάδα αφαλάτωσης βρίσκεται εγκατεστημένη σε ένα λόφο, μη ορατό από το νησί της Μήλου (Kondili & Kaldellis, n.d.).



Οι Manologlou et al. παρουσίασαν τις κοινωνικο – οικονομικές επιπτώσεις της γεωθερμικής μονάδας αφαλάτωσης στο νησί της Μήλου (Mohamed & El-Minshawy, 2009).

### 3.13.4 Μονάδα αφαλάτωσης στην Κίμωλο



Σχήμα 3.9: Σχηματική αναπαράσταση της διεργασίας αφαλάτωσης μέσω εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης (Πάνω), Ροή στους κατακόρυφους αγωγούς εξάτμισης (Κάτω) (Γεωθερμία, Εκδόσεις Τζιόλα)

Ακολουθεί αναφορά στα επιμέρους εξαρτήματα που συναποτελούν τη μονάδα αφαλάτωσης: α) Συμπυκνωτής, β). Είσοδος θαλασσινού νερού, γ) Έξοδος θαλασσινού νερού, δ) Προϊόν απόσταξης, ε) Τροφοδοσία θαλασσινού νερού, ζ) Έξοδος εναπομένουσας άλμης, η). Ανάκτηση θερμότητας από την εναπομένουσα άλμη, θ) Είσοδος, έξοδος γεωθερμικού ρευστού, ι) Υγρός ατμός

Το θαλασσινό νερό τροφοδοτείται στο πρώτο δοχείο εξάτμισης της μονάδας με τη μορφή λεπτής στοιβάδας, σε σειρά κατακόρυφων αγωγών. Στους τελευταίους θερμαίνεται από τη ροή του γεωθερμικού νερού στους αγωγούς μεταφοράς θερμότητας. Σε άλλα συστήματα, η εισαγωγή του θαλασσινού νερού είναι εφικτή μέσω του καταιονισμού. Εξαιτίας του γεγονότος ότι η πίεση που επικρατεί μέσα στο δοχείο είναι χαμηλότερη από την ατμοσφαιρική, υφίσταται εξάτμιση του θαλασσινού νερού. Το υπόλοιπο νερό τροφοδοτείται στο δεύτερο δοχείο εξάτμισης, μέσω ενός κεντρικού αγωγού. Στο δεύτερο δοχείο εξάτμισης επικρατεί ακόμη χαμηλότερη πίεση συγκριτικά με το πρώτο δοχείο. Στο δεύτερο δοχείο προστίθεται και θαλασσινό νερό τροφοδοσίας. Εκεί, το αλμυρό νερό θερμαίνεται από τον ατμό του πρώτου δοχείου με συμπύκνωση ενός μέρους του ατμού. Ο ατμός από το δεύτερο δοχείο θερμαίνει το αλμυρό νερό που περιέχεται στο τρίτο δοχείο

κ.ο.κ. Το συμπύκνωμα που προκύπτει από κάθε δοχείο, προστίθεται τελικά στο συμπυκνωτή. Σε αυτόν το συμπυκνωτή λαμβάνει χώρα η συμπύκνωση του ατμού από το τελευταίο δοχείο, με τη βοήθεια ψυχρού θαλασσινού νερού. Σε ένα τελευταίο στάδιο, η ποσότητα του αφαλατωμένου νερού οδηγείται σε μια δεξαμενή αποθήκευσης (Γεωθερμία, Εκδόσεις Τζιόλα).

### **3.13.5 Μονάδα αφαλάτωσης στο Σουσάκι Κορινθίας**

Το σύστημα αυτό εκμεταλλεύεται μέρος των γεωθερμικών αποθεμάτων στο Σουσάκι Κορινθίας, για την παραγωγή πόσιμου αφαλατωμένου νερού. Η δυναμικότητα της συγκεκριμένης μονάδας αφαλάτωσης ανέρχεται στα 300.0 m<sup>3</sup>/μέρα. Για την επίτευξη μεγαλύτερης παραγωγικότητας και χαμηλότερου κόστους, γίνεται χρήση πρωτοποριακής τεχνολογίας. Στην πρωτοποριακή τεχνολογία συγκαταλέγεται η οικοδόμηση μιας μονάδας αφαλάτωσης που συνδυάζει την εξάτμισης πολλαπλής επίδρασης και την απόσταξη πολλαπλής φάσης, σε κατακόρυφους σωλήνες (Γεωθερμία, Εκδόσεις Τζιόλα).

### **3.13.6 Μονάδα αφαλάτωσης στον Άγιο Φωκά της Τήνου**

Το νησί της Τήνου παρουσιάζει περιορισμένους υδάτινους πόρους. Ως εκ τούτου, έχουν υπάρξει χρονικές περίοδοι, κατά τις οποίες η ζήτηση σε πόσιμο νερό ξεπέρασε την υπάρχουσα διαθεσιμότητα του. Το 2001 και το 2002, ήταν εμφανής η ανάγκη εισαγωγής της αναγκαίας ποσότητας νερού από τα γειτονικά νησιά. Ωστόσο, η προαναφερθείσα διαδικασία εισαγωγής συνεπαγόταν όλες τις σχετιζόμενες περιβαλλοντικές (εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου οφειλόμενες στην θαλάσσια μεταφορά μέσω πλοίων), οικονομικές (κόστος νερού γύρω στα 12 €/m<sup>3</sup>) κ.ο.κ επιπτώσεις. Ως εκ τούτου, το 2002 εγκαταστάθηκε μια συμπαγής μονάδα αφαλάτωσης στον Άγιο Φωκά, καλύπτοντας έκτοτε το μεγαλύτερο μέρος των αναγκών σε πόσιμο νερό του νησιού. Πρόκειται για μια μονάδα αντίστροφης όσμωσης, που αντλεί την απαιτούμενη ενέργεια λειτουργίας της από ηλιακούς συλλέκτες (“Technical report on the overall evaluation of the prototype brine treatment system Action 5 Overall evaluation of the pilot system ’ s environmental and economic performance / LCA Analysis - Suggestions for full- scale implementation of the solardriven br,” n.d.).

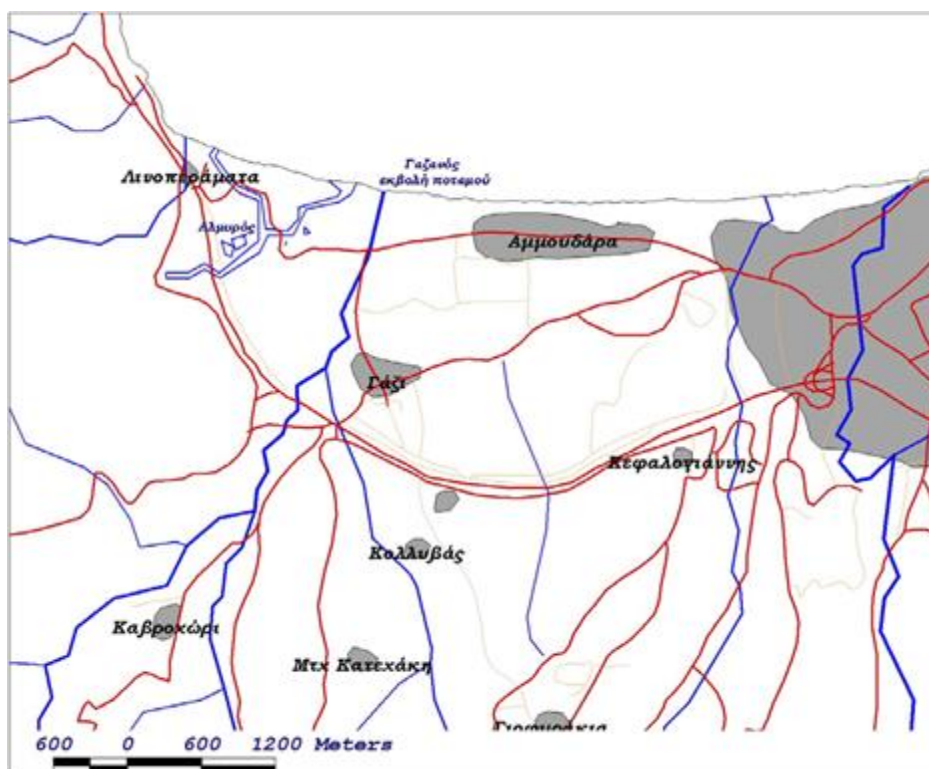
## 4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΝΟΣ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ ΣΤΟ ΝΗΣΙ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ

### 4.1 Περιοχή μελέτης: Αλμυρός ποταμός Ηρακλείου Κρήτης

#### Γεωγραφικά χαρακτηριστικά

Ο υγρότοπος του Αλμυρού ποταμού βρίσκεται στο Δήμο Μαλεβιζίου και σε απόσταση 8.0 km από την πόλη του Ηρακλείου. Καταλαμβάνει έκταση περίπου 88.0 εκταρίων και αποτελείται από φυσικούς ή ημιφυσικούς οικότοπους (λίμνη, ποτάμι, καλαμιώνες, αμμώδης εκτάσεις κλπ) και από περιοχές ανθρωπογενών δράσεων (καλλιέργειες, εκχερσωμένες εκτάσεις και δομημένες περιοχές).

Η ονομασία του συγκεκριμένου ποταμού προέρχεται από την υφάλμυρη ποιότητα των νερών της λίμνης, από την πηγή της οποίας αντλεί το νερό του. Συγκεκριμένα, η πηγή του Αλμυρού ποταμού βρίσκεται στον πυθμένα μικρής λίμνης στο χαμηλότερο τμήμα της απότομης πλαγιάς των βορειοανατολικών παρυφών της οροσειράς του Ψηλορείτη και στο υψόμετρο των 12.0 m. Επιπροσθέτως, το ποτάμι του έχει μήκος περίπου 1,800 m και πλάτος 5.0 – 20.0 m, ενώ η ροή του είναι συνεχής και εκβάλλει στο μέσο περίπου της κοιλάδας του ομώνυμου κόλπου προς το Κρητικό πέλαγος. Στις εκβολές του ποταμού Αλμυρού σχηματίζεται δέλτα, με την ακτή στα πλάγια της εκβολής του να είναι αμμώδης με λίγους αμμόλοφους. Η λεκάνη απορροής του βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή της κατά πολύ μεγαλύτερης λεκάνης απορροής του Γαζιανού ποταμού. Ο υγρότοπος του Αλμυρού ποταμού παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Ο υγρότοπος του Αλμυρού ποταμού

Στο μέσον περίπου του ποταμού Αλμυρού συνδέεται με αυτόν ένα τεχνητό κανάλι μήκους 800.0 m και πλάτους 5.0 – 10.0 m, το οποίο διανοίχτηκε πριν από μερικές δεκαετίες, με σκοπό ένα μέρος των υδάτων του ποταμού να χρησιμοποιείται για την ψύξη των μηχανών του εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Δ.Ε.Η. (εργοστάσιο

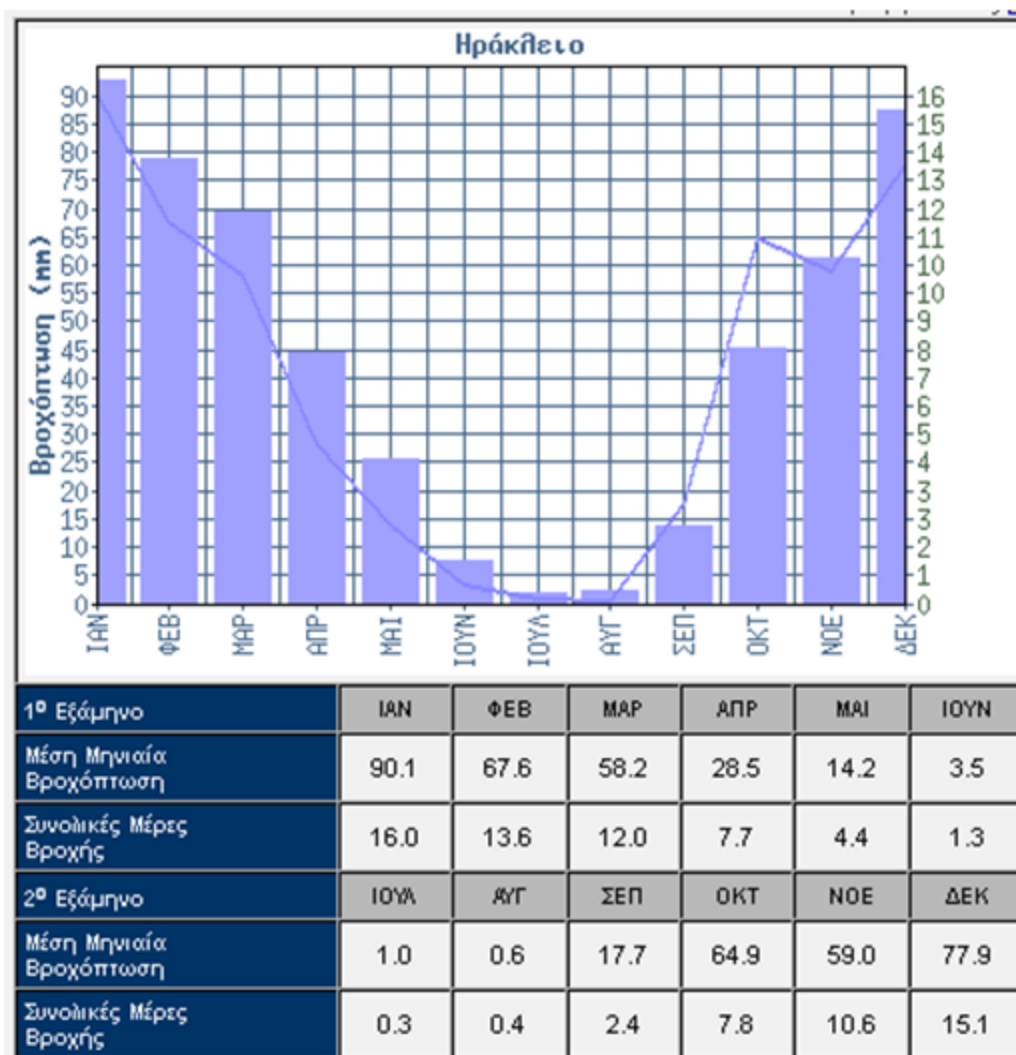
Λινοπεραμάτων). Στο Σχήμα 4.2 δίδεται η μορφή του Αλμυρού ποταμού, έτσι όπως έχει τη σήμερον ημέρα.



Σχήμα 4.2: Ο Αλμυρός ποταμός

#### **Κλιματολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά**

Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται κυρίως ως εύκρατο μεσογειακό. Ο χειμώνας είναι αρκετά ήπιος και υγρός με αρκετές βροχοπτώσεις. Όμως, συγκριτικά με άλλες περιοχές της Κρήτης, η μέση συνολική ετήσια τιμή υετού της περιοχής του Αλμυρού είναι από τις πλέον χαμηλότερες του νησιού και φτάνει τα 483.2 mm. Οι πιο βροχεροί μήνες του έτους είναι ο Δεκέμβριος και ο Ιανουάριος, ενώ κατά τους καλοκαιρινούς μήνες επικρατεί ανομβρία (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3: Βροχοπτώσεις στην περιοχή του Ηρακλείου Κρήτης ([http://www.hnms.gr/hnms/greek/climatology/climatology\\_region\\_diagrams\\_html?dr\\_city=Heraklion](http://www.hnms.gr/hnms/greek/climatology/climatology_region_diagrams_html?dr_city=Heraklion))

Οι συνολικές ημέρες βροχής ανά έτος είναι κατά μέσο όρο 91.6. Η ξηρή περίοδος της περιοχής διαρκεί από το Μάιο έως το Σεπτέμβριο με τους πιο ξηρούς και θερμούς μήνες τον Ιούλιο και τον Αύγουστο. Σαν τους πιο υγρούς μήνες από την άλλη πλευρά, εμφανίζονται ο Δεκέμβριος και ο Ιανουάριος ([http://www.hnms.gr/hnms/greek/climatology/climatology\\_region\\_diagrams\\_html?dr\\_city=Heraklion](http://www.hnms.gr/hnms/greek/climatology/climatology_region_diagrams_html?dr_city=Heraklion)).

Το νερό της πηγής του ποταμού Αλμυρού αναβλύζει μέσα από ένα άνοιγμα, διαμέτρου περίπου 50.0 m. Σε περιόδους υψηλών παροχών του εμφανίζεται μία δευτερεύουσα έξοδος του νερού στην πλευρά των βράχων. Το επίπεδο του νερού βρισκόταν μέχρι το 1977 σε υψόμετρο 2.0 – 3.0 m και ρυθμιζόταν από ένα μικρό φράγμα. Μετά το 1977, με τη δημιουργία ενός μεγαλύτερου φράγματος, η ρύθμιση της στάθμης του νερού γίνεται σε ένα υψόμετρο μεταξύ των 3.0 και των 10.0 m περίπου, σχηματίζοντας με αυτόν τον τρόπο τεχνητή λίμνη επιφανείας μερικών στρεμμάτων.

Σε έκθεση του Τεχνικού Επιμελητηρίου της Ελλάδος, το Τμήμα Ανατολικής Κρήτης (ΤΕΕ/ΤΑΚ) το 2013 αποτυπώνει το δυναμικό του Αλμυρού Ποταμού, για την παραγωγή πόσιμου νερού. Σύμφωνα με την προαναφερθείσα έκθεση, η μηνιαία παροχή της πηγής του σε υφάλμυρο νερό κυμαίνονταν από το 1971 έως και το 2003 στο εύρος των 9.0 έως 65.0 hm<sup>3</sup>. Η μόλις ειπωθείσα παροχή αντιστοιχεί σε μια μέση ημερήσια παροχή της τάξης



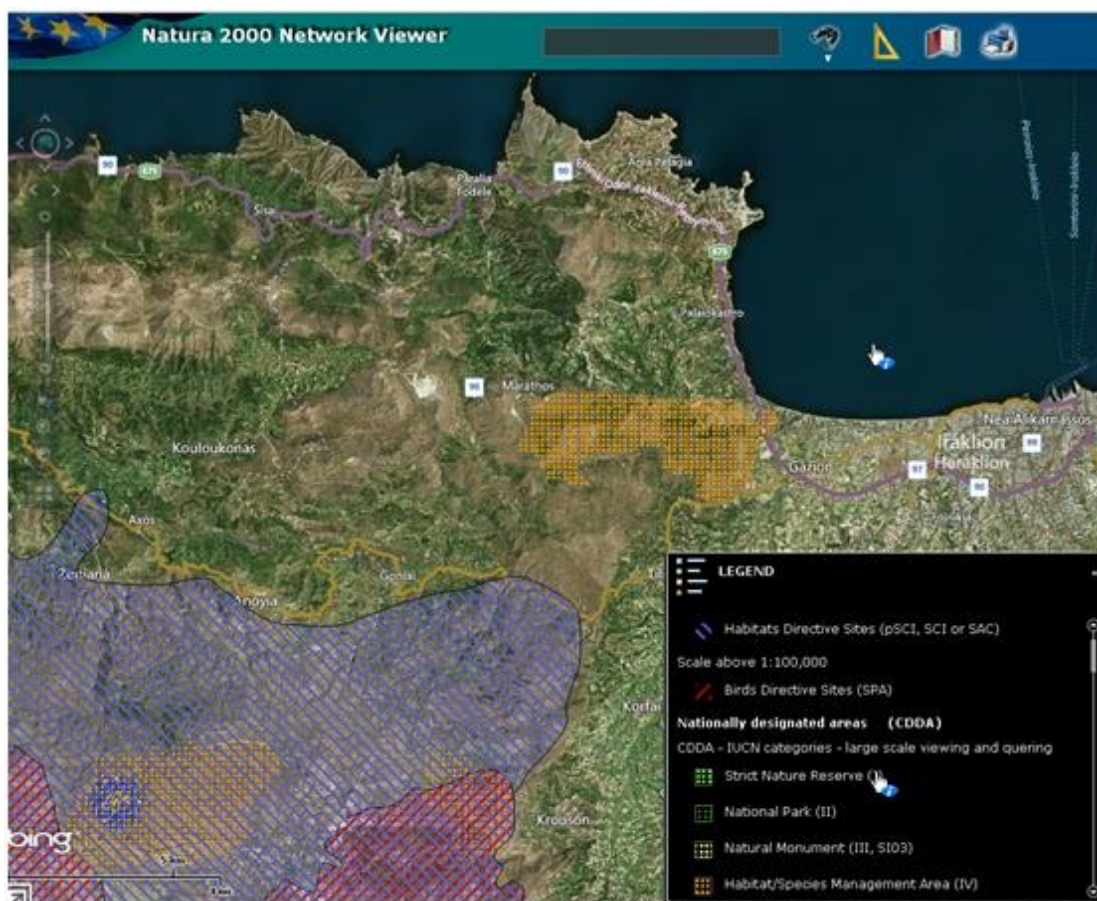
των 292,000 – 2,090,968 m<sup>3</sup>/day ή αλλιώς των 3.4 – 24.2 m<sup>3</sup>/sec. Η μέση ετήσια απορροή της πηγής είναι περίπου 240 \* 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> η οποία θεωρητικά είναι ικανή να υδροδοτήσει μια πόλη της τάξης των 3.5 εκατομμυρίων κατοίκων.

Μέχρι στιγμής, οι εκροές της πηγής του Αλμυρού ποταμού παραμένουν ανεκμετάλλετες σε μεγάλο βαθμό, αφού ένα μέρος μόνο αυτών χρησιμοποιείται σαν ψυκτικό νερό από τον Θερμοηλεκτρικό Σταθμό της ΔΕΗ στα Λινοπεράματα και από τις ήδη υπάρχουσες μονάδες αφαλάτωσης, που κατασκευάστηκαν τα τελευταία χρόνια.

### Φυσικό Περιβάλλον

Το υδροτοπικό σύστημα του Αλμυρού, μαζί με το φαράγγι, αποτελούν περιοχή ιδιαίτερης οικολογικής αξίας. Η περιοχή της πηγής και του ποταμού έχει θεσμοθετηθεί ως περιοχή προστασίας στα πλαίσια του προγράμματος CORINE: βιότοπος «Πηγή και ποτάμι Αλμυρού – Γάζι», με κωδικό A00050007.

Επίσης, ο υγρότοπος και το φαράγγι είχαν προταθεί στον αρχικό κατάλογο του Δικτύου Natura 2000 με κωδικό GR4310001 αλλά τελικά δεν εντάχθηκαν και δεν περιλαμβάνονται στον οριστικό κατάλογο. Η πλησιέστερη στην περιοχή προστατευόμενη περιοχή Natura 2000 είναι η περιοχή με κωδικό GR 4330005 «Όρος Ίδη (Βορίζια, Γερανοί, Καλή Μαδάρα)» (SCI – Τόπος Κοινοτικής Σημασίας). Τμήμα της περιοχής αυτής έχει χαρακτηριστεί και ως Ζώνη Ειδικής Προστασίας για την Ορνιθοπανίδα (SPA) με κωδικό GR 4310009 (Κρουσώνας – Βρωμονερό Ίδης).

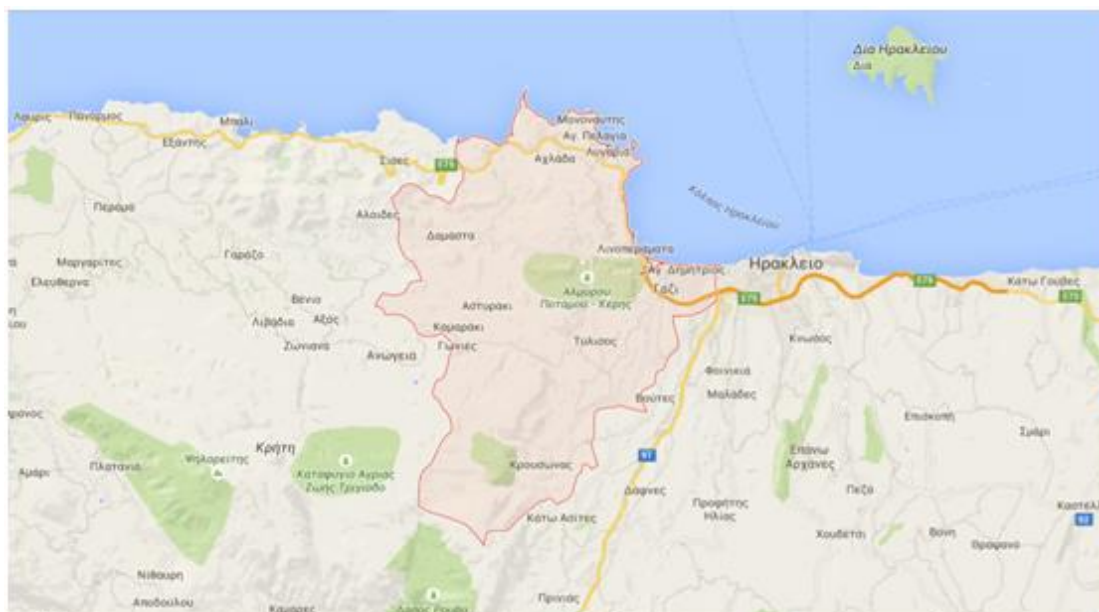


Σχήμα 4.4: Περιοχές Natura 2000 (<http://natura2000.eea.europa.eu/#>)

### Δημογραφικά στοιχεία

Η περιοχή του Αλμυρού, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα του Νομού Ηρακλείου, κοντά στα βόρεια παράλια της Κρήτης και

ανήκει διοικητικά στο Δήμο Μαλεβιζίου. Ο Δήμος καταλαμβάνει έκταση 2,641 Km<sup>2</sup> και αποτελείται από 3 Δημοτικές Ενότητες (πρώην Καποδιστριακοί Δήμοι) και συνολικά 19 Δημοτικές και Τοπικές Κοινότητες (πρώην Τοπικά Διαμερίσματα), με συνολικό πληθυσμό 24,864 άτομα σύμφωνα με την απογραφή του 2011 (<http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE/PAGE-census2011>).



Σχήμα 4.5: Ο Δήμος Μαλεβιζίου

Η έδρα του Δήμου είναι ο οικισμός του Γαζίου που πήρε το όνομά του από το Γαζιανό ποταμό. Είναι από τους πλέον αναπτυσσόμενους οικισμούς του νομού Ηρακλείου. Η περιοχή του Γαζίου περιλαμβάνει αρκετούς οικισμούς, οι μεγαλύτεροι των οποίων είναι η Αμμουδάρα, η Αγία Μαρίνα και το Καβροχώρι. Ο τουρισμός αποτελεί την πρώτη πλουτοπαραγωγική πηγή των κατοίκων και στην περιοχή δραστηριοποιείται μεγάλος αριθμός ξενοδοχειακών και τουριστικών επιχειρήσεων.

Τις τελευταίες δεκαετίες (από το 1971 και μετά) παρατηρείται μεγάλη αύξηση του πληθυσμού του δήμου Μαλεβιζίου. Η απογραφή του 2011 έδειξε πως ο πληθυσμός του έχει σχεδόν διπλασιαστεί από το 1981, κυρίως λόγω της μεγάλης οικιστικής ανάπτυξης της παραλιακής ζώνης.

Στους Πίνακες 4.1 και 4.2 παρουσιάζονται περιληπτικά η πληθυσμιακή εξέλιξη και οι % μεταβολές του πληθυσμού της Δ.Κ. και της Δ.Ε. Γαζίου, καθώς και του Δ. Μαλεβιζίου, του νομού Ηρακλείου και της περιφέρειας Κρήτης συνολικά από το 1961.

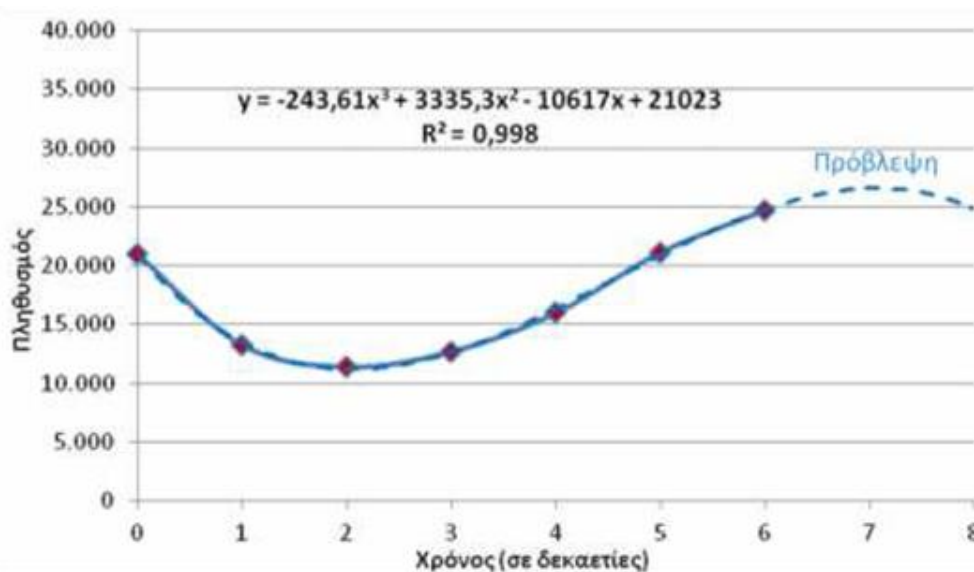
α/α		ΠΛΗΘΥΣΜΙΑΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ					
		1961	1971	1981	1991	2001	2011
1	Δ.Κ. ΓΑΖΙΟΥ	946	932	2.057	5.210	9.637	-
2	ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΓΑΖΙΟΥ	3.680	3.510	4.851	8.133	13.581	-
3	ΔΗΜΟΣ ΜΑΛΕΒΙΖΙΟΥ	13.280	11.421	12.694	15.970	21.131	24.710
4	ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	208.734	209.670	243.622	264.906	292.489	304.270
5	ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΚΡΗΤΗΣ	483.258	456.642	502.165	540.054	601.159	621.340

Πίνακας 4.1: Πληθυσμιακά χαρακτηριστικά από το 1961 έως το 2011 (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)

α/α		% ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ				
		1961-1971	1971-1981	1981-1991	1991-2001	2001-2011
1	Δ.Κ. ΓΑΖΙΟΥ	-1,48	120,71	153,28	84,97	-
2	ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΓΑΖΙΟΥ	-4,62	38,21	67,66	66,99	-
3	ΔΗΜΟΣ ΜΑΛΕΒΙΖΙΟΥ	-14,00	11,15	25,81	32,32	16,94
4	ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	0,45	16,19	8,84	10,41	4,03
5	ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΚΡΗΤΗΣ	-5,51	9,97	7,55	11,31	3,36

Πίνακας 4.2: Ποσοστιαίες μεταβολές του πληθυσμού από το 1961 έως το 2011 (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)

Στο παρακάτω Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η πληθυσμιακή μεταβολή της περιοχής του δήμου Μαλεβιζίου από το 1951 έως και το 2011 και η πρόβλεψη του πληθυσμού για την επόμενη εικοσαετία (έως 2031) (Έκθεση ΤΕΕ/ΤΑΚ, 2013). Εκτιμάται ότι ο πληθυσμός του δήμου Μαλεβιζίου θα είναι περίπου 26,500 κάτοικοι το έτος 2021 και 24,800 το έτος 2031.



Σχήμα 4.6: Μεταβολή και πρόβλεψη του πληθυσμού του δήμου Μαλεβιζίου (Έκθεση ΤΕΕ/ΤΑΚ, 2013)

#### 4.2 Μονάδες αφαλάτωσης νερών Αλμυρού Ποταμού Ηρακλείου Κρήτης

Στην περιοχή του Αλμυρού είναι ήδη εγκατεστημένες ή πρόκειται σύντομα να εγκατασταθούν μονάδες αφαλάτωσης.

Η μονάδα αφαλάτωσης της εταιρείας «ΜΕΣΟΓΕΙΟΣ» τέθηκε σε λειτουργία τον Αύγουστο του 200. Κατασκευάστηκε με αναθέτουσα αρχή τη Δημοτική Επιχείρηση Γαζίου με επωνυμία «ΑΛΜΥΡΟΣ Α.Ε.». Επεξεργάζεται το υφάλμυρο νερό από τις γεωτρήσεις του Αλμυρού ποταμού με τη μέθοδο της αντίστροφης όσμωσης και παράγει 1,000m<sup>3</sup>/day πόσιμου νερού

(<http://www.mesogeos.gr/WebPage/MonadaAfalatosisIrakleio>).





Σχήμα 4.7: Μονάδα αφαλάτωσης νερών Αλμυρού Ποταμού της εταιρείας «ΜΕΣΟΓΕΙΟΣ»

Η παρούσα εξεταζόμενη μονάδα αφαλάτωσης αποτελείται από τις παρακάτω εγκαταστάσεις (<http://www.mesogeos.gr/UploadedFiles/Pdfs/KRITI.pdf>):

1. Δεξαμενές προσωρινής αποθήκευσης ακατέργαστου νερού
2. Εγκαταστάσεις προεπεξεργασίας:
  - a) φίλτρο άμμου κατακράτησης αιωρούμενων σωματιδίων μεγέθους  $< 25.0 \mu\text{m}$
  - b) φίλτρο φυσιγγίων κατακράτησης αιωρούμενων σωματιδίων  $< 5.0 \mu\text{m}$
  - c) δοσιμετρητής αντικαθαλατωτικού προσθέτου για την προστασία των μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης
  - d) Σύστημα αντίστροφης όσμωσης
  - e) αντλία υψηλής πίεσης
  - f) δοχεία πίεσης μεμβρανών
  - g) μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης
  - h) σύστημα χημικού καθαρισμού μεμβρανών
4. Σύστημα μετεπεξεργασίας παραγόμενου νερού (το οποίο αποτελεί το 75.0 % της παροχής εισόδου)
5. Δεξαμενές προσωρινής αποθήκευσης της άλμης (συμπύκνωμα) που είναι το 25.0 % της παροχής εισόδου
6. Σύστημα μετεπεξεργασίας
  - a) σύστημα ανάμιξης με φιλτραρισμένο νερό για τη διόρθωση της σκληρότητας, της αλκαλικότητας και του pH
  - b) σύστημα απολύμανσης του τελικά παραγόμενου νερού
7. Δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης παραγόμενου πόσιμου νερού
8. Δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης απορριπτόμενης άλμης και αντλιοστάσιο απομάκρυνσης.
9. Αντλιοστάσιο διοχέτευσης του πόσιμου νερού στο δίκτυο του Δήμου Γαζίου

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας είναι:

α/α	Ονομαστική δυναμικότητα συστήματος ( $\text{m}^3/\text{hr}$ )	45
1	Ονομαστική δυναμικότητα συστήματος ( $\text{m}^3/\text{d}$ )	1000
2	Παροχή τροφοδοσίας υφάλμυρου νερού ( $\text{m}^3/\text{hr}$ )	60
3	Παροχή απορριπτόμενης άλμης ( $\text{m}^3/\text{hr}$ )	15
4	Ρυθμός ανάκτησης (%)	75

Πίνακας 4.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας αντίστροφης όσμωσης της εταιρείας «ΜΕΣΟΓΕΙΟΣ»

Σύμφωνα με τις αναλύσεις που πραγματοποιούνται καθημερινά, η ποιότητα του παραγόμενου νερού συγκριτικά με το νερό των γεωτρήσεων της περιοχής έχει ως εξής (<http://www.mesogeos.gr/UploadedFiles/Pdfs/KRITI.pdf>):

Παράμετρος	Νερό γεωτρήσεων	Παραγόμενο νερό
<b>Φυσικοχημικές παράμετροι</b>		
pH	7,62	7,43
Ολική σκληρότητα / °F	86,49	6,41
Παροδική σκληρότητα / °F	17,50	1,50
Αγωγιμότητα (20°C) / μS/cm	5270	456
Χλωριούχα (Cl) / mg/L	2006,47	133,29
Διττανθρακικά (HCO <sub>3</sub> ) / mg/L	213,57	18,31
Θειικά (SO <sub>4</sub> ) / mg/L	355,72	17,36
Νιτρικά (NO <sub>3</sub> ) / mg/L	6,27	1,84
Νιτρώδη (NO <sub>2</sub> ) / mg/L	<0,01	<0,01
Αμμώνιο (NH <sub>4</sub> ) / mg/L	<0,07	<0,07
Ασβέστιο (Ca) / mg/L	137,88	10,42
Μαγνήσιο (Mg) / mg/L	127,09	9,29
Σίδηρος (Fe) / mg/L	0,53	0,07
Κάλιο (K) / mg/L	37,2	2,61
Νάτριο (Na) / mg/L	973,0	74,2
<b>Μικροβιολογικές παράμετροι</b>		
Ολικά κολοβακτηριοειδή / cfu/100ml	<1	<1
Escherichia coli / cfu/100ml	<1	<1
Εντερόκοκκοι / cfu/100ml	<1	<1
Αριθμός αποικιών στους 37°C / cfu/ml	>300	3
Αριθμός αποικιών στους 22°C / cfu/ml	>300	5

Πίνακας 4.4: Συγκριτική αξιολόγηση της ποιότητας του νερού που παράγεται από τη μονάδα αντίστροφης όσμωσης της εταιρείας «ΜΕΣΟΓΕΙΟΣ» και αυτής των γεωτρήσεων της περιοχής

(<http://www.mesogeos.gr/UploadedFiles/Pdfs/KRITI.pdf>)

Τον Απρίλιο του 2014 έγιναν τα εγκαίνια μιας ακόμα μονάδας αφαλάτωσης του Αλμυρού Ποταμού του Δήμου Μαλεβιζίου Κρήτης. Κατασκευάστηκε από τη SYCHEM AE στα πλαίσια του ΕΣΠΑ και η λειτουργία της χρηματοδοτείται από τους ίδιους πόρους της ΔΕΥΑ Μαλεβιζίου. Θα λειτουργήσει για 5 έτη και έχει ιδιαίτερα χαμηλό λειτουργικό κόστος, της τάξης των 0.26 €/m<sup>3</sup>. Η μονάδα είναι της ονομαστικής δυναμικότητας των 2,000 m<sup>3</sup>/d και διαθέτει τα πλέον προηγμένα τεχνολογικά συστήματα, όπως προκατεργασία νερού με υπερδιήθηση, σύστημα ανάκτησης ενέργειας συμπυκνώματος και προηγμένο ηλεκτρονικό έλεγχο, διασφαλίζοντας έτσι ελάχιστο κόστος λειτουργίας καθώς και υψηλή αξιοπιστία (<http://www.sychem.gr/el/nea/item/126-egkainia-ekpaideytikou-parkou-for-sychem-almyros>).





Σχήμα 4.8: Η μονάδα αφαλάτωσης του Αλμυρού Ποταμού του Δήμου Μαλεβιζίου Κρήτης από την εταιρεία SYCHEM ΑΕ.

Η αφαλάτωση γίνεται με την τεχνική της αντίστροφης όσμωσης. Για να ξεπεραστούν τα ενδεχόμενα προβλήματα της διακύμανσης της ποιότητας του νερού (λόγω των οργανικών και φερτών υλικών) έχει τοποθετηθεί μια επιπλέον μονάδα προκατεργασίας, στην οποία εφαρμόζεται η μέθοδος της υπερδιήθησης. Το σύστημα αυτό της προκατεργασίας του νερού βελτιώνει την ποιότητα του ακατέργαστου νερού τροφοδοσίας και ελαχιστοποιεί την έμφραξη των μεμβρανών από τυχόν αιωρούμενα στερεά και άλλους ανόργανους και οργανικούς μολυντές, εξασφαλίζοντας σταθερή απόδοση με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Αντί των συμβατικών φίλτρων χρησιμοποιούνται φίλτρα υπερδιήθησης, τα οποία μπορούν να αντιμετωπίσουν μεγάλα φορτία σε αιωρούμενα στερεά και να επιτύχουν φιλτράρισμα σωματιδίων μεγέθους 10.0 nm.

Το τμήμα της αφαλάτωσης αποτελείται από:

1. Αντλίες υψηλής πίεσης (ανεβάζουν την πίεση του νερού στην είσοδο των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης ως τα 25.0 bar)
2. Δοχεία πίεσης μεμβρανών
3. Μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης
4. Σύστημα χημικού καθαρισμού μεμβρανών

Για την ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης ενέργειας έχει χρησιμοποιηθεί σύστημα ανάκτησης ενέργειας με υδροστρόβιλο (Turbo Charger). Έτσι, η ενέργεια του συμπυκνώματος που απορρίπτεται αξιοποιείται, μειώνοντας την απαιτούμενη ενέργεια από τις αντλίες υψηλής πίεσης κατά 15.0 %.

Το αφαλατωμένο νερό είναι πολύ υψηλής καθαρότητας και για αυτό τον λόγο είναι απαραίτητη η προσθήκη στοιχείων όπως το ασβέστιο και μαγνήσιο, καθώς και η διόρθωση του pH, ώστε να αποκτήσει τα βέλτιστα χαρακτηριστικά ποσιμότητας. Η ρύθμιση των ανωτέρω στην μονάδα, γίνεται με την χρήση φυσικού πετρώματος δολομίτη ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgO}$ ) ή/και με ελεγχόμενη μίξη με το νερό από τη μονάδα υπερδιήθησης του πρώτου σταδίου (<http://www.sychem.gr/el/nea/item/126-egkainia-ekpaideytikou-parkou-for-sychem-almyros>).

### 4.3 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΛΜΥΡΟΥ

#### Εκτίμηση ροής του Αλμυρού ποταμού

Για τον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής της παροχής του Αλμυρού ποταμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι υδρολογικοί δείκτες της διεθνούς βιβλιογραφίας (πχ. Μέθοδος Tennant - Montana) ή της Ελληνικής νομοθεσίας (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2008).

Σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2008), ως ελάχιστη απαιτούμενη οικολογική παροχή λαμβάνεται ο μεγαλύτερος από τους παρακάτω δείκτες:

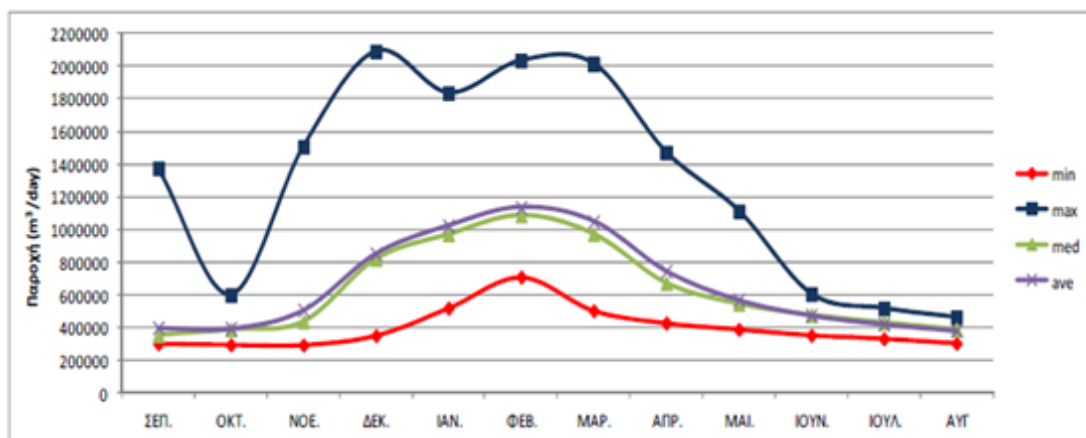
1. Το 30.0 % της μέσης παροχής των θερινών μηνών Ιούνιος - Ιούλιος – Αύγουστος
2. Το 50.0 % της μέσης παροχής του μηνός Σεπτεμβρίου ή
3. 30.0 L/sec σε κάθε περίπτωση

Σύμφωνα με την μέθοδο των Tennant – Montana, ως ελάχιστη παραμένουσα παροχή ώστε η ροή να χαρακτηρίζεται άριστη, λαμβάνεται ο μεγαλύτερος από τους παρακάτω δείκτες:

1. Το 30.0 % της μέσης παροχής
2. Το 30.0 % της μέσης παροχής των μηνών Οκτώβριος - Μάρτιος
3. Το 50.0 % της μέσης παροχής των μηνών Απρίλιος - Σεπτέμβριος

Οι μέγιστες παροχές της πηγής του Αλμυρού ποταμού παρατηρούνται κατά τους χειμερινούς μήνες Δεκέμβριος έως Μάρτιος και υπερβαίνουν τα  $1.8 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ .

Στο παρακάτω Σχήμα 4.9 δίδονται οι μηνιαίες διακυμάνσεις των παροχών του Αλμυρού ποταμού.



Σχήμα 4.9: Μηνιαία διακύμανση της μέγιστης, ελάχιστης, διάμεσης και μέσης παροχής της πηγής Αλμυρού (Έκθεση ΤΕΕ/TAK, 2013)

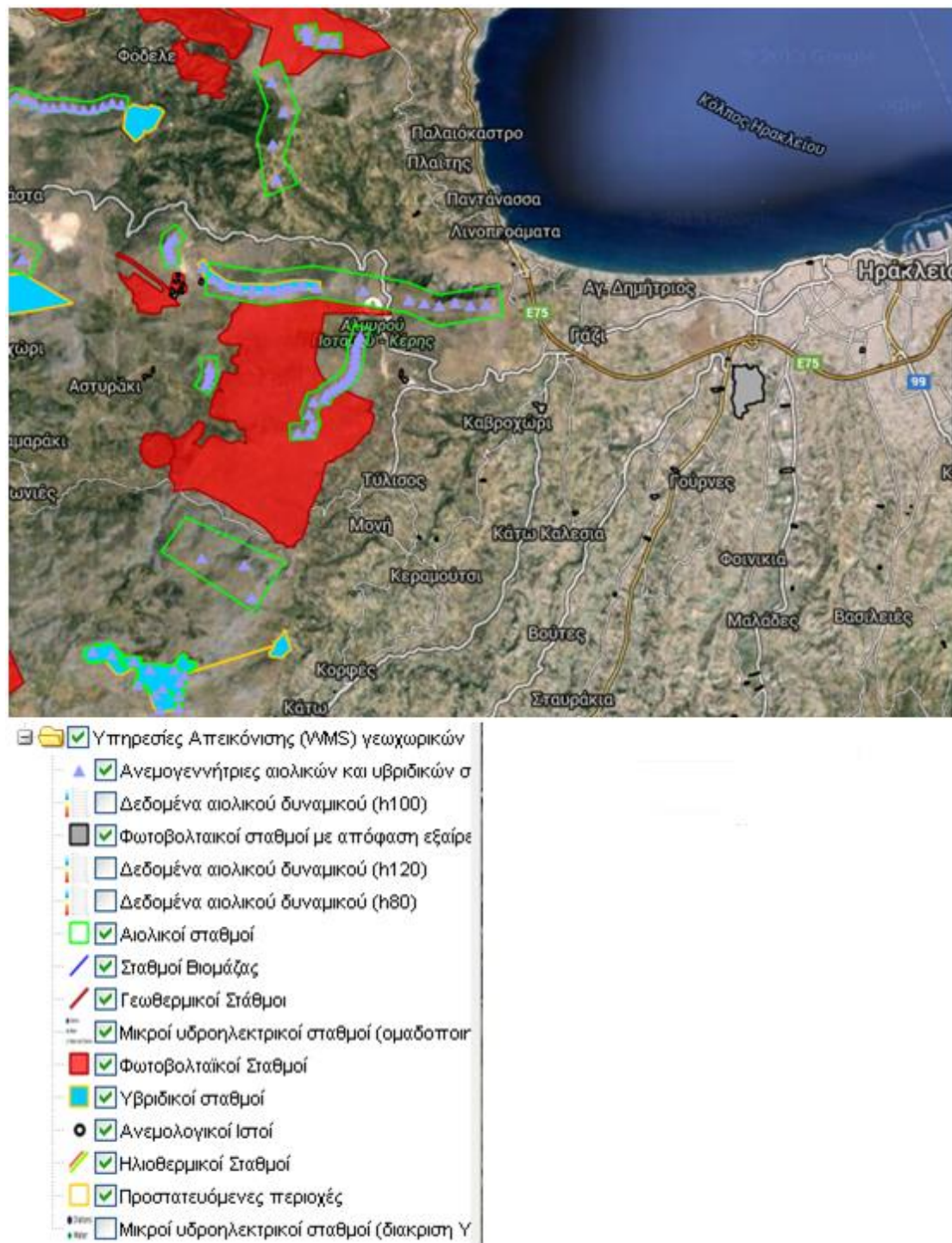
Το νερό των ποταμών καλύπτει και σημαντικές ανθρώπινες όπως η ύδρευση, η άρδευση και οι βιομηχανικές λειτουργίες. Η οικολογική παροχή ουσιαστικά δείχνει την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή ροής που πρέπει να παραμένει στο υδάτινο σύστημα, έτσι ώστε το οικοσύστημα που έχει σχέση με αυτό να διατηρείται σε οριακή καλή κατάσταση. Να μην οδηγείται δηλαδή σε σημαντική υποβάθμιση εξαιτίας υπερβολικής μείωσης της φυσικής ροής από υπερβολική άντληση, για την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών.

Για την πηγή του Αλμυρού, σύμφωνα με την Έκθεση του Τεχνικού Επιμελητηρίου (Έκθεση ΤΕΕ/TAK, 2013), η παροχή απόληψης νερού δεν πρέπει να ξεπερνά τα  $10,000 \text{ m}^3/\text{day}$ . Με αυτόν τον τρόπο εξισορροπούνται οι ανθρώπινες ανάγκες από την πηγή και ταυτόχρονα διατηρείται η υγεία του υδροτόπου του Αλμυρού.

#### 4.4 Δυναμικό αξιοποίησης των ΑΠΕ στο νομό Ηρακλείου

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η υδροδότηση του Δήμου Μαλεβιζίου για τα επόμενα 20 χρόνια με ένα ολοκληρωμένο σύστημα αφαλάτωσης, το οποίο θα ηλεκτροδοτείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Σύμφωνα με την Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), στην περιοχή υπάρχουν ήδη εγκατεστημένες αρκετές μονάδες ΑΠΕ (<http://www.rae.gr/geo/>).



Σχήμα 4.10: Το δυναμικό των ΑΠΕ και οι εγκατεστημένες μονάδες στην περιοχή του Αλμυρού ποταμού (<http://www.rae.gr/geo/>)



Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται από τη γενικότερη ρυμοτομία και τις υφιστάμενες χρήσεις της γης στην περιοχή γύρω από την κοίτη του ποταμού Αλμυρού. Από την περιοχή εξαιρούνται οι υφιστάμενες γεωργικές εκτάσεις καθώς και οι ελώδεις περιοχές (Εκθεση ΤΕΕ/ΤΑΚ, 2013).

Οι πηγές Α.Π.Ε στην περιοχή ενδιαφέροντος, που δύνανται να αξιοποιηθούν είναι οι ακόλουθες:

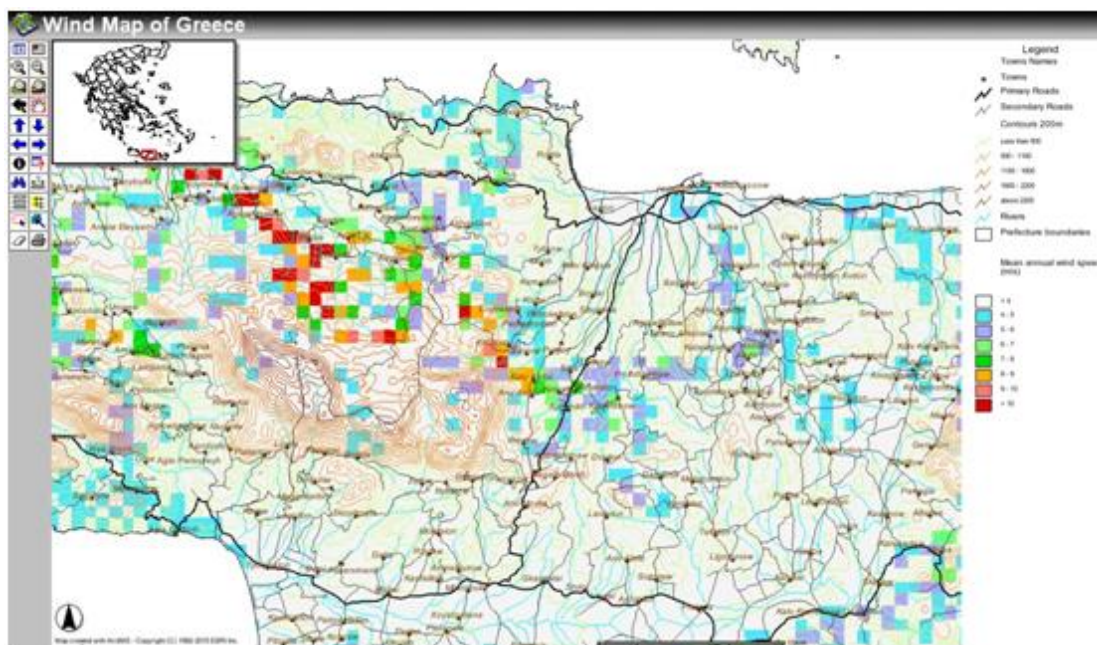
1. Η αιολική ενέργεια, μέσω της εγκατάστασης μικρών ανεμογεννητριών
2. Η ηλιακή ακτινοβολία, μέσω της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πλαισίων
3. Η υδραυλική ενέργεια, μέσω της εγκατάστασης μικρο - υδροστροβίλων.

Το μέγεθος των προτεινόμενων εγκαταστάσεων καθορίζεται από την απαιτούμενη ισχύ για τις ανάγκες της μονάδας αφαλάτωσης. Οι τεχνολογίες που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να είναι μικρού μεγέθους, λόγω της περιβαλλοντικής σημασίας της περιοχής και της γειτνιάσής της με κατοικημένες περιοχές.

#### **4.4.1 Ανεμογεννήτριες**

Η επιλογή των ανεμογεννητριών που θα απαρτίζουν το αιολικό τμήμα του υβριδικού συστήματος θα γίνει με βάση το αιολικό δυναμικό της περιοχής του Δήμου Μαλεβιζίου.

Το αιολικό δυναμικό της εξεταζόμενης περιοχής, όπως προκύπτει μέσω του παρακάτω Σχήματος 4.11, δεν είναι αξιόλογο.



Σχήμα 4.11: Το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό της περιοχής του Αλμυρού ποταμού (<http://www.rae.gr/geo/>)

Οι επικρατέστεροι τύποι αιολικών μηχανών για τα περισσότερα νησιά του Αιγαίου, είναι μηχανές ονομαστικής ισχύος στο εύρος των 250.0 – 300.0 kW και σε ειδικές περιπτώσεις μπορούν να ανέλθουν και στην ισχύ των 500.0 kW (Kaldellis K. J., Kavadias A. K., Spyropoulos G., 2005).

Οι ανεμογεννήτριες αποτελούν μια καλή επιλογή για το ενδεχόμενο της αφαλάτωσης του νερού, ιδίως στις παράκτιες περιοχές που παρουσιάζουν υψηλή διαθεσιμότητα σε αιολική ενέργεια.

Μέχρι σήμερα, έχουν αναπτυχθεί πολλοί τύποι ανεμογεννητριών. Σε αυτούς εντάσσονται και οι ανεμογεννήτριες, που κινούνται κυρίως από τις δυνάμεις που αντίστασης καθώς και αυτές που κινούνται κατά κύριο λόγο από τις δυνάμεις ανύψωσης.

Η αποδοτικότητα των ανεμογεννητριών που κινούνται κυρίως από τις δυνάμεις της αντίστασης είναι χαμηλότερη συγκριτικά με αυτές που κινούνται από τις δυνάμεις ανύψωσης.

Για αυτόνομα συστήματα, η μονάδα αφαλάτωσης πρέπει να είναι σε θέση να προσαρμοστεί στη διαθέσιμη ενέργεια, διαφορετικά απαιτείται αποθήκευση ενέργειας (πχ μέσω μπαταριών).

Στην αγορά διατίθεται πληθώρα ανεμογεννητριών μικρού μεγέθους (ισχύος έως τα 30.0 kW), οι οποίες πληρούν όλες τις σχετικές προδιαγραφές περί ασφάλειας παραγωγής και εισαγωγής ισχύος στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Το αρχικά παραγόμενο εναλλασσόμενο ρεύμα μεταβλητής συχνότητας και πλάτους ανορθώνεται σε συνεχές, για να μετατραπεί ξανά σε εναλλασσόμενο μέσω μετατροπέα (inverter), πριν διατεθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζεται η αγορά μικρών ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα τριών πτερυγίων:

α/α	Ισχύς (kW)	Ύψος πυλώνα (m)	Διάμετρος ρότορα (m)
1	1.0	5 - 6	2.8
2	2.0	8 - 10	3.3 – 4.0
3	3.0	8 - 10	4.5 - 4.8
4	5.0	10 - 15	5.8 – 6.4
5	10.0	10 - 15	8.0
6	20.0	15 - 20	10.0
7	30.0	15 - 20	12.6

Πίνακας 4.5: Ενδεικτικά μεγέθη και διαστάσεις ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα τριών πτερυγίων (Kaldellis et.al., 2005)

Το κόστος εγκατάστασης του σταθμού αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας συνίσταται στο κόστος αγοράς, μεταφοράς, εγκατάστασης των μικρών ανεμογεννητριών και του συνοδευτικού εξοπλισμού (ανορθωτές, inverters κλπ), και στο κόστος διασύνδεσης.

Μία ενδεικτική προσεγγιστική εκτίμηση για τα κόστη αυτά παρουσιάζεται στον ακόλουθο Πίνακα 4.6:

α/α	Κόστη	Τιμή μονάδας (€)	Ποσότητα	Συνολικό κόστος (€)
1	Αγοράς και μεταφοράς	50,000	35	1,750,000
2	Εγκατάστασης	1,000	35	35,000
3	Διασύνδεσης	100,000	1	100,000
4	Σύνολο: 1,885,000 €			

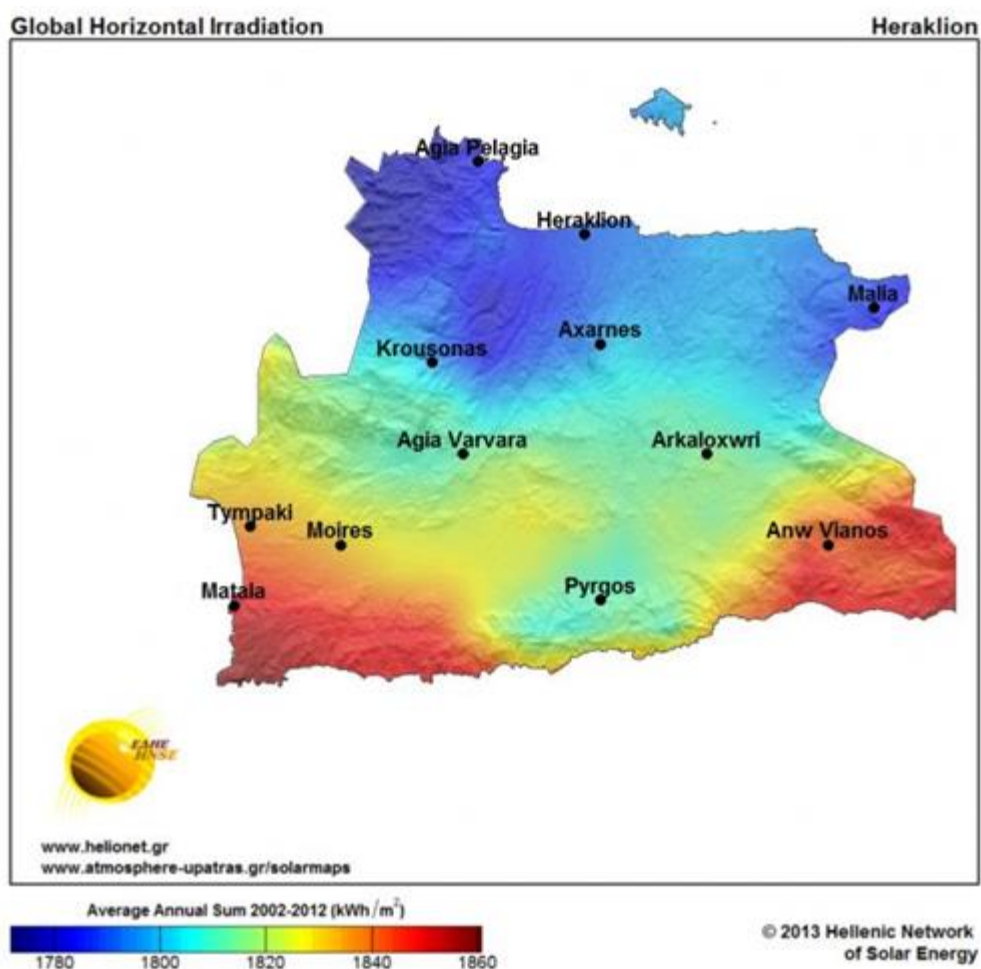
Πίνακας 4.6: Εκτίμηση κόστους μικρού αιολικού πάρκου (Kaldellis et.al., 2005)

#### **4.4.2 Φωτοβολταϊκά πάνελ**

Η επιλογή των φωτοβολταϊκών στοιχείων που θα περιστοιχίσουν το υβριδικό σύστημα αφαλάτωσης, θα πραγματοποιηθεί σύμφωνα με το υπάρχων ηλιακό δυναμικό της



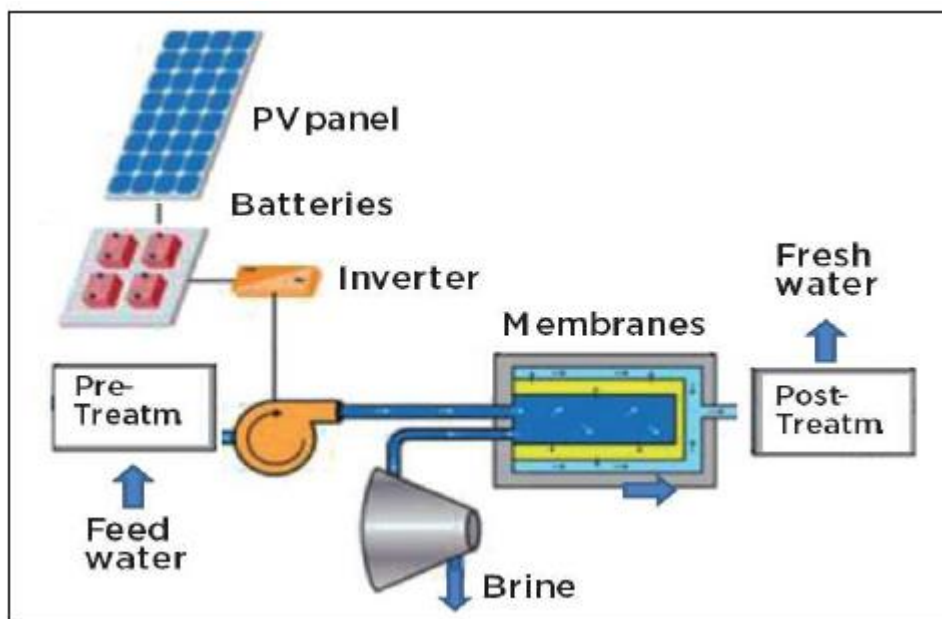
περιοχής του Δήμου Μαλεβιζίου. Η ολική διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια στον νομό Ηρακλείου παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.12: Ολική ηλιακή ενέργεια του Νομού Ηρακλείου (<http://www.atmosphere-upatras.gr/solarmaps/Heraklion/Global-Horizontal-Irradiation>)

Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας καθορίζει την ωφέλιμη ισχύ που παράγει ένα Φ/Β στοιχείο. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να συνδεθούν απευθείας σε συστήματα αντίστροφης όσμωσης (RO) και ηλεκτροδιάλυσης (ED), τα οποία βασίζονται στην ηλεκτρική ενέργεια ως ενέργεια εισόδου.

Το κύριο θέμα της αφαλάτωσης που βασίζεται στα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι το υψηλό κόστος των φωτοβολταϊκών κυττάρων καθώς και των μπαταριών που ευθύνονται για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται σχηματικά ο συνδυασμός φωτοβολταϊκών στοιχείων και αντίστροφης όσμωσης.



Σχήμα 4.13: Συνδυασμός φωτοβολταϊκών στοιχείων και αντίστροφης όσμωσης (Al-Karaghoul and Kazmerski, 2011)

Ο υπολογισμός της ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον εγκαθιστάμενο φωτοβολταϊκό σταθμό εξαρτάται από τα στοιχεία της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας στην εξεταζόμενη περιοχή.

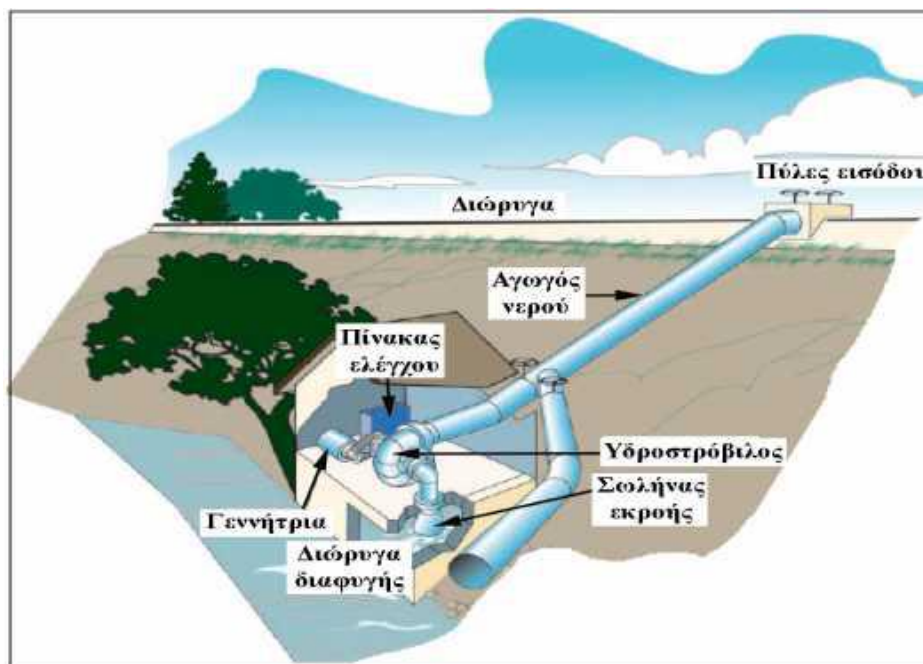
Το κόστος εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού σταθμού συνίσταται στο κόστος αγοράς, μεταφοράς και εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών πλαισίων και του συνοδευτικού εξοπλισμού (inverters, καλωδιώσεις κλπ), καθώς και στο κόστος διασύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο μέσης τάσης στην περιοχή εγκατάστασης της μονάδας ΑΠΕ. Μία ενδεικτική προσεγγιστική εκτίμηση για τα κόστη αυτά παρουσιάζεται στον ακόλουθο Πίνακα 4.8 (Έκθεση TEE/TAK, 2013):

α/α	Κόστη	Τιμή μονάδας (€)	Ποσότητα	Συνολικό κόστος (€)
1	Αγοράς, μεταφοράς και εγκατάστασης	2,000	7,880 kW	15,600,000
2	Διασύνδεσης	1,000	1	500,000
3	Σύνολο:			16,100,000 €

Πίνακας 4.8: Εκτίμηση κόστους φωτοβολταϊκού σταθμού (Έκθεση TEE/TAK, 2013)

#### 4.5 Υδροηλεκτρικός σταθμός

Ένας υδροηλεκτρικός σταθμός χαρακτηρίζεται ως «micro» όταν είναι της τάξης των 100.0 kW ή ακόμα και μικρότερης ισχύος. Ωστόσο, τα όρια των παραγόμενων kW κάτω από τα οποία μια υδροηλεκτρική εγκατάσταση χαρακτηρίζεται ως micro μπορεί να διαφέρουν από χώρα σε χώρα. Οι micro ή mini υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις δεν επηρεάζουν αρνητικά τον περιβάλλοντα χώρο, σε αντίθεση με τις μεγάλες υδροηλεκτρικές μονάδες. Η διάρκεια ζωής τους είναι μεγάλη (25 χρόνια και άνω) και ο χρόνος απόσβεσης τους σχετικά μικρός (10 έτη ή και μικρότερος). Επίσης, η λειτουργία τους είναι σταθερή και συνεχής για μεγάλες χρονικές περιόδους του έτους ενώ το κόστος τους δεν είναι ιδιαίτερα υψηλό. Για αυτό το λόγο αποτελούν μία ενδεδειγμένη επιλογή σε περιπτώσεις που απαιτείται παραγωγή ισχύος μικρής κλίμακας για την τροφοδοσία συγκεκριμένης κατανάλωσης.



Σχήμα 4.14: Γραφική αναπαράσταση ενός micro υδροηλεκτρικού σταθμού

Μια ονομαστική ισχύς της τάξης του μπορεί να καλυφθεί είτε από μία υδροστροβιλική μονάδα, είτε από δύο υδροστροβίλους των 500.0 kW έκαστος. Η δεύτερη περίπτωση είναι ακριβότερη αλλά από τεχνικής απόψεως είναι πιο σωστή διότι έτσι υπάρχει η δυνατότητα εναλλακτικής λειτουργίας των μονάδων για λόγους τακτικής συντήρησης και σε περιπτώσεις βλαβών.

Το κόστος εγκατάστασης του ΥΗΣ συνίσταται στο κόστος αγοράς, μεταφοράς και εγκατάστασης του βασικού εξοπλισμού (υδροστροβίλοι και μετασχηματιστές) και του συνοδευτικού εξοπλισμού, καθώς και στο κόστος των υποστηρικτικών έργων (αγωγοί, οικίσκος κλπ). Σημαντικό πλεονέκτημα για την περίπτωση του Αλμυρού ποταμού είναι η ύπαρξη του φράγματος που μειώνει σημαντικά το αρχικό κόστος του σταθμού. Η εκτίμηση του αρχικού κόστους του προτεινόμενου υδροηλεκτρικού έργου αναλύεται στον Πίνακα 4.9 (Έκθεση ΤΕΕ/ΤΑΚ, 2013):

α/α	Κόστη	Τιμή μονάδας (€)	Ποσότητα	Συνολικό κόστος (€)
1	Αγοράς, μεταφοράς και εγκατάστασης	200,000	2	400,000
2	Συνοδών έργων	400,000	1	400,000
3	Σύνολο: 800,000 €			

Πίνακας 4.9: Εκτίμηση κόστους ΥΗΣ μιας μονάδας ισχύος 1 MW (Έκθεση ΤΕΕ/ΤΑΚ, 2013)

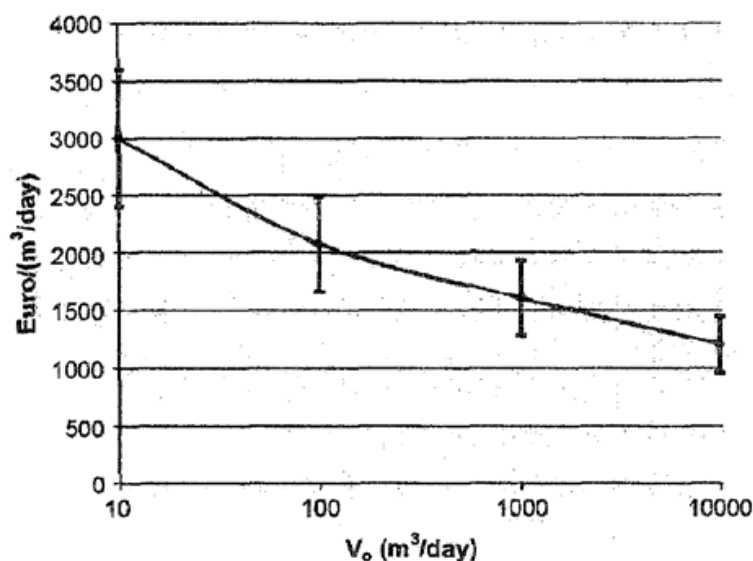
#### 4.7 Κόστος συνολικής εγκατάστασης ΑΠΕ – Μονάδας αντίστροφης όσμωσης

Όπως έχει ήδη ειπωθεί στην Ενότητα 4.3, η παροχή απόληψης νερού από τον Αλμυρό ποταμό απαγορεύεται να υπερβαίνει τα 10,000 m<sup>3</sup>/day. Για το λόγο αυτό, θεωρούμε ότι η προτεινόμενη μονάδα αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση θα έχει δυναμικότητα της τάξης των 2,000 m<sup>3</sup>/day, ακριβώς όπως και εκείνη της SYCHEM AE.

Σχετικές μελέτες αποδεικνύουν ότι η ειδική ενεργειακή κατανάλωση των μονάδων αντίστροφης όσμωσης στα νησιά του Αιγαίου κυμαίνεται μεταξύ των 3.0 και των 9.4 kWh/m<sup>3</sup> (Karagiannis & Soldatos, 2008).

Το κόστος της επένδυσης αποτελείται από δυο σκέλη: 1. το αρχικό κόστος, στο οποίο περιλαμβάνεται η αγορά και η εγκατάσταση όλου του εξοπλισμού της μονάδας αντίστροφης όσμωσης (μεμβράνες, αντλίες, κ.λπ.), όπως και της δεξαμενής αποθήκευσης του αφαλατωμένου νερού και 2. Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας της μονάδας.

Οι (Kaldellis et al., 2004) σε μελέτη τους για τα ελληνικά δεδομένα, έδειξαν πως το αρχικό κόστος του βασικού εξοπλισμού της αφαλάτωσης μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση της ημερήσιας παροχής πόσιμου νερού. Η διαπίστωση τους αυτή παρουσιάζεται σχηματικά στο ακόλουθο Σχήμα 4.15.



Σχήμα 4.15: Αρχικό κόστος της μονάδας αφαλάτωσης συναρτήσει της δυναμικότητας της (Kaldellis et al., 2004)

Για την προτεινόμενη μονάδα αφαλάτωσης, η οποία έχει δυναμικότητα της τάξης των 2,000 m<sup>3</sup>/day, το αρχικό κόστος του βασικού εξοπλισμού είναι 1,500,000 € (όπως προκύπτει από το παραπάνω Σχήμα 4.15).

Θεωρούμε ότι το μεταβλητό κόστος συντήρησης και λειτουργίας είναι μηδενικό. Το αρχικό κεφάλαιο σε μια επένδυση αφαλάτωσης αποτελεί το 30.0 % του συνολικού κόστους. Οι απαιτήσεις σε ενέργεια καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας της εγκατάστασης αποτελούν το 40.0 % του συνολικού κόστους ενώ το 20.0 % αποτελεί το υπόλοιπο κόστος συντήρησης και λειτουργίας της μονάδας (Karagiannis & Soldatos, 2008).

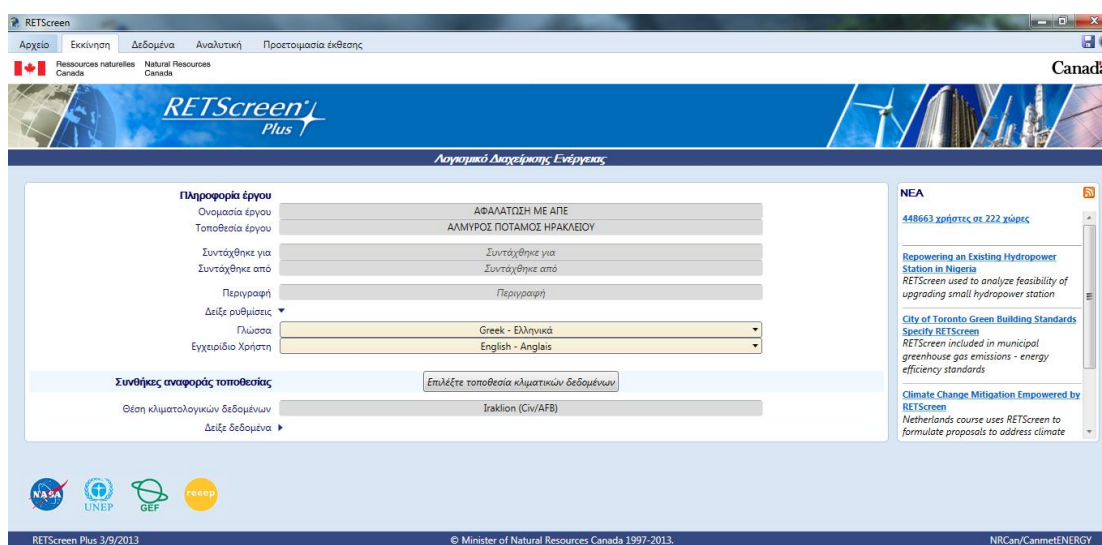
Εφόσον το αρχικό κόστος του βασικού εξοπλισμού είναι 1,500,000 € και αποτελεί το 30.0 % του συνολικού κόστους, τότε το συνολικό κόστος της εγκατάστασης είναι 5,000,000 €.

#### 4.8 Ανάλυση ευαισθησίας της μονάδας

Η οικονομική βιωσιμότητα της πραγματοποιούμενης επένδυσης μπορεί να γίνει μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας των βασικών οικονομικών παραμέτρων της. Θεωρούμε ένα εύρος ευαισθησίας της τάξης του 50.0 % για το αρχικό κόστος και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης και ένα εύρος ευαισθησίας της τάξης του 100.0 % για παραμέτρους όπως, το κόστος καυσίμου, το τοκοχρεολύσιο, το επιτόκιο δανεισμού και η περίοδος δανεισμού.

Το συνολικό αρχικό κόστος αντιπροσωπεύει τη συνολική επένδυση που πρέπει να γίνει για να πάρει ένα σχέδιο την τελική του μορφή, προτού αρχίσει να επιφέρει έσοδα. Το συνολικό αρχικό κόστος περιλαμβάνει την μελέτη σκοπιμότητας, τη ανάπτυξη του προγράμματος, τα μηχανολογικά έργα, τον ενεργειακό εξοπλισμό κ.τ.λ.

Η πραγματοποιηθείσα ανάλυση έγινε με το λογισμικό ελεύθερης πρόσβασης RETScreen που βοηθάει στην εκπόνηση τεχνικοοικονομικών αναλύσεων ενεργειακών επενδύσεων και το οποίο έχει δημιουργηθεί και διατίθεται από το Υπουργείο Φυσικών Πόρων του Καναδά (Natural Resources Canada).



Σχήμα 4.16: Η αρχική οθόνη του προγράμματος RETScreen

Τα δύο συνηθέστερα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την οικονομική αξιολόγηση μιας επένδυσης είναι:

1. Το κριτήριο της Καθαρής Παρούσας Αξίας (Net Present Value – NPV) και
2. Το κριτήριο της Εσωτερικής Απόδοσης επί του Κεφαλαίου (Internal Rate of Return –IRR).

Το προαναφερθέν πρόγραμμα υπολογίζει την καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης (ΚΠΑ), που είναι η αξία όλων των μελλοντικών ταμειακών ροών, προεξοφλημένων με το προεξοφλητικό επιτόκιο. Έτσι, η Κ.Π.Α. υπολογίζεται σε έναν χρόνο 0 που αντιστοιχεί στη σύνδεση του τέλους του έτους 0 και της αρχής του έτους 1. Σύμφωνα με την μέθοδο της Κ.Π.Α., η παρούσα αξία όλων των ταμειακών εισροών συγκρίνεται με την παρούσα αξία όλων των ταμειακών εκροών που συνδέονται με ένα πρόγραμμα επένδυσης. Όταν το επιτόκιο προεξόφλησης για μια συγκεκριμένη χρηματοροή αυξάνει, τότε η ΚΠΑ αξία της χρηματοροής μειώνεται.

Πέραν όμως από την καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης, το λογισμικό υπολογίζει επίσης τον Εσωτερικό Συντελεστή Απόδοσης (EBA - IRR) ή αλλιώς το ποσοστό της απόδοσης που είναι προσαρμοσμένο στο χρόνο. Ο εσωτερικός συντελεστής απόδοσης (IRR) υπολογίζεται σε ονομαστική βάση, δηλαδή περιλαμβάνει τον πληθωρισμό. Εάν το



εσωτερικό ποσοστό επιστροφής του έργου είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το απαιτούμενο ποσοστό απόδοσης, τότε το σχέδιο θα μπορούσε να θεωρηθεί οικονομικά αποδεκτό. Ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης κεφαλαίου μπορεί να οριστεί ως το επιτόκιο προεξόφλησης, που μηδενίζει τη χρηματορροή, δηλαδή εκείνο το επιτόκιο που εξισώνει την αρχική επένδυση με την αξία όλων των μελλοντικών ταμειακών ροών.

Η επένδυση υπολογίστηκε με τους εξής οικονομικούς όρους οικονομικούς όρους:

1. Συνολικά αρχικά κόστη 5,000,000 €,
2. Ποσό δανειοδότησης ίσο με το 20.0 % του αρχικού κεφαλαίου, δηλαδή 1,000,000 €,
3. Πληθωρισμός 3.0 %,
4. Κυλιόμενος φόρος κόστους καυσίμου 4.0 % και
5. Περίοδος αποσβέσεως επένδυσης 20 έτη

Οικονομική Ανάλυση			
<b>Οικονομικοί Παράμετροι</b>			
Τιμή πληθωρισμού	%	3,0%	
Διάρκεια ζωής έργου	έτος	20	
Τοκοχρεολύσιο	%		
<b>Αρχικά κόστη</b>			
Μέτρα ενεργειακής απόδοσης	€	0	0,0%
Άλλο	€	5.000.000	100,0%
<b>Συνολικά αρχικά κόστη</b>	€	5.000.000	100,0%
<b>Κίνητρα και επιχορηγήσεις</b>			
	€	1.000.000	20,0%
<b>Ετήσια κόστη και πληρωμές χρέους</b>			
Κόστος Λειτουργίας & Συντήρησης (εξοικονόμηση)	€	0	
Κόστος καυσίμου - προτεινόμενη περίπτωση	€	0	
Άλλο	€		
<b>Συνολικά ετήσια κόστη</b>	€	0	
<b>Ετήσιες αποταμιεύσεις και έσοδα</b>			
Κόστος καυσίμου - βασική περίπτωση	€	0	
Άλλο	€	600.000	
<b>Συνολικές ετήσιες αποταμιεύσεις και εισόδημα</b>	€	600.000	
<b>Οικονομική Βιωσιμότητα</b>			
(IRR) προ φόρου - περιουσιακά στοιχεία	%	17,3%	
Απλή αποπληρωμή	έτος	6,7	
Αποπληρωμή Μετοχών	έτος	6,0	

Σχήμα 4.17: Απόσπασμα οθόνης του προγράμματος RETScreen

Η εξέλιξη των χρηματορροών για τα επόμενα 20 χρόνια λειτουργίας του υβριδικού συστήματος αφαλάτωσης εμφανίζουν την μορφή του Σχήματος 4.18.



Σχήμα 4.18: Εικοσαετής εξέλιξη των χρηματοροών της επένδυσης

Δύο ακόμη κριτήρια αξιολόγησης για ένα επενδυτικό σχέδιο είναι ο λόγος Οφέλους – Κόστους και ο Συνολικός Βαθμός Απόδοσης.

Το κριτήριο του λόγου Οφέλους – Κόστους (Benefit – Cost Ratio) ή αλλιώς Λόγος Παρούσας Αξίας - ΛΠΑ (Present Value Ratio) αναλύεται ως εξής: Η καθαρή αναλογία οφέλους/κόστους αναπαριστά την αναλογία των καθαρών οφελών προς τις δαπάνες της επένδυσης. Τα καθαρά οφέλη αντιπροσωπεύουν την παρούσα αξία των ετήσιων εισοδημάτων, ενώ το κόστος ορίζεται όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Το συγκεκριμένο κριτήριο αξιοποιεί με απλά λόγια την παρούσα αξία των καθαρών ταμιακών ροών κατά τη διάρκεια ζωής του σχεδίου, προς το σύνολο της αρχικής επένδυσης. Το κριτήριο αποδοχής ή απόρριψης αποτελεί η σχέση του λόγου αυτού με τη μονάδα. Διακρίνουμε τις εξής τρεις περιπτώσεις:

1. Όταν  $\text{ΛΠΑ} > 1$  η επένδυση θεωρείται συμφέρουσα
2. Όταν  $\text{ΛΠΑ} = 1$  η επένδυση θεωρείται οριακή, μπορεί όμως να υλοποιηθεί όταν δεν υπάρχει καλύτερη εναλλακτική λύση
3. Όταν  $\text{ΛΠΑ} < 1$  η επένδυση δεν είναι συμφέρουσα.

Ο Συνολικός Βαθμός Απόδοσης - ΣΒΑ (Overall Rate of Return), συνδέεται με το Λόγο Παρούσας Αξίας (ΛΠΑ) μέσω της σχέσης:

$$\text{ΣΒΑ} = \text{ΛΠΑ} - 1,$$

ενώ το σχέδιο θεωρείται αποδεκτό όταν ο ΣΒΑ είναι μεγαλύτερος του 0.

Το κριτήριο του χρόνου ανάκτησης κεφαλαίου (Payback period) είναι ένα «ατελές κριτήριο». Ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να καλυφθεί η δαπάνη της αρχικής επένδυσης από τις ετήσιες ταμειακές ροές μετά φόρων.

Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει είναι τα εξής:

1. Δεν λαμβάνει υπόψη του τη διαχρονική αξία του χρήματος και
2. Δεν λαμβάνει υπόψη του τις ταμειακές ροές, που πραγματοποιούνται μετά την περίοδο επανέσπραξης του κεφαλαίου της επένδυσης.

Παρόλα αυτά το συγκεκριμένο κριτήριο εφαρμόζεται ευρέως διότι εκφράζει το χρονικό διάστημα, κατά το οποίο το επενδυμένο κεφάλαιο βρίσκεται «υπό κίνδυνο». Όσο μικρότερη είναι η περίοδος ανάκτησης του κεφαλαίου τόσο ασφαλέστερη θεωρείται η επένδυση. Γενικά, σχέδια με περίοδο ανάκτησης κεφαλαίου μεγαλύτερη από 7 - 8 χρόνια θεωρούνται από τους επενδυτές ριψοκίνδυνα ή χαμηλής απόδοσης.

Η ανάλυση ευαισθησίας έδειξε ότι η ενεργειακή επένδυση παρουσιάζει:

1. Θετική ΚΠΑ.
2. Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης 17.3 % ,
3. Αναλογία Οφέλους - Κόστους 1.5
4. Η αποπληρωμή της επένδυσης μπορεί να γίνει στο 6ο έτος του οικονομικού της κύκλου ζωής (φαίνεται και στην Σχήμα 4.18).

Από τα παραπάνω γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως η επένδυση μπορεί να θεωρηθεί βιώσιμη.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η δημιουργία μιας μονάδας αφαλάτωσης η οποία θα τροφοδοτείται εξ' ολοκλήρου από ήπιες μορφές ενέργειας είναι οικονομικά συμφέρουσα και αποτελεί ταυτόχρονα μια ιδανική περιβαλλοντικά επένδυση, αφού εγγυάται μηδενικούς αέριους και στερεούς ρύπους.

Μια μονάδα αφαλάτωσης δυναμικότητας της τάξης των 2,000 m<sup>3</sup>/ημέρα στην περιοχή του Αλμυρού ποταμού του Ηρακλείου Κρήτης μπορεί να εξυπηρετήσει τις ανάγκες των κατοίκων και των τουριστών της περιοχής. Η διαθεσιμότητα του δυναμικού των Α.Π.Ε. και η έκταση εγκατάστασης των αντίστοιχων τεχνολογιών στην περιοχή του ποταμού Αλμυρού είναι τέτοια, που καμία τεχνολογία από μόνη της δεν επαρκεί για να καλύψει από τις ετήσιες ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια της μονάδας αφαλάτωσης. Η χρήση των υβριδικών συστημάτων αιολικής - ηλιακής ενέργειας είναι η καταλληλότερη λύση, αφού συνήθως όταν δεν υπάρχει ήλιος, ο άνεμος είναι ισχυρότερος και αντίστροφα. Επίσης η περιοχή του Αλμυρού πλεονεκτεί διότι υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης ενός μικρού ΥΗΣ. Ο φωτοβολταϊκός σταθμός παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις άλλες τεχνολογίες αλλά ταυτόχρονα είναι και η πλέον ακριβή τεχνολογία από τις τρεις ΑΠΕ που συμμετέχουν στην παραγωγή ενέργειας της μονάδας. Θα πρέπει να επιδιωχτεί λοιπόν ο κατά το δυνατόν μεγαλύτερος περιορισμός της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, δίνοντας προτεραιότητα κατά κύριο λόγο στην παραγωγή από τον ΥΗΣ, η οποία και παρουσιάζει το χαμηλότερο ειδικό κόστος.

Τα λογισμικά όπως το RET Screen αποτελούν ένα πολύ καλό εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων σε έργα ενεργειακής φύσεως και μπορούν να προσεγγίσουν τα πραγματικά δεδομένα της οικονομικής τεχνολογικής πραγματικότητας με μια πολύ καλή ακρίβεια. Όμως, οι περιορισμένες δυνατότητες του λογισμικού και η μεγάλη δυσκολία συγκέντρωσης πληροφοριών πρόσφατων δεδομένων δημιουργούν αστοχίες στην αξιολόγηση της επένδυσης. Για την εφαρμογή της πρότασης στην πράξη απαιτείται κατά συνέπεια περαιτέρω έρευνα.

### Διεθνής βιβλιογραφία

1. Abbasi, S., & Abbasi, N. (2000). The likely adverse environmental impacts of renewable energy sources. *Applied Energy*, 65(1-4), 121–144.
2. Abbasi, T., & Abbasi, S. a. (2010). Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 919–937.
3. Agha, K. R. (2009). The thermal characteristics and economic analysis of a solar pond coupled low temperature multi stage desalination plant. *Solar Energy*, 83(4), 501–510.
4. Akella, a. K., Saini, R. P., & Sharma, M. P. (2009). Social, economical and environmental impacts of renewable energy systems. *Renewable Energy*, 34(2), 390–396.
5. Al-Hallaj, S., Parekh, S., Farid, M. M., & Selmán, J. R. (2006). Solar desalination with humidification–dehumidification cycle: Review of economics. *Desalination*, 195(1-3), 169–186.
6. Al-Karaghoulí A.A. and Kazmerski L.L. (2011). Renewable Energy Opportunities in Water Desalination, *Desalination, Trends and Technologies*, Michael Schorr (Ed.), InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/desalination-trends-and-technologies/renewable-energy-opportunitiesin>
7. Al-Karaghoulí, 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.
8. Al-Mutaz, I. (1996). A comparative study of RO and MSF desalination plants. *Desalination*, 106(1-3), 99–106.
9. Al-Sahali, M., & Ettouney, H. (2007). Developments in thermal desalination processes: Design, energy, and costing aspects. *Desalination*, 214(1-3), 227–240.
10. Ali, M. T., Fath, H. E. S., & Armstrong, P. R. (2011). A comprehensive techno-economical review of indirect solar desalination. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 4187–4199.
11. Andrianne, J., & Alardin, F. (2002). Thermal and membrane processes economics : optimized selection for seawater desalination, 153.
12. Avlonitis, S. a., Kouroumbas, K., & Vlachakis, N. (2003). Energy consumption and membrane replacement cost for seawater RO desalination plants. *Desalination*, 157(1-3), 151–158.
13. Banasiak, L. J., Kruttschnitt, T. W., & Schäfer, A. I. (2007). Desalination using electrodialysis as a function of voltage and salt concentration. *Desalination*, 205(1-3), 38–46.
14. Blanco, M. I. (2009). The economics of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1372–1382.
15. Borsani, R., & Rebagliati, S. (2005). Fundamentals and costing of MSF desalination plants and comparison with other technologies. *Desalination*, 182(1-3), 29–37.
16. Charcosset, C. (2009). A review of membrane processes and renewable energies for desalination. *Desalination*, 245(1-3), 214–231.
17. Compain, P. (2012). Solar Energy for Water Desalination. *Procedia Engineering*, 46(0), 220–227.
18. Cucchiella, F., & D'Adamo, I. (2012). Estimation of the energetic and environmental impacts of a roof-mounted building-integrated photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5245–5259.
19. Culligan, S. A. (2013). Technical report on the results of the lab measurements made during the operation of the system Action 4 Activity 4 (a) Operation and



- optimization of the pilot scale innovative energy – autonomous brine treatment system Operation of the innovative energy, (October).
20. Demirbas, A. (2005). Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(2), 171–192.
  21. Demirbas, M. F., Balat, M., & Balat, H. (2009). Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. *Energy Conversion and Management*, 50(7), 1746–1760.
  22. Dore, M. H. I. (2005). Forecasting the economic costs of desalination technology. *Desalination*, 172(3), 207–214.
  23. E-Nashar, A. M. (2001). The economic feasibility of small solar MED seawater desalination plants for remote arid areas, 134(November 2000), 173–186.
  24. Einav, R., Hamssib, K., & Periyb, D. (2002). The footprint of the desalination processes on the environment, 152, 141–154.
  25. El-Ghonemy, a. M. K. (2012). RETRACTED: Future sustainable water desalination technologies for the Saudi Arabia: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(9), 6566–6597.
  26. Eltawil, M. a., Zhengming, Z., & Yuan, L. (2009). A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2245–2262.
  27. Evans, A., Strezov, V., & Evans, T. J. (2009). Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), 1082–1088.
  28. Forstmeier, M., Mannerheim, F., D'Amato, F., Shah, M., Liu, Y., Baldea, M., & Stella, A. (2007). Feasibility study on wind-powered desalination. *Desalination*, 203(1-3), 463–470.
  29. Franchini, G., & Perdichizzi, A. (2014). Modeling of a Solar Driven HD (Humidification-Dehumidification) Desalination System. *Energy Procedia*, 45, 588–597.
  30. Fuentes-Bargues, J. L. (2014). Analysis of the process of environmental impact assessment for seawater desalination plants in Spain. *Desalination*, 347, 166–174.
  31. Garcia-rodriguez, L. (2002). Seawater desalination driven by renewable energies : a review, 143.
  32. García-Rodríguez, L. (2003). Renewable energy applications in desalination: state of the art. *Solar Energy*, 75(5), 381–393.
  33. Garcia-rodriguez, L., Palmero-marreroa, A. I., & Gbmez-camachob, C. (2002). Comparison of solar thermal technologies for applications in seawater desalination, 142, 135–142.
  34. Ghaffour, N., Lattemann, S., Missimer, T., Ng, K. C., Sinha, S., & Amy, G. (2014). Renewable energy-driven innovative energy-efficient desalination technologies. *Applied Energy*, 1–11.
  35. Gikas, P., & Angelakis, A. N. (2009). Water resources management in Crete and in the Aegean Islands, with emphasis on the utilization of non-conventional water sources. *Desalination*, 248(1-3), 1049–1064.
  36. Goosen, M., Mahmoudi, H., & Ghaffour, N. (2010). Water Desalination Using Geothermal Energy. *Energies*, 3(8), 1423–1442.
  37. Gude, V. G., Nirmalakhandan, N., & Deng, S. (2010). Renewable and sustainable approaches for desalination. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2641–2654.
  38. Gude, V. G. (2014). Energy storage for desalination processes powered by renewable energy and waste heat sources. *Applied Energy*.
  39. Han, B., Liu, Z., Wu, H., & Li, Y. (2014). Experimental study on a new method for improving the performance of thermal vapor compressors for multi-effect distillation desalination systems. *Desalination*, 344, 391–395.
  40. Handbook, A., Handbook, T. A., Adira, T., Union, E., Eastern, M., African, N., & Meda, T. (n.d.).

41. Hassabou, A. H., Spinnler, M., & Polifke, W. (2013). Tecnoeconomic Analysis of Medium and Large-scale Desalination Plants Driven by Concentrated Solar Systems in the Mena Region. *Energy Procedia*, 42, 735–744.
42. Hawaj O. Al. Mand., Darwish M.A. (1994). Performance characteristics of a multi effect solar pond desalting system in an arid environment. *Desalination*. 96, 3-10.
43. Iaquaniello, G., Salladini, a., Mari, a., Mabrouk, a. a., & Fath, H. E. S. (2014). Concentrating solar power (CSP) system integrated with MED–RO hybrid desalination. *Desalination*, 336, 121–128.
44. Jamaly, S., Darwish, N. N., Ahmed, I., & Hasan, S. W. (2014). A short review on reverse osmosis pretreatment technologies. *Desalination*, 354, 30–38.
45. Kaldellis, J. K., Kavadias, K. a., & Kondili, E. (2004). Renewable energy desalination plants for the Greek islands—technical and economic considerations. *Desalination*, 170(2), 187–203.
46. Kaldellis K. J., 2004. Optimum Technoeconomic Energy Autonomous Photovoltaic Solution for Remote Consumers Throughout Greece. *Energy Conversion and Management*; 45 (2004): 2745-2760.
47. Kaldellis K. J., El-Samani K., Koronakis P., Feasibility Analysis of Domestic Solar Water Heating Systems in Greece. *Renewable Energy*, 30 (2005): 659-682.
48. Kaldellis, J. K., & Kondili, E. M. (2007). The water shortage problem in the Aegean archipelago islands: cost-effective desalination prospects. *Desalination*, 216(1-3), 123 –138.
49. Kaldellis K.J., K.A. Kavadias A.K., Cost-benefit Analysis of Remote Hybrid Wind-Diesel Power Stations: Case study Aegean Sea islands. *Energy Policy*, 35 (2007): 1525-1538.
50. Kaldellis K. J., An Integrated Model for Performance Simulation of Hybrid Wind–Diesel Systems. *Renewable Energy*, 32 (2007): 1544-1564.
51. Kaldellis K.J., Zafirakis D., Present Situation and Future Prospects of Electricity Generation in Aegean Archipelago Islands. *Energy Policy*, 35 (2007): 4623-4639.
52. Kaldellis K.J., Zafirakis D., Kondili E., Optimum Sizing of Photovoltaic energy Storage Systems for Autonomous Small Islands. *Electrical Power and Energy Systems*, 32 (2010): 24-36.
53. Kalogirou, S. (2005). Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(3), 242–281.
54. Karagiannis, I. C., & Soldatos, P. G. (2007). Current status of water desalination in the Aegean Islands. *Desalination*, 203(1-3), 56–61.
55. Karagiannis, I. C., & Soldatos, P. G. (2008). Water desalination cost literature: review and assessment. *Desalination*, 223(1-3), 448–456.
56. Karameldin, A., Lot, A., & Melchemar, S. (2002). The Red Sea area wind-driven mechanical vapor compression desalination system, 153, 47–53.
57. Kelley, L. C., & Dubowsky, S. (2013). Thermal control to maximize photovoltaic powered reverse osmosis desalination systems productivity. *Desalination*, 314, 10–19.
58. Khawaji, A. D., Kutubkhanah, I. K., & Wie, J.-M. (2008). Advances in seawater desalination technologies. *Desalination*, 221(1-3), 47–69.
59. Kondili, E., & Kaldellis, J. K. (n.d.). Wind Energy Based Desalination Processes and Plants 2 RES based Desalination Processes, 1–7.
60. Koua, B. K., Koffi, P. M. E., Gbaha, P., & Touré, S. (2015). Present status and overview of potential of renewable energy in Cote d'Ivoire. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 907–914.
61. Lattemann, S., & Höpner, T. (2008). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination*, 220(1-3), 1–15.
62. Li, C., Goswami, Y., & Stefanakos, E. (2013). Solar assisted sea water desalination: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 136–163.

63. Low, T. H. E., Geothermal, E., For, P., Generation, E., & Desalination, S. (2004). THE CURRENT GEOTHERMAL EXPLORATION AND DEVELOPMENT OF THE GEOTHERMAL FIELD OF, (June).
64. Luthra, S., Kumar, S., Garg, D., & Haleem, A. (2015). Barriers to renewable/sustainable energy technologies adoption: Indian perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 762–776.
65. Mahmoudi, H., Spahis, N., Goosen, M. F., Ghaffour, N., Drouiche, N., & Ouagued, A. (2010). Application of geothermal energy for heating and fresh water production in a brackish water greenhouse desalination unit: A case study from Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 512–517.
66. Ma, Q., & Lu, H. (2011). Wind energy technologies integrated with desalination systems: Review and state-of-the-art. *Desalination*, 277(1-3), 274–280.
67. Manologlou, E., Tsartas, P., & Markou, a. (2004). Geothermal energy sources for water production—socio-economic effects and people's wishes on Milos island: a case study. *Energy Policy*, 32(5), 623–633.
68. Marcos S. Miranda, David Infield. (2002), A wind – powered seawater reverse – osmosis system without batteries. *Desalination*, 153(1-3), 9-16
69. Mathioulakis, E., Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2007). Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art. *Desalination*, 203(1-3), 346–365.
70. Mezher, T., Fath, H., Abbas, Z., & Khaled, A. (2011). Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies. *Desalination*, 266(1-3), 263–273.
71. Mohammadi, T., & Kaviani, A. (2003). Water shortage and seawater desalination by electrodialysis. *Desalination*, 158(1-3), 267–270.
72. Mohamed, a. M. I., & El-Minshawy, N. a. S. (2009). Humidification–dehumidification desalination system driven by geothermal energy. *Desalination*, 249(2), 602–608.
73. Moumouh, J., Tahiri, M., & Salouhi, M. (2014). Solar thermal energy combined with humidification–dehumidification process for desalination brackish water: Technical review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(27), 15232–15237.
74. Nafey, a. S., Fath, H. E. S., El-Helaby, S. O., & Soliman, a. (2004). Solar desalination using humidification–dehumidification processes. Part II. An experimental investigation. *Energy Conversion and Management*, 45(7-8), 1263–1277.
75. Narayan, G. P., Sharqawy, M. H., Summers, E. K., Lienhard, J. H., Zubair, S. M., & Antar, M. a. (2010). The potential of solar-driven humidification–dehumidification desalination for small-scale decentralized water production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(4), 1187–1201.
76. Nugent, D., & Sovacool, B. K. (2014). Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey. *Energy Policy*, 65, 229–244.
77. Palenzuela, P., Zaragoza, G., Alarcón, D., & Blanco, J. (2011). Simulation and evaluation of the coupling of desalination units to parabolic-trough solar power plants in the Mediterranean region. *Desalination*, 281, 379–387.
78. Palenzuela, P., Zaragoza, G., Alarcón-Padilla, D. C., & Blanco, J. (2013). Evaluation of cooling technologies of concentrated solar power plants and their combination with desalination in the mediterranean area. *Applied Thermal Engineering*, 50(2), 1514–1521.
79. Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1513–1524.
80. Park, G. L., Schäfer, a. I., & Richards, B. S. (2009). Potential of wind-powered renewable energy membrane systems for Ghana. *Desalination*, 248(1-3), 169–176.
81. Park, G. L., Schäfer, A. I., & Richards, B. S. (2011). Renewable energy powered membrane technology: The effect of wind speed fluctuations on the performance

- of a wind-powered membrane system for brackish water desalination. *Journal of Membrane Science*, 370(1-2), 34–44.
82. Pelc, R., & Fujita, R. M. (2002). Renewable energy from the ocean, 26(July), 471–479.
  83. Peñate, B., & García-Rodríguez, L. (2012). Current trends and future prospects in the design of seawater reverse osmosis desalination technology. *Desalination*, 284, 1–8.
  84. Posnansky M. (2001). Technical and economical aspects of solar desalination with particular emphasis on solar pond distillation plants, *Desalination*, 67, 81–95.
  85. Prakash, R., & Bhat, I. K. (2009). Energy, economics and environmental impacts of renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2716–2721.
  86. Qiblawey, H. M., & Banat, F. (2008). Solar thermal desalination technologies. *Desalination*, 220(1-3), 633–644.
  87. Qiblawey, H., Banat, F., & Al-Nasser, Q. (2011). Performance of reverse osmosis pilot plant powered by Photovoltaic in Jordan. *Renewable Energy*, 36(12), 3452–3460.
  88. Reddy K.V., Ghaffour N., Overview of the cost of desalinated water and costing methodologies, *Desalination*, 205 (2007), 340–353.
  89. Sadhwani, J. J., Veza, J. M., & Santana, C. (2005). Case studies on environmental impact of seawater desalination. *Desalination*, 185(1-3), 1–8.
  90. Safi M.J.(1998). Performance of a flash desalination unit intended to be coupled to a solar pond,14(1-4) 339-343.
  91. Salim, M. G. (2012). Selection of groundwater sites in Egypt, using geographic information systems, for desalination by solar energy in order to reduce greenhouse gases. *Journal of Advanced Research*, 3(1), 11–19.
  92. Wind Energy Integration with Desalination Industry – Analysis of Wind Power Potential in Chennai , Nagapattinam and Puducherry of South India. (2014), 187–190.
  93. Schallenberg-Rodríguez, J., Veza, J. M., & Blanco-Marigorta, A. (2014). Energy efficiency and desalination in the Canary Islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 741–748.
  94. Sharon, H., & Reddy, K. S. (2015). A review of solar energy driven desalination technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1080–1118.
  95. Shatat, M., Worall, M., & Riffat, S. (2013). Opportunities for solar water desalination worldwide: Review. *Sustainable Cities and Society*, 9, 67–80.
  96. Singh, J. (2015). Overview of electric power potential of surplus agricultural biomass from economic, social, environmental and technical perspective—A case study of Punjab. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 286–297.
  97. Subramani, A., Badruzzaman, M., Oppenheimer, J., & Jacangelo, J. G. (2011). Energy minimization strategies and renewable energy utilization for desalination: a review. *Water Research*, 45(5), 1907–20.
  98. Susanto, H. (2011). Towards practical implementations of membrane distillation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 50(2), 139–150.
  99. Szacsvay, T., Hofer-Noser, P., & Posnansky, M. (1999). Technical and economic aspects of small-scale solar-pond-powered seawater desalination systems. *Desalination*, 122(2-3), 185–193.
  100. Technical report on the overall evaluation of the prototype brine treatment system Action 5 Overall evaluation of the pilot system's environmental and economic performance / LCA Analysis - Suggestions for full- scale implementation of the solar driven br. (n.d.), (December 2013).
  101. Tomaszewska, B., & Bodzek, M. (2013). The removal of radionuclides during desalination of geothermal waters containing boron using the BWRO system. *Desalination*, 309, 284–290.
  102. Viebahn, P., Lechon, Y., & Trieb, F. (2011). The potential role of concentrated solar power (CSP) in Africa and Europe—A dynamic assessment of

- technology development, cost development and life cycle inventories until 2050. *Energy Policy*, 39(8), 4420–4430.
103. Voivontas, D., Yannopoulos, K., Rados, K., Zervos, a., & Assimacopoulos, D. (1999). Market potential of renewable energy powered desalination systems in Greece. *Desalination*, 121(2), 159–172.
104. Welch, J. B., & Venkateswaran, A. (2009). The dual sustainability of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), 1121–1126.
105. Wessley, G. J. J., & Mathews, P. K. (2012). Investigations on Solar Desalination Based on Vacuum Evaporation for Small Scale Applications. *Procedia Engineering*, 38, 2413–2419.
106. Xevgenos D., Moustakas K., Malamis D., Loizidou M. (2014). An overview on desalination and sustainability: renewable – energy driven desalination and brine management. *Desalination and water treatment*.
107. Yildirim, C., & Solmuş, İ. (2014). A parametric study on a humidification–dehumidification (HDH) desalination unit powered by solar air and water heaters. *Energy Conversion and Management*, 86, 568–575.
108. Yuan, G., Wang, Z., Li, H., & Li, X. (2011). Experimental study of a solar desalination system based on humidification–dehumidification process. *Desalination*, 277(1-3), 92–98.
109. Zamen, M., Amidpour, M., & Soufari, S. M. (2009). Cost optimization of a solar humidification–dehumidification desalination unit using mathematical programming. *Desalination*, 239(1-3), 92–99.

### **Ελληνική βιβλιογραφία**

1. Γεωθερμία, Μ. Φυτίκα & Ν. Ανδρίτσου (2004), Εκδόσεις Τζιόλα
2. Εισαγωγή στην τεχνολογία νερού και αφαλάτωσης, Σταμάτης Α. Αυλωνίτης (2006), Εκδόσεις Ίων
3. Έκθεση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Τμήμα Ανατολικής Κρήτης, Αποτύπωση του δυναμικού του Αλμυρού ποταμού για την παραγωγή πόσιμου νερού (2013)
4. Φώτης Πασιούρας, Χρηματοοικονομική ανάλυση επενδύσεων, Εκδόσεις Προπομπός (2015)