



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

## **ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΟΣΜΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

**ΚΑΛΛΙΤΣΗ ΝΙΚΟΛΑΟΥ**

**Επιβλέπουσα** : Κορωνάκη Ειρήνη

*Αθήνα, Ιούλιος 2012*



## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας με τίτλο *Αντίστροφη Όσμωση Με Χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας* είναι η περιγραφή της μεθόδου αφαλάτωσης που ονομάζεται αντίστροφη όσμωση και με ποιο τρόπο μπορεί αυτή να συνδυαστεί με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ).

Αρχικά θα γίνει αναφορά στις τεχνικές αφαλάτωσης που έχουν ανακαλυφθεί για την παραγωγή πόσιμου νερού, ώστε να εξαλειφθεί το πρόβλημα λειψυδρίας που επικρατεί στον πλανήτη μας. Πιο εκτενής αναφορά θα γίνει στην τεχνική της αντίστροφης όσμωσης. Στη συνέχεια θα παρατεθούν δυο παραδείγματα υποτιθέμενων συστημάτων αντίστροφης όσμωσης, τα οποία έχουν κάποια δεδομένα χαρακτηριστικά και μέσω υπολογισμών θα βρεθούν διάφορα άλλα χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν. Επίσης, θα παρουσιαστούν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες είναι διαθέσιμες και με ποιον τρόπο αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κινητήρια δύναμη για τη λειτουργία των διαφόρων συστημάτων αφαλάτωσης. Επιπλέον, θα παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών και των ανεμογεννητριών και θα περιγραφεί ένα σύστημα αφαλάτωσης στο Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) στο Λαύριο, το οποίο εκμεταλλεύεται τις δυο αυτές πηγές ενέργειας για τη λειτουργία μιας μονάδας αντίστροφης όσμωσης. Τέλος, θα βγουν συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα και τις προοπτικές του συνδυασμού των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με τεχνικές αφαλάτωσης.



# **ABSTRACT**

The purpose of this thesis entitled *Reverse Osmosis Using Renewable Sources of Energy* is the description of the desalination process called Reverse Osmosis (RO) and how it can be combined with renewable sources of energy.

Firstly there will be a reference to techniques of desalination that have been discovered for the production of potable water in order to eliminate the water shortage problem that exist on our planet. Then, two examples of reverse osmosis systems with some hypothetical characteristics will be solved through calculations and other characteristics will be found. Also, we will analyze the available renewable sources of energy (RES) and the way they can be used as a driving force for the operation of various desalination systems. Furthermore, the features of photovoltaics and wind turbines will be presented and a desalination system with a reverse osmosis unit run by these two energy sources at the Centre for Renewable Energy Sources (CRES) in Laurion, Greece will be described. Finally, there are conclusions on the effectiveness and the prospects of desalination systems driven by RES.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα Καθηγήτρια μου Κορωνάκη Ειρήνη για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το ενδιαφέρον αυτό θέμα, για την υπομονή και τη διάθεση που επέδειξε όλο το διάστημα που με καθοδηγούσε και με επέβλεπε.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου, καθώς και όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους για τη συμπαράστασή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο τμήμα των Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>11</b>
1.1	Γενικά.....	11
1.2	Αφαλάτωση.....	15
1.3	Διεργασίες Αφαλάτωσης.....	16
1.3.1	Πολυβάθμια εξάτμιση (MED).....	18
1.3.2	Πολυβάθμια εκτόνωση (MSF).....	20
1.3.3	Εξάτμιση με επανασυμπύεση ατμών (VC).....	25
1.3.4	Ηλιακή απόσταξη (MSF).....	28
1.3.5	Ηλεκτροδιάλυση (ED).....	30
1.3.6	Αντίστροφη όσμωση (RO).....	33
1.4	Παράμετροι επιλογής μεθόδου αφαλάτωσης.....	37
<b>2</b>	<b>Αντίστροφη όσμωση.....</b>	<b>40</b>
2.1	Εισαγωγή.....	40
2.2	Στοιχεία διαχωρισμού μεμβράνης.....	40
2.3	Παράμετροι απόδοσης.....	44
2.3.1	Οσμωτική πίεση και πίεση λειτουργίας.....	44
2.3.2	Απόρριψη αλατιού.....	45
2.3.3	Ποσοστό ανάκτησης.....	46
2.4	Μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης.....	47
2.4.1	Μεμβράνες οξικής κυτταρίνης (CA membranes).....	47
2.4.2	Μεμβράνες σύνθετου πολυαμιδίου (PA membranes).....	48
2.5	Τύποι διαμόρφωσης μεμβρανών.....	49
2.5.1	Ινώδεις μεμβράνες.....	49
2.5.2	Μεμβράνες σπειροειδούς περιέλιξης.....	51
2.6	Συστήματα αντίστροφης όσμωσης.....	53
2.7	Μοντέλο αντίστροφης όσμωσης και μεταβλητές του συστήματος.....	56
2.7.1	Μάζα που διαπερνά και διακυμάνσεις αλατιού.....	57
2.7.2	Ροή νερού.....	58
2.7.3	Ροή αλατιού.....	59
2.7.4	Ημιεμπειρικά μοντέλα.....	60
2.7.5	Συγκέντρωση πόλωσης.....	63



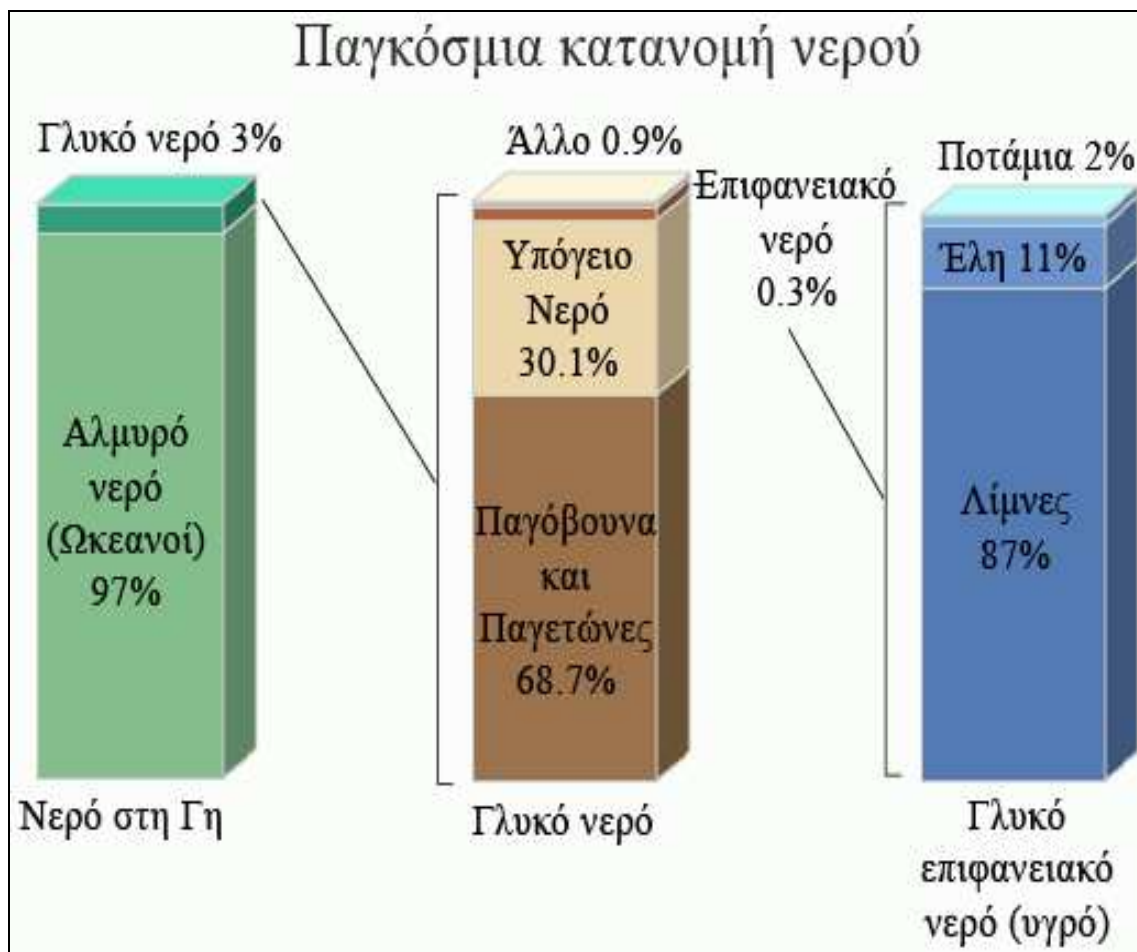
2.8	Παραδείγματα επίλυσης συστημάτων αντίστροφης όσμωσης.....	65
2.8.1	Παράδειγμα 1.....	65
2.8.2	Παράδειγμα 2.....	68
<b>3</b>	<b>Οικονομική ανάλυση διεργασιών αφαλάτωσης.....</b>	<b>72</b>
3.1	Εισαγωγή.....	72
3.2	Παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος προϊόντος.....	72
3.3	Στοιχεία οικονομικών υπολογισμών.....	73
3.4	Άμεσο κόστος κεφαλαίου.....	74
3.5	Έμμεσο κόστος κεφαλαίου.....	76
3.6	Λειτουργικό κόστος.....	77
3.7	Εκτίμηση κόστους.....	80
3.8	Ετήσια στοιχεία κόστους για δεδομένο σύστημα.....	85
3.9	Συμπεράσματα.....	87
<b>4</b>	<b>Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ).....</b>	<b>89</b>
4.1	Εισαγωγή.....	89
4.2	Φωτοβολταϊκά (Φ/Β).....	90
4.2.1	Φωτοβολταϊκά στοιχεία.....	90
4.2.2	Λειτουργία των ηλιακών κυψελών.....	92
4.2.3	Φ/Β πλαίσια και Φ/Β συστοιχίες.....	97
4.3	Ανεμογεννήτριες.....	98
4.3.1	Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών.....	98
4.3.2	Τύποι ανεμογεννητριών.....	101
4.3.2.1	Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα.....	101
4.3.2.2	Ταξινόμηση ανεμογεννητριών με βάση την εγκατεστημένη ισχύ.....	103
<b>5</b>	<b>Αφαλάτωση με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....</b>	<b>106</b>
5.1	Εισαγωγή.....	106
5.2	Συνδυασμοί αφαλάτωσης με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	106
5.3	Κριτήρια επιλογής της διαδικασίας αφαλάτωσης.....	111

<b>6</b>	<b>Περιγραφή αυτόνομου υβριδικού συστήματος αντίστροφης όσμωσης.....</b>	<b>113</b>
6.1	Εισαγωγή.....	113
6.2	Τεχνική περιγραφή του μονάδας του ΚΑΠΕ.....	114
6.3	Οικονομικά δεδομένα.....	126
6.4	Διαπιστώσεις.....	127
6.5	Επισκόπηση του συστήματος και σύγκριση.....	127
<b>7</b>	<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>130</b>
<b>8</b>	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>131</b>

# 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το νερό αναμφισβήτητα αποτελεί πηγή ζωής για τον πλανήτη και κινητήρια δύναμη του ανθρώπινου πολιτισμού. Από τα παγκόσμια αποθέματα νερού, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.1, υπολογίζεται ότι το 97% περίπου αποτελεί το νερό των ωκεανών, το οποίο κυρίως λόγω του άλατος που περιέχει είναι σε πρώτη φάση ακατάλληλο προς χρήση από τους ανθρώπους. Το υπόλοιπο 3% είναι φρέσκο νερό, δυνητικά κατάλληλο για χρήση από τους ανθρώπους. Το μεγαλύτερο ποσοστό του φρέσκου νερού (68,7% περίπου) βρίσκεται με τη μορφή παγετώνων στους πόλους και στις κορυφές των οροσειρών. Ένα ποσοστό της τάξεως του 30,1% αποτελούν τα υπόγεια ύδατα, ενώ μόλις το 0,9% των παγκοσμίων αποθεμάτων φρέσκου νερού βρίσκεται σε λίμνες, ποτάμια, έλη κλπ.



Εικόνα 1.1: Παγκόσμια κατανομή νερού [3]

Μια γρήγορη ματιά ανά τον κόσμο και κυρίως η ανάγνωση των στοιχείων που αφορούν τις μετρήσεις των αποθεμάτων φρέσκου νερού παγκοσμίως, αποδεικνύουν ότι αυτά μειώνονται δραματικά. Και ο κίνδυνος δεν είναι μακροπρόθεσμος, αλλά βρίσκεται πλέον στο κατώφλι μας. Ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα παρουσιάζονται παρακάτω:

- Τα πιο πολλά νησιά της Ελλάδος, αντιμετωπίζουν αυξημένα προβλήματα σε ότι αφορά την υδροδότηση, λόγω αυξημένης ζήτησης εξαιτίας του τουρισμού, κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου
- Στο Μεξικό Σίτυ, ο τοπικός πληθυσμός των 20 εκατομμυρίων κατοίκων αντιμετωπίζει οξύτατο πρόβλημα έλλειψης πόσιμου νερού, αφού αυτό καταναλώνεται με ρυθμούς κατά πολύ μεγαλύτερους από την αποκατάσταση του υδροφόρου στρώματος.
- Στην περιοχή της Μεσοποταμίας, η οποία υδροδοτείται κυρίως από τους ποταμούς Τίγρη και Ευφράτη, η απόφαση της Τουρκίας να κατασκευάσει φράγματα λόγω της λειψυδρίας, προκάλεσε την έντονη αντίδραση της Συρίας και του Ιράκ που έχουν σαν μοναδική πηγή φρέσκου νερού τους δύο αυτούς ποταμούς.
- Στην ξηρή και άνυδρη βόρεια Κίνα περίπου 300 πόλεις αντιμετωπίζουν πρόβλημα με τα αποθέματα φρέσκου νερού. Το πρόβλημα δημιουργήθηκε λόγω της μείωσης των βροχοπτώσεων αλλά και της υπερκατανάλωσης στις αγροτικές καλλιέργειες. Τώρα οι τοπικές αρχές περιορίζουν την χρήση νερού στα χωράφια με αποτέλεσμα πολλοί αγρότες να οδηγούνται στην οικονομική καταστροφή.
- Στην Ινδία του ενός και πλέον δισεκατομμυρίου κατοίκων τα σημαντικότερα υδροφόρα στρώματα υπόκεινται σε υπερεκμετάλλευση, ενώ λόγω μόλυνσης του φρέσκου νερού με το νερό άρδευσης το χώμα πλέον εμφανίζει πολύ υψηλά ποσοστά άλατος κάτι που το καθιστά ακατάλληλο προς καλλιέργεια.

- Στο Ισραήλ, αν και χρησιμοποιούνται πολλές επαναστατικές τεχνολογίες εξοικονόμησης νερού, η υπερεκμετάλλευση των υδροφόρων στρωμάτων στην ακτογραμμή έχει σαν αποτέλεσμα να μολύνεται το πόσιμο νερό με θαλάσσιο. Αντίστοιχα προβλήματα αντιμετωπίζει και η γειτονική Ιορδανία της οποίας κύρια πηγή φρέσκου νερού είναι ο Ιορδάνης ποταμός.
- Στην Αίγυπτο της οποίας ο πληθυσμός αναμένεται να αγγίξει τα 100 εκατομμύρια μέχρι το 2025, οι βροχοπτώσεις είναι περιορισμένες. Η άρδευση στηρίζεται στις πλημμύρες του Νείλου και στο φράγμα του Ασουάν στα νότια. Οποιαδήποτε εμπλοκή στη ροή του νερού από το Σουδάν και την Αιθιοπία (όπου και βρίσκονται οι πηγές του ποταμού), θα οδηγήσουν την Αίγυπτο στη λιμοκτονία.

Θα μπορούσαν να αναφερθούν διάφορες αιτίες για την έλλειψη νερού. Οι περισσότερες αν όχι όλες οφείλονται σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Ωστόσο πιο σημαντικές θεωρούνται οι παρακάτω

- Ο τουρισμός. Σε τουριστικές περιόδους, όπως είναι φυσικό, αυξάνει απότομα η κατανάλωση νερού
- Η πληθυσμιακή αύξηση, που συνδέεται άμεσα με την αύξηση της ζήτησης νερού
- Αύξηση των εισοδημάτων σε ορισμένες χώρες, που σημαίνει αύξηση της κατανάλωσης αγαθών, άρα και μεγαλύτερη κατανάλωση νερού, για την παραγωγή αυτών των αγαθών
- Η αστυφιλία. Είναι μια δημογραφική παράμετρος που οδηγεί σε αλόγιστη χρήση νερού

Η Ελλάδα, όπως εξάλλου και ολόκληρος ο πλανήτης, βρίσκεται τα τελευταία χρόνια αντιμέτωπη με το μείζον πρόβλημα της λειψυδρίας. Η κατάσταση αυτή οφείλεται σε μια σειρά από αίτια όπως η έλλειψη σχεδιασμού, η κακή διαχείριση των υδάτινων αποθεμάτων-πόρων, η καταστροφή των δασών, η περιφρόνηση των

σχετικών νόμων και η μείωση των βροχοπτώσεων λόγω κλιματικών αλλαγών. Οι προβλέψεις είναι εφιαλτικές. Έως και το 2100 προβλέπεται αύξηση της μέσης θερμοκρασίας έως και 2 βαθμούς Κελσίου, οι βροχοπτώσεις θα μειωθούν σημαντικά ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες, ενώ θα υπάρχει και αστάθεια στην ένταση και την συχνότητα τους. Όλα αυτά συνεπάγονται μείωση της απορροής και υποβάθμιση της ποιότητας του νερού που σε συνδυασμό με την αυξημένη αστική και γεωργική κατανάλωση, θα οδηγήσει σε μείωση της γεωργικής παραγωγής, αποδυνάμωση του αγροτικού πληθυσμού και πιθανόν διαμάχες για τη χρήση νερού. Τα ποσοστά βροχοπτώσεων ανά την χώρα ελαττώνονται σε περιοχές όπως η Κρήτη, τα νησιά του Αιγαίου αλλά και τμήματα της ηπειρωτικής Ελλάδας. Άμεση συνέπεια είναι οι περιοχές αυτές να αντιμετωπίζουν τον μεγαλύτερο κίνδυνο εξάντλησης των υδάτινων αποθεμάτων τους στο εγγύς μέλλον.

Οι ειδικοί σε θέματα περιβάλλοντος και νερού, κρούουν τον κώδωνα του κινδύνου για την ανάγκη έναρξης μιας παγκόσμιας «Μπλε Επανάστασης», μέσω της οποίας θα επιτευχθεί η συντήρηση και η καλύτερη διαχείριση των αποθεμάτων φρέσκου νερού υπό το πρίσμα της αυξανόμενης ζήτησης αλλά και της περιβαλλοντικής μόλυνσης. Μπορεί για ορισμένες χώρες με ραγδαία πληθυσμιακή αύξηση, να είναι ήδη πολύ αργά για να αποφύγουν την κρίση, εντούτοις η «Μπλε Επανάσταση» είναι απαραίτητη για να κατευθύνει τις λύσεις για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας σε τοπικό, εθνικό ή ακόμα και υπερεθνικό επίπεδο. Τέτοιου είδους στρατηγικές διαχείρισης θα περιλαμβάνουν τον καθαρισμό και την επαναχρησιμοποίηση των αστικών λυμάτων, την βελτίωση της απόδοσης των τεχνολογιών άρδευσης, την οικονομία στη χρήση νερού για βιομηχανικές εφαρμογές, τον περιορισμό της αλόγιστης χρήσης νερού εντός και εκτός οικίας ή ακόμα και τη χρήση φυτών με μικρές ανάγκες σε νερό και αντοχή στην ξηρασία και υλικών που έχουν την ικανότητα να διατηρούν την υγρασία. Σε εθνικό επίπεδο η δημιουργία ενός ενιαίου φορέα διαχείρισης των υδάτινων αποθεμάτων κρίνεται απαραίτητη.

Για την ενίσχυση των αποθεμάτων φρέσκου νερού σε παγκόσμια κλίμακα, μια τεχνολογικά εφικτή και συμφέρουσα λύση είναι και η αφαλάτωση, ουσιαστικά η διαδικασία μετατροπής του νερού των ωκεανών σε πόσιμο και κατάλληλο για χρήση. Με δεδομένο ότι, όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή, το 97% του νερού στον πλανήτη είναι θαλάσσιο, η αφαλάτωση φαντάζει ως η μοναδική λύση για ουσιαστική αντιμετώπιση του προβλήματος της λειψυδρίας σε παγκόσμιο επίπεδο. Το πρόβλημα της λειψυδρίας, είχε αρχίσει να κάνει την εμφάνισή του πολύ πιο παλιά

και από τότε είχε αρχίσει να γίνεται αντιληπτό, ότι η μοναδική λύση ίσως ήταν η αφαλάτωση.

## 1.2 ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ

Ο όρος αφαλάτωση αναφέρεται σε κάθε επιμέρους διαδικασία απομάκρυνσης του πλεονάζοντος αλατιού και άλλων μετάλλων από το νερό, με σκοπό να παραχθεί φρέσκο νερό κατάλληλο για κατανάλωση από ζώα και άρδευση. Επιπλέον στην περίπτωση που απομακρυνθεί το σύνολο του αλατιού, το παραγόμενο νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για κατανάλωση από τους ανθρώπους. Το νερό το οποίο υφίσταται αφαλάτωση μπορεί να είναι θαλάσσιο, υφάλμυρο ή ακόμα και επεξεργασμένα λύματα. Σε ορισμένες περιπτώσεις η διαδικασία παράγει επιτραπέζιο αλάτι ως υποπροϊόν.

Ιστορικά η ιδέα της αφαλάτωσης ανάγεται στους αρχαίους Έλληνες ναυτικούς που την εφάρμοζαν κατά τον 4ο π.Χ. αιώνα με την εξάτμιση του θαλασσινού νερού που την περιγράφει και ο Αριστοτέλης. Επίσης περιγραφή αφαλάτωσης αναφέρεται ως πραγματεία από Άραβα συγγραφέα του 8ου μ.Χ. αιώνα που βασίζεται στην απόσταξη του νερού. Τον 18ο αιώνα, με την ανάπτυξη της ατμοπλοΐας, η αναγκαιότητα μεγάλης ποσότητας ύδατος στη χρήση των ατμομηχανών κατέστησε επιτακτική ανάγκη την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού ώστε να μη προκαλείται ταχύτατη διάβρωση των μηχανών. Το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας αφαλάτωσης νερού δόθηκε στην Αγγλία το 1869. Η σπουδαιότητα αυτής της ανακάλυψης φάνηκε από το γεγονός ότι τον ίδιο αμέσως χρόνο οι Άγγλοι εγκατέστησαν τη πρώτη μεγάλη μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού ύδατος στο Άντεν για τις ανάγκες του στόλου τους. Ο πρώτος μεγάλος εργοστασιακός σταθμός αφαλάτωσης θαλασσινού ύδατος για εμπορική και βιομηχανική χρήση εγκαταστάθηκε στην Αρούμπα (τότε Ολλανδικές Αντίλλες) το 1930.

Η αφαλάτωση θαλάσσιου νερού είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στη Μέση Ανατολή (εξαιτίας της εκτεταμένης ερημοποίησης) και στην Καραϊβική. Επιπλέον τα τελευταία χρόνια βρίσκει εφαρμογή και σε περιοχές όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Βόρεια Αφρική, η Σιγκαπούρη, η Ισπανία, η Αυστραλία και η Κίνα. Η αφαλάτωση υφάλμυρου

νερού πραγματοποιείται κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες, λόγω συμφωνιών που έχουν υπογραφεί με την κυβέρνηση του Μεξικό σχετικά με την ποιότητα του νερού των ποταμών που εισέρχονται σε αυτό. Τέλος ορισμένες χώρες της Μέσης Ανατολής, με τεράστια ενεργειακά αποθέματα, παράγουν αφαλατωμένο νερό και για άρδευση. Ενδεικτικό είναι ότι οι μονάδες αφαλάτωσης της Σαουδικής Αραβίας καλύπτουν το 24% της παγκόσμιας παραγωγής. Η μεγαλύτερη μονάδα βρίσκεται στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, χρησιμοποιεί τη μέθοδο MSF (πολυβάθμια εκτόνωση) και παράγει 300 εκατομμύρια κυβικά μέτρα αφαλατωμένου νερού ετησίως.

### 1.3 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Οι διεργασίες αφαλάτωσης γενικά διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

1. σε διεργασίες με εξάτμιση:

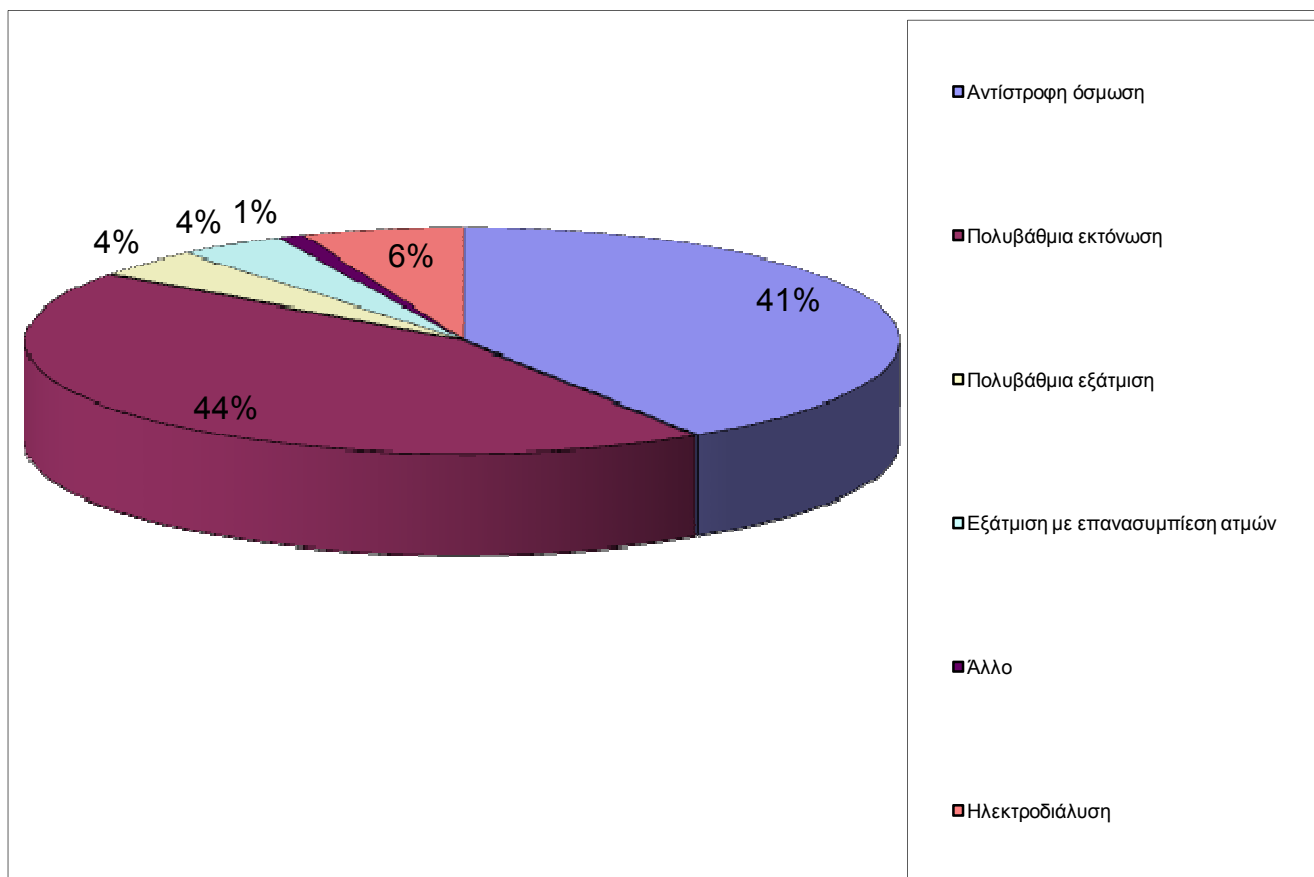
- Πολυβάθμια εξάτμιση (Multiple Effect Distillation, MED)
- Πολυβάθμια εκτόνωση (Multi-Stage Flushing, MSF)
- Εξάτμιση με επανασυμπύεση ατμών (Vapour compression, VC)
- Ηλιακή απόσταξη (Solar Distillation, S/D)

2. σε διεργασίες με μεμβράνη:

- Αντίστροφη όσμωση (Reverse osmosis, RO)
- Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis, ED)

Στην εικόνα 1.2, φαίνονται οι τεχνολογίες αφαλάτωσης που χρησιμοποιούνται σήμερα παγκοσμίως. Όπως φαίνεται, οι περισσότερες μονάδες αφαλάτωσης χρησιμοποιούν την τεχνολογία της πολυβάθμιας εκτόνωσης με ποσοστό 44%. Δεύτερη είναι η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης με 41% και έπονται η ηλεκτροδιάλυση με 6%, η πολυβάθμια εξάτμιση και αυτή της συμπίεσης ατμών με 4% , ενώ οι εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν διαφορετική τεχνολογία αφαλάτωσης από αυτές που αναφέρθηκαν, αποτελούν το 1%.





*Εικόνα 1.2: Παγκόσμια κατανομή μονάδων αφαλάτωσης ανά τεχνολογία [2]*

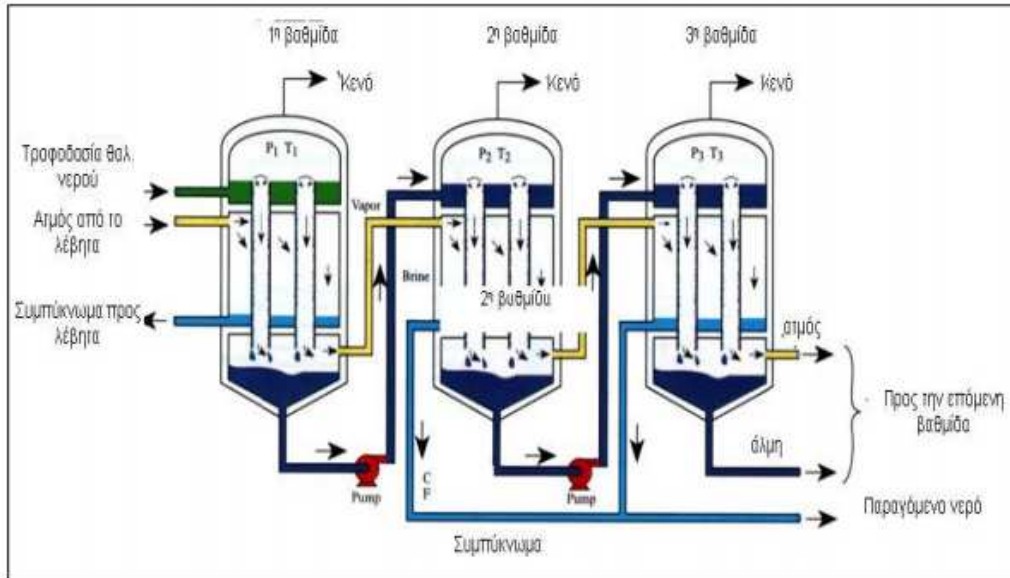
### 1.3.1 ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑ ΕΞΑΤΜΙΣΗ (MED)



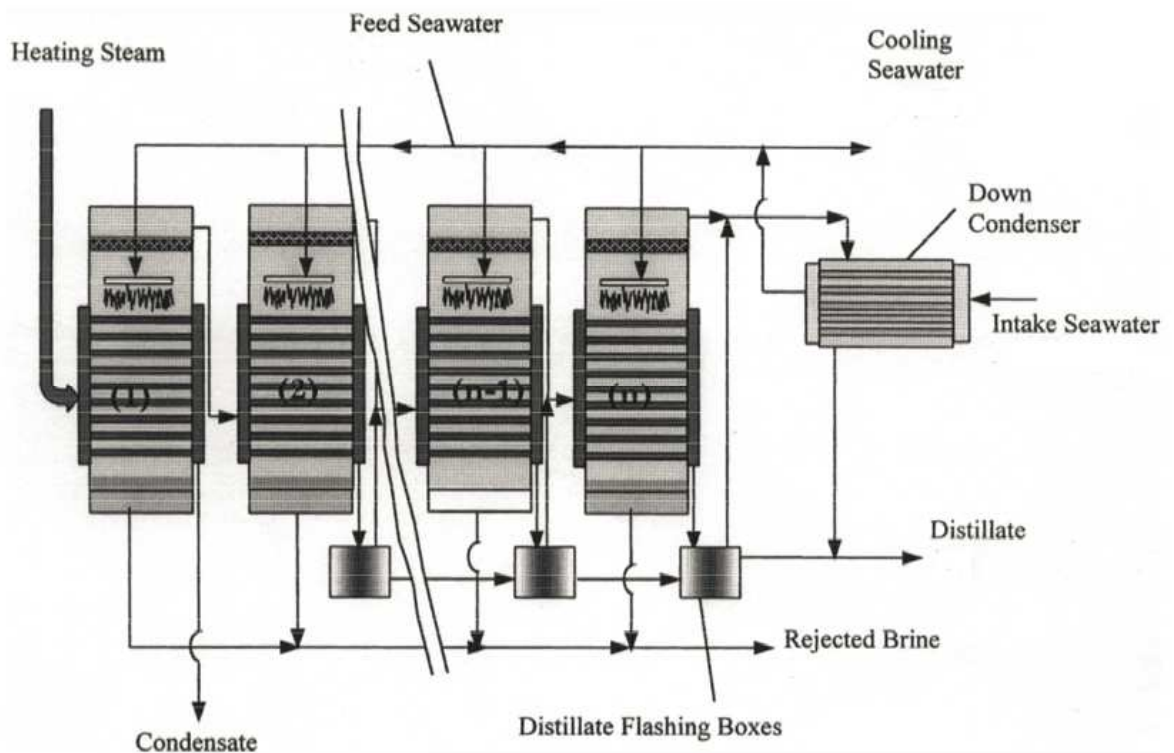
*Εικόνα 1.3: Εγκατάσταση πολυβάθμιας εξάτμισης στο Ομάν [20]*

Η πολυβάθμια εξάτμιση δεν είναι και τόσο διαδεδομένη, διότι λόγω τεχνικών προβλημάτων αντικαταστάθηκε σταδιακά τα τελευταία χρόνια από την πολυβάθμια εκτόνωση. Σήμερα παρ' όλα αυτά, λόγω του ότι παρουσιάζει καλύτερο συντελεστή θερμικής απόδοσης αρχίζει να ξανακερδίζει έδαφος. Στην πολυβάθμια εξάτμιση ο ατμός περνάει μέσα από σωλήνες, ενώ το κρύο θαλασσινό νερό ψεκάζεται πάνω τους δημιουργώντας ένα πολύ λεπτό στρώμα νερού, το οποίο εξατμίζεται άμεσα. Έτσι, μέρος του ατμού συμπυκνώνεται και συλλέγεται σαν καθαρό νερό, ενόσω συνεχίζουν στην επόμενη βαθμίδα ο υπόλοιπος ατμός μαζί με το υπόλοιπο θαλασσινό νερό που απέμεινε από την ατμοποίηση. Και στη μέθοδο αυτή σε κάθε θάλαμο υπάρχει αντλία κενού που υποβοηθά την εξάτμιση, με βαθμιαία μειούμενη πίεση σε κάθε βαθμίδα, που ισούται με την πίεση κορεσμού στην αντίστοιχη θερμοκρασία του κάθε θαλάμου. Αυτό έχει σαν όφελος να επιτρέπει την λειτουργία τόσο σε υψηλή όσο και σε χαμηλή θερμοκρασία, συχνά δε, η μέγιστη θερμοκρασία βρασμού μπορεί να είναι μέχρι και 55ο C, έτσι ώστε να αποφεύγεται η διάβρωση και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί χαμηλού επιπέδου απορριπτόμενη θερμότητα από άλλες θερμικές διεργασίες. Στη μέθοδο αυτή συχνά χρησιμοποιούνται και συμπιεστές (μηχανικοί ή θερμικοί), ενώ οι παραλλαγές της προκύπτουν απ' την οριζόντια ή

κάθετη διάταξη των σωλήνων ατμού και τη φορά του ατμού σε σχέση με την άλμη (ομορροή, αντιρροή ή παράλληλη).



Εικόνα 1.4 : Σχηματική απεικόνιση πολυβάθμιας εξάτμισης [8]



Εικόνα 1.5 : Σχηματική απεικόνιση πολυβάθμιας εξάτμισης [6]

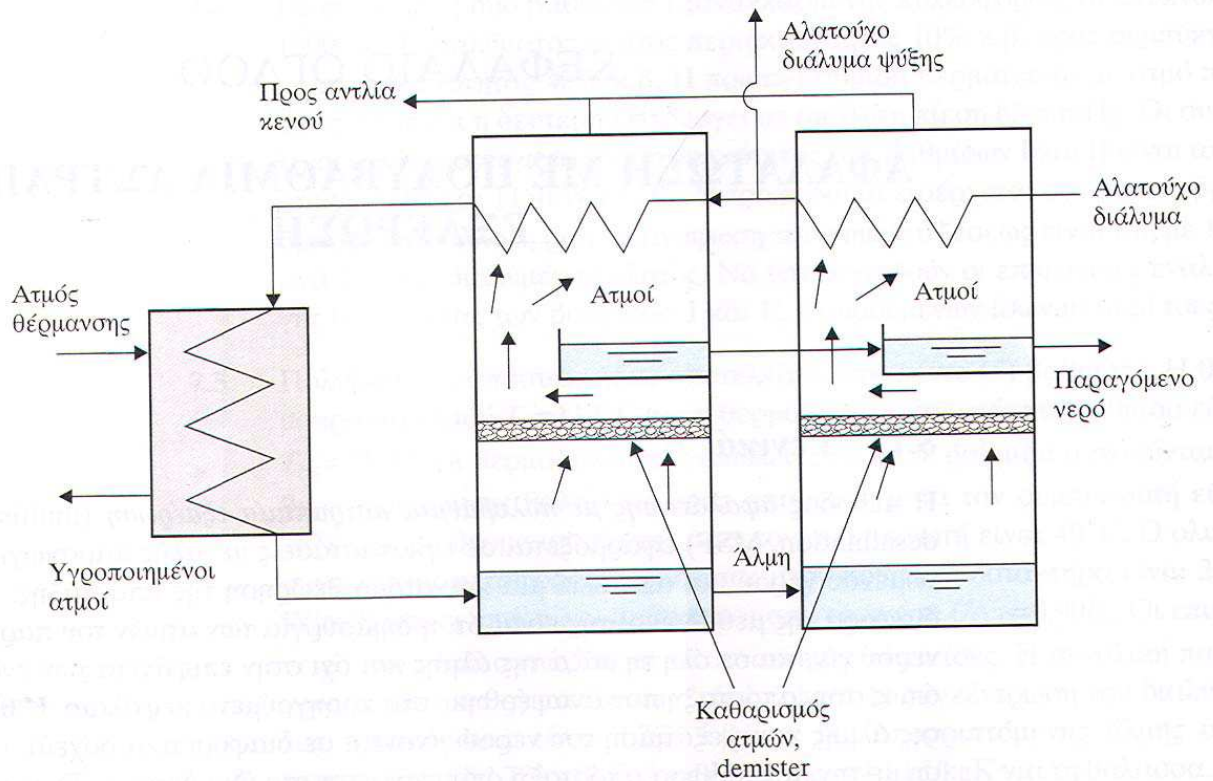
Εύρος μεγεθών	500-20.000 m <sup>3</sup> /ημ
Νερό τροφοδοσίας	Θαλασσινό (Θ)
Ποιότητα παραγόμενου νερού	10 ppm TDS
Απαιτούμενη ενέργεια	Ηλεκτρική (4-6 kWh/m <sup>3</sup> ) Θερμική (290 kJ/kg)

*Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά πολυβάθμιας εξάτμισης [7]*

### 1.3.2 ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑ ΕΚΤΟΝΩΣΗ (MSF)

Η μέθοδος αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση εφαρμόζεται σε εγκαταστάσεις μεγάλης παραγωγής αφαλατωμένου νερού και αποτελεί μία καινοτόμο θεώρηση της απόσταξης. Η βασική διαφορά της μεθόδου αυτής είναι ότι η δημιουργία των ατμών του παραγόμενου νερού γίνεται σε όλη τη μάζα της άλμης και όχι στην επιφάνεια των εναλλακτών όπως στην απόσταξη. Η θέρμανση της άλμης και η εξάτμιση του νερού γίνονται σε διαφορετικά δοχεία, σε αντίθεση με την πολυβάθμια εξάτμιση όπου γίνονται στο ίδιο δοχείο. Έτσι, στην πολυβάθμια εκτόνωση το αλμυρό νερό θερμαίνεται με έναν εναλλάκτη θερμότητας κάτω από πίεση έτσι ώστε να αποφεύγεται ο βρασμός και κατόπιν διοχετεύεται σε ένα δοχείο χαμηλής πίεσης όπου και λαμβάνει χώρα η εξάτμιση του νερού.

Η διεργασία αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση δίνεται παραστατικά στην εικόνα που ακολουθεί.

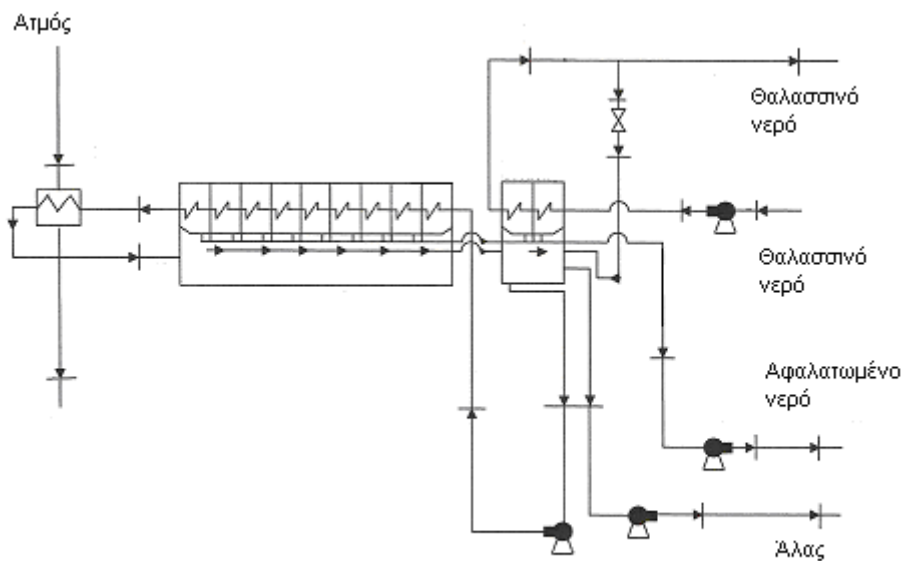


Εικόνα 1.6: Διεργασία αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση [12]

Το νερό τροφοδοσίας, θαλασσινό ή υφάλμυρο, με τη βοήθεια ενός εναλλάκτη θερμότητας που χρησιμοποιεί θερμούς ατμούς για μέσο θέρμανσης, θερμαίνεται σε κατάλληλη θερμοκρασία. Το νερό τροφοδοσίας για λόγους οικονομίας θερμότητας έχει προθερμανθεί από τους παραγόμενους ατμούς. Η πίεση παραμένει λίγο μεγαλύτερη από την τάση των ατμών για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία. Στη συνέχεια το θερμό πλέον διάλυμα τροφοδοσίας εισέρχεται σε δοχείο όπου η επικρατούσα πίεση είναι μικρότερη από εκείνη του εναλλάκτη. Έτσι το διάλυμα αρχίζει να εξατμίζεται ακαριαία από όλη τη μάζα του, μέχρις ότου η πίεση γίνει ίση με την τάση κορεσμένων ατμών του διαλύματος. Κατά τη διάρκεια του βρασμού απαιτείται σημαντικό ποσό θερμότητας, το οποίο προσφέρεται από το θερμό διάλυμα τροφοδοσίας το οποίο και ψύχεται. Αποτέλεσμα της ψύξης του διαλύματος είναι η μείωση τελικά της τάσης κορεσμένων ατμών του έτσι ώστε τελικά να έχουμε παύση του βρασμού. Οι παραγόμενοι ατμοί υγροποιούνται στον συμπυκνωτήρα, ο οποίος χρησιμοποιεί ως μέσον ψύξεως το εισερχόμενο διάλυμα τροφοδοσίας για λόγους

οικονομίας κατανάλωσης ενέργειας. Η παραγόμενη άλμη διοχετεύεται στο επόμενο στάδιο όπου και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία.

Σε μεγάλες μονάδες μία ποσότητα άλμης αναμειγνύεται με το ρεύμα της τροφοδοσίας ελαττώνοντας τις απώλειες θερμότητας και αυξάνοντας την απόδοση της διεργασίας. Σε μικρές μονάδες αντίθετα η διεργασία απλοποιείται σημαντικά με την μη ανάκτηση θερμότητας, γεγονός όμως που μειώνει την ενεργειακή απόδοση. Οι εγκαταστάσεις αυτού του τύπου είναι πολύ διαδεδομένες στη Μέση Ανατολή και ιδιαίτερα στη Σαουδική Αραβία, τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα και το Κουβέιτ. Η χρήση τους εκεί ανέρχεται σε ποσοστό 40% της παγκόσμιας χρήσης αφαλάτωσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, είναι η μονάδα αφαλάτωσης στη Shoiba, της Σαουδικής Αραβίας. Η μονάδα αυτή παράγει 450.000 κυβικά μέτρα ανά ημέρα και 150.000.000 κυβικά μέτρα το χρόνο. Το νερό το οποίο παράγεται, μπορεί να εξυπηρετήσει 1,5 εκατομμύριο άτομα, ενώ το κόστος της εγκατάστασης, ανέρχεται στα 1,06 δισεκατομμύρια δολάρια, ενώ αξίζει να σημειωθεί, ότι στην εγκατάσταση αυτή, χρησιμοποιούνται 80 αντλίες νερού. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 1997 και τελείωσε το 2003. Η αρχή λειτουργίας του είναι η εξής: το θαλασσινό νερό θερμαίνεται σε θερμοκρασία λίγο χαμηλότερη του σημείου ζέσεως και στη συνέχεια εισέρχεται στον πρώτο θάλαμο που υπάρχει πίεση χαμηλότερη απ' την πίεση κορεσμού, οπότε ατμοποιείται. Ο ατμός έρχεται σε επαφή με τους σωλήνες που μεταφέρουν το κρύο θαλασσινό νερό, υγροποιείται και συλλέγεται ως καθαρό νερό. Η άλμη προωθείται στους επόμενους θαλάμους, όπου το φαινόμενο επαναλαμβάνεται και η πίεση διαρκώς μειώνεται (για να παρακολουθήσει την αντίστοιχη μείωση της θερμοκρασίας της άλμης), μέχρι που τελικά απορρίπτεται. Η εγκατάσταση αυτή βρίσκεται δίπλα σε θερμοηλεκτρικό σταθμό παραγωγής ενέργειας για καλύτερη αξιοποίηση του καυσίμου. Έτσι ο ατμός υψηλής πίεσης εκτονώνεται στον ατμοστρόβιλο για παραγωγή ισχύος και στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την αφαλάτωση. Ένα παράδειγμα εγκατάστασης αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση, φαίνεται στην εικόνα 1.7.



*Εικόνα 1.7: Μονάδα αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση[9]*

Όπως προαναφέρθηκε, στις χώρες της Μέσης Ανατολής, η αφαλάτωση με τη μέθοδο της πολυβάθμιας εκτόνωσης, είναι πολύ διαδεδομένη. Αυτό συμβαίνει, διότι οι ανάγκες για νερό στις συγκεκριμένες περιοχές, είναι αρκετά αυξημένες και λόγω καιρικών συνθηκών. Όσον αφορά, την επιλογή της μεθόδου αυτής, επιλέγεται επειδή μια τέτοια εγκατάσταση, έχει σχετικά υψηλό βαθμό απόδοσης και μεγάλη διάρκεια ζωής.

Η καλή και αποδοτική λειτουργία της διεργασίας αφαλάτωσης με πολυβάθμια εκτόνωση περιλαμβάνει παρεμβάσεις όπως:

- Προκατεργασία του διαλύματος τροφοδοσίας έτσι ώστε να μειωθεί στο ελάχιστο η πιθανότητα δημιουργίας επικαθίσεως αλάτων ή επιστρώματος λάσπης.
- Αποφυγή συσσώρευσης αερίων στους χώρους εκτόνωσης με τη χρήση αντλιών κενού. Η συσσώρευση αερίων θα αυξήσει την πίεση και επομένως θα μειώσει το βρασμό.

- Χρησιμοποίηση πολλών βαθμίδων. Με τον τρόπο αυτό αυξάνουμε την απόδοση της εγκατάστασης, ενώ χρησιμοποιείται μικρότερη επιφάνεια στους εναλλάκτες θερμότητας.
- Χρησιμοποίηση της παραγόμενης άλμης και του παραγόμενου νερού για προθέρμανση του διαλύματος τροφοδοσίας.
- Επαναχρησιμοποίηση της άλμης σε ανάμιξη με θαλασσινό νερό. Η ενέργεια αυτή έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του κόστους προ-κατεργασίας και τη μείωση δαπάνης ενέργειας διότι το θερμικό περιεχόμενο της άλμης δεν απορρίπτεται.



*Εικόνα 1.8: Εγκατάσταση πολυβάθμιας εκτόνωσης στη Μέση Ανατολή [20]*



Εύρος μεγεθών	1.000-60.000 m <sup>3</sup> /ημ
Νερό τροφοδοσίας	Θαλασσινό (Θ)
Ποιότητα παραγόμενου νερού	10 ppm TDS
Απαιτούμενη ενέργεια	Ηλεκτρική (4-6 kWh/m <sup>3</sup> ) Θερμική (290 kJ/kg)

*Πίνακας 1.2: Χαρακτηριστικά πολυβάθμιας εκτόνωσης [7]*

### 1.3.3 ΕΞΑΤΜΙΣΗ ΜΕ ΕΠΑΝΑΣΥΜΠΙΕΣΗ ΑΤΜΩΝ (VC)

Στην εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών (VC), οι ατμοί οι οποίοι παράγονται κατά την εξάτμιση της άλμης, βρίσκονται, λόγω της ανύψωσης του σημείου βρασμού, σε κατάσταση υπερθέρμανσης και έχουν χαμηλότερη πίεση από αυτήν που αντιστοιχεί στην πίεση κορεσμού του καθαρού νερού. Συμπυκνώνονται επομένως, χάνοντας την θερμότητα υπερθέρμανσης, σε θερμοκρασία χαμηλότερη από αυτή του σημείου βρασμού του διαλύματος. Η λανθάνουσα αυτή θερμότητα συμπύκνωσης που προσφέρεται από την πλευρά της εξάτμισης στον συμπυκνωτή είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ως θερμότητα θέρμανσης, στην άλλη πλευρά του συμπυκνωτή. Δηλαδή η τροφοδοσία αρχικά προθερμαίνεται από τα ρεύματα της άλμης και του προϊόντος και στη συνέχεια ακολουθεί η κυρίως θέρμανση με την απόρριψη θερμότητας από το συμπιεστή. Μια εγκατάσταση αφαλάτωσης με επανασυμπίεση ατμών, αποτελείται από ένα σύστημα εκτίναξης ατμού, από έναν εξατμιστήρα, από τα ακροφύσια, από διαχωριστή ατμού, τις αντλίες και έναν συμπυκνωτή. Την απόδοση του συστήματος, μπορούν να επηρεάσουν ενδεχόμενες διαρροές αέρα, πιθανές απώλειες θερμότητας, καθώς επίσης και η υπερθέρμανση του ατμού. Ελάχιστα ποσά αέρα στην πλευρά της συμπύκνωσης μειώνουν τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Εξ άλλου, εξ αιτίας της μείωσης της θερμοκρασίας



Εικόνα 1.9: Εγκατάσταση εξάτμισης με επανασυμπύεση ατμών [14]

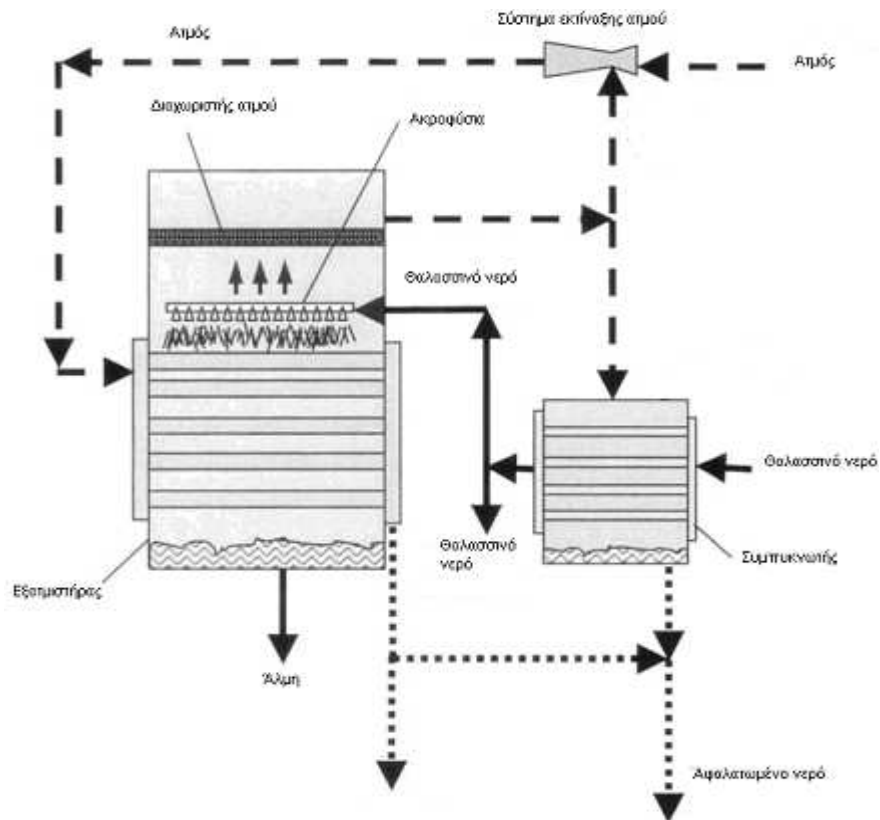
συμπύκνωσης, η απαιτούμενη θερμοκρασία στην πλευρά της συμπύκνωσης πρέπει να μειωθεί δραματικά. Αυτό οδηγεί σε μια μείωση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας και κατά συνέπεια σε μια μείωση του ρυθμού εξάτμισης. Μικρά ποσά μη συμπυκνώσιμων αερίων είναι αναπόφευκτο να υπάρχουν στο σύστημα. Ωστόσο η αντλία κενού απομακρύνει τα αέρια πριν από το ξεκίνημα της συσκευής και λειτουργεί περιοδικά ή συνεχώς σε περίπτωση συγκέντρωσης μη συμπυκνώσιμων αερίων.

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής, είναι ότι μπορεί να ασφατώσει, νερό με μεγάλη περιεκτικότητα σε άλας, ενώ σαν μειονέκτημα, μπορεί να αναφερθεί ο σχετικά χαμηλός βαθμός απόδοσης. Ένα παράδειγμα μονάδας ασφατώσεως με τη μέθοδο της εξάτμισης με συμπύεση ατμών, φαίνεται στην εικόνα 1.10.

Η συμπύεση ατμών σε ένα σύστημα εξάτμισης με επανασυμπύεση ατμών μπορεί να γίνει με δυο τρόπους:

1. Με μηχανική συμπύεση ατμών (MVC)
2. Με θερμική συμπύεση ατμών (TVC)

Ο πρώτος τρόπος συμπύεσης ατμών είναι πιο ευρέως διαδεδομένος και περιλαμβάνει μια μηχανική διάταξη, η οποία λειτουργεί με ηλεκτρισμό, για τη συμπύεση των ατμών. Στη δεύτερη περίπτωση η διάταξη λειτουργεί με θερμική ενέργεια.



*Εικόνα 1.10: Μονάδα αφαλάτωσης με επανασυμπύεση ατμών[13]*

Εύρος μεγεθών	25-2.500 m <sup>3</sup> /ημ
Νερό τροφοδοσίας	Θαλασσινό (Θ)
Ποιότητα παραγόμενου νερού	10 ppm TDS
Απαιτούμενη ενέργεια	Ηλεκτρική (8-15 kWh/m <sup>3</sup> )

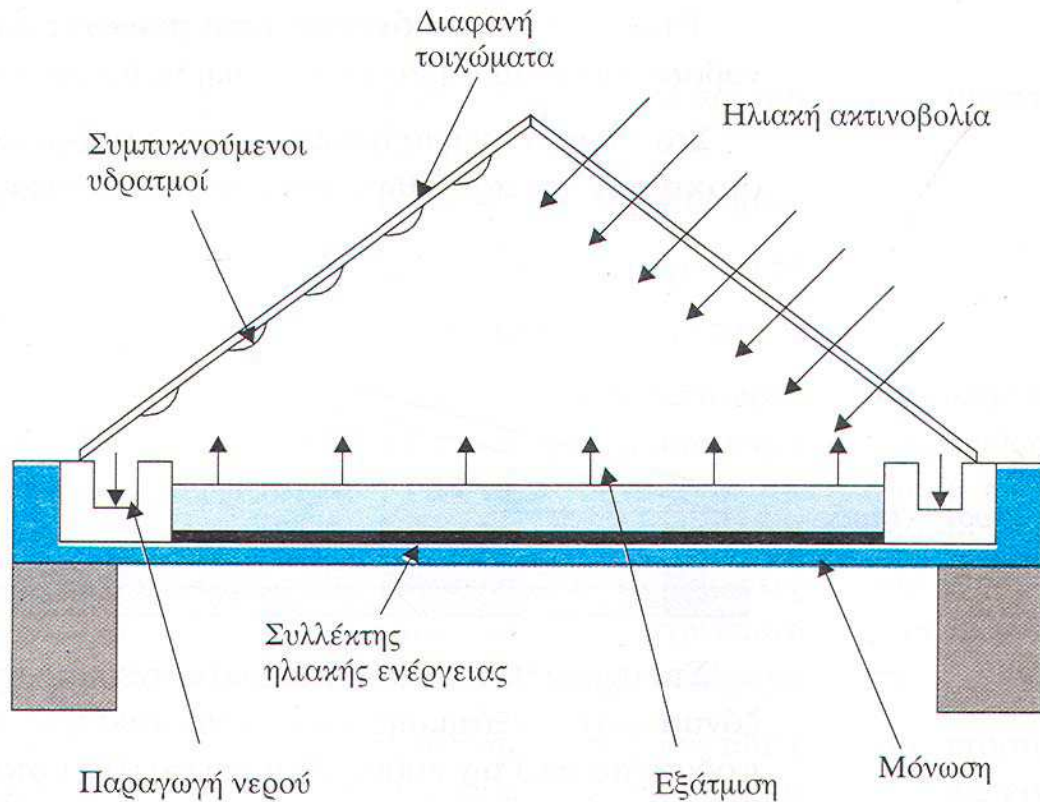
*Πίνακας 1.3: Χαρακτηριστικά εξάτμισης με επανασυμπύεση ατμών [7]*

#### 1.3.4 ΗΛΙΑΚΗ ΑΠΟΣΤΑΞΗ (S/D)

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μία ανεξάντλητη και χωρίς κόστος μορφή ενέργειας. Αφού για την αφαλάτωση απαιτούνται σημαντικά ποσά ενέργειας είναι λογικό να χρησιμοποιήσει κανείς την ηλιακή ενέργεια ως πηγή ενέργειας για την παραγωγή αφαλατωμένου νερού. Η χρησιμοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να γίνει άμεσα στους ηλιακούς αποστακτήρες, όπου το νερό εξατμίζεται και οι παραγόμενοι ατμοί συμπυκνώνονται προς το παραγόμενο αφαλατωμένο νερό.

Ο ηλιακός αποστακτήρας είναι απλός στην κατασκευή και τοποθέτησή του. Αποτελείται από έναν “δίσκο” (pan) που η επιφάνειά του έχει μεγάλη απορροφητικότητα σε ηλιακή ακτινοβολία, στον οποίο τροφοδοτείται το θαλασσινό νερό, και ένα κάλυμμα το οποίο επιτρέπει τη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας από αυτό. Η ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει το αλατούχο διάλυμα τροφοδοσίας, το νερό εξατμίζεται και ανέρχεται προς τα πάνω. Συμπυκνώνεται στη διάφανη επιφάνεια η οποία είναι συνήθως κατασκευασμένη από γυαλί, σχηματίζει ένα λεπτό στρώμα που ρέει προς τη βάση όπου και συλλέγεται.

Η μορφή ενός ηλιακού αποστακτήρα δίνεται παραστατικά στην εικόνα που ακολουθεί.



*Εικόνα 1.11: Ηλιακός αποστακτήρας [12]*

Η ηλιακή ακτινοβολία διέρχεται από τα διαφανή τοιχώματα και απορροφάται από τη βάση του “δίσκου”. Η βάση του “δίσκου” έχει καλυφθεί από ένα φωτοαπορροφητικό υλικό. Το υλικό αυτό είναι συνήθως χρωστική μαύρου χρώματος ή διάφορα πολυμερή υλικά. Ο “δίσκος” πληρούται από το διάλυμα προς αφαλάτωση, το ύψος του οποίου μπορεί να ποικίλει. Λεπτό στρώμα έχει ως αποτέλεσμα γρήγορη εξάτμιση κατά τις ώρες άμεσης ηλιακής πρόσπτωσης, ενώ σχεδόν μηδενική εξάτμιση κατά τη διάρκεια της νύχτας. Αντίθετα, στρώμα διαλύματος υψηλής στάθμης έχει ως αποτέλεσμα εξάτμιση μικρής ταχύτητας που διατηρείται όμως για περισσότερες ώρες.

Γενικά η χρήση της ηλιακής ενέργειας για παραγωγή αφαλατωμένου νερού εφαρμόζεται σε μονάδες μικρής δυναμικότητας και κυρίως στις περιπτώσεις εκείνες που δεν είναι διαθέσιμη άλλη μορφή ενέργειας.

### 1.3.5 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΛΥΣΗ (ED)

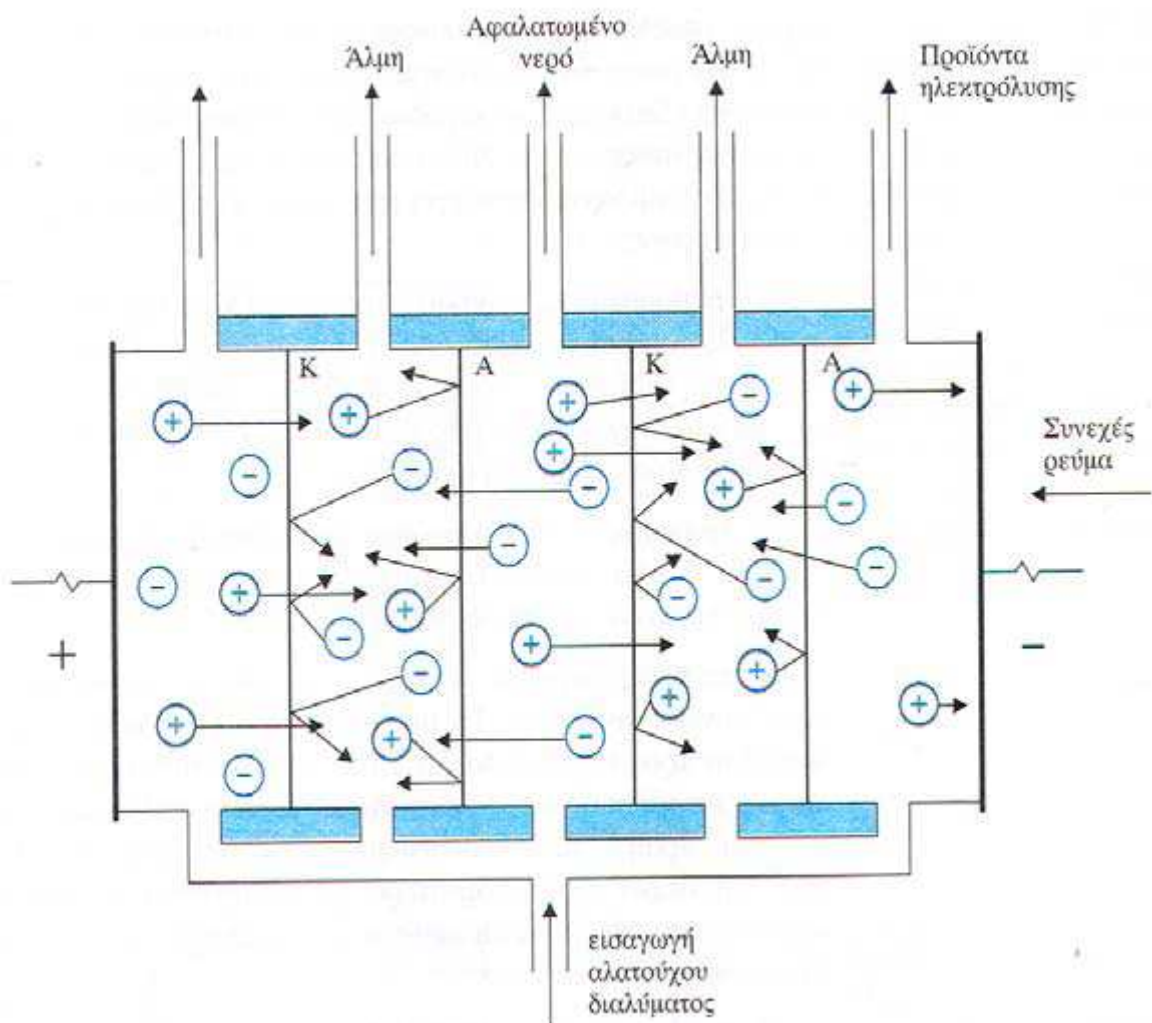
Η ηλεκτροδιάλυση είναι μια διεργασία αφαλάτωσης στην οποία τα άλατα υπό μορφή ιόντων απομακρύνονται από την κύρια μάζα του διαλύματος μέσω μεμβρανών και έτσι το παραμένον διάλυμα περιέχει άλατα μικρότερης συγκέντρωσης. Κινητήριος δύναμη που απομακρύνει τα ιόντα είναι η ηλεκτρική ενέργεια μέσω ενός ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από ένα συνεχές ρεύμα. Έτσι, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης των ιόντων στο αλατούχο διάλυμα.



*Εικόνα 1.12: Εγκατάσταση ηλεκτροδιάλυσης [6]*

Η κατασκευή και η λειτουργία μιας μονάδας αφαλάτωσης με ηλεκτροδιάλυση φαίνεται στην εικόνα 1.13.





*Εικόνα 1.13: Δέσμη ηλεκτροδιάλυσης σε λειτουργία [12]*

Η μονάδα ηλεκτροδιάλυσης αποτελείται από μία σειρά στενών θαλάμων πάχους 0,1 cm, δια μέσω των οποίων εισάγεται και κινείται με τη βοήθεια αντλίας το αλατούχο διάλυμα προς αφαλάτωση. Ο λόγος του μικρού πάχους των θαλάμων είναι η μείωση της ηλεκτρικής αντίστασής τους και η ελαχιστοποίηση του φαινομένου της συγκέντρωσης πόλωσης. Τα τμήματα αυτά χωρίζονται μεταξύ τους εναλλακτικά από ανιονικές (A) και κατιονικές (K) μεμβράνες δηλαδή μεμβράνες που επιτρέπουν τη δίοδο μόνο των αρνητικών ή θετικών ιόντων αντίστοιχα. Τα εξωτερικά τμήματα φέρουν ηλεκτρόδια στα οποία διοχετεύεται συνεχές ρεύμα.

Όταν τα ηλεκτρόδια συνδεθούν με μια πηγή συνεχούς ρεύματος, τα ιόντα αρχίζουν να κινούνται. Τα ανιόντα κινούνται προς την άνοδο και τα κατιόντα προς την κάθοδο. Κατά την κίνησή τους συναντούν τις μεμβράνες οι οποίες όμως επιτρέπουν μόνο στο ένα είδος από αυτά να διέλθει. Η εναλλαγή των μεμβρανών δεν επιτρέπει την είσοδο των ιόντων που εγκαταλείπουν ένα θάλαμο να αντικατασταθούν από ομοειδή τους από τον δίπλα θάλαμο. Κάθε μονάδα ηλεκτροδιάλυσης αποτελείται από δεκάδες μέχρι εκατοντάδες θαλάμους. Το αποτέλεσμα της διόδου του ηλεκτρικού ρεύματος είναι η παραγωγή εναλλάξ στους θαλάμους αφαλατωμένου νερού και άλμης. Στους δύο ακραίους θαλάμους έχουμε προϊόντα ηλεκτρόλυσης και γι αυτό το λόγο τα προϊόντα των θαλάμων αυτών απορρίπτονται επίσης.

Η μέθοδος της ηλεκτροδιάλυσης εφαρμόζεται κυρίως για την αφαλάτωση υφάλμυρου και όχι θαλασσινού νερού

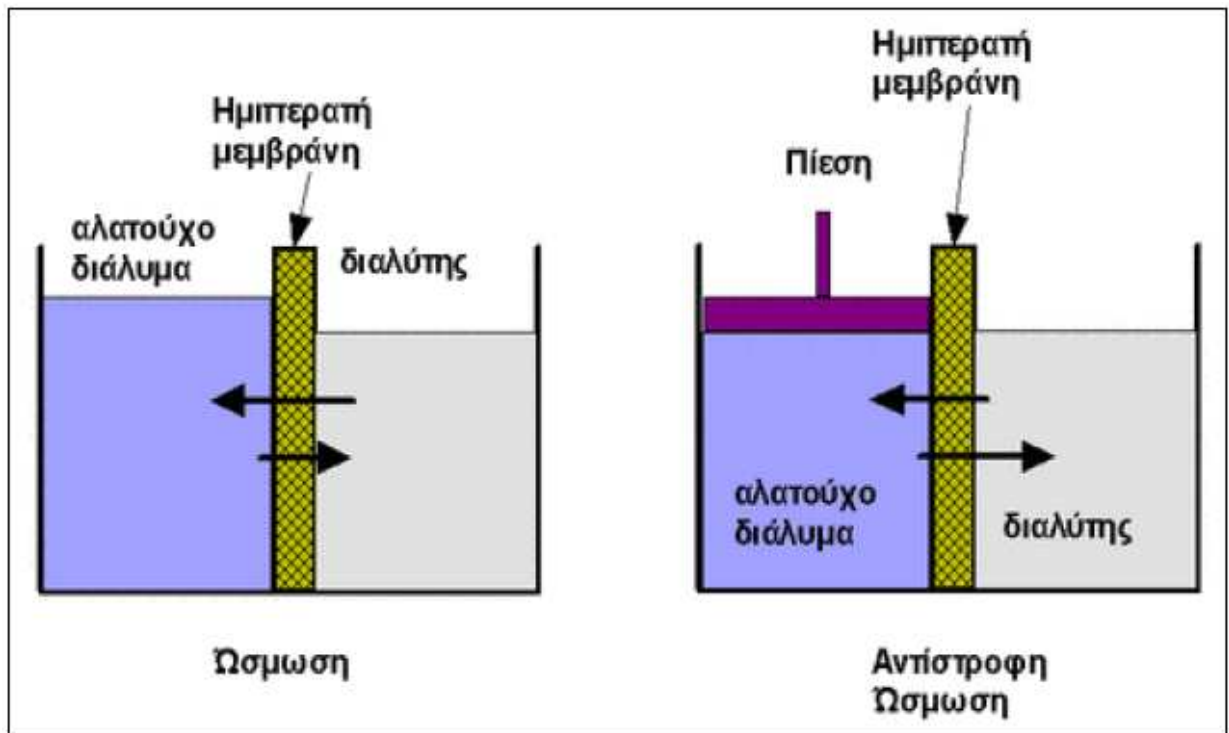
Εύρος μεγεθών	15-50.000 m <sup>3</sup> /ημ
Νερό τροφοδοσίας	κυρίως Υφάλμυρο (Υ)
Ποιότητα παραγόμενου νερού	300-500 ppm TDS
Απαιτούμενη ενέργεια	Ηλεκτρική (1.5-4 kWh/m <sup>3</sup> για 1.500-3500 ppm TDS)

*Πίνακας 1.4: Χαρακτηριστικά Ηλεκτροδιάλυσης [7]*



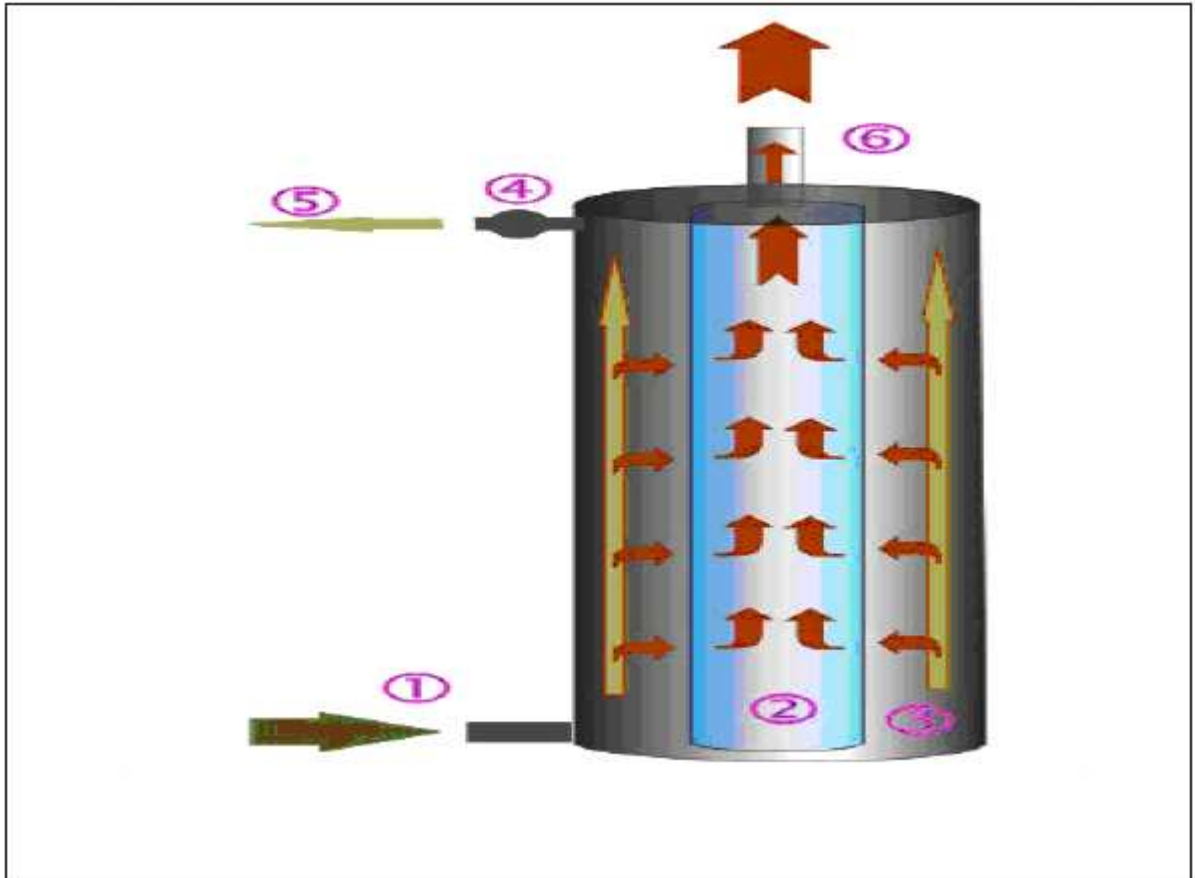
### 1.3.6 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΟΣΜΩΣΗ

Επειδή η διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης θα περιγραφεί πιο αναλυτικά σε επόμενα κεφάλαια, προς το παρόν θα δοθεί μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας. Η αντίστροφη όσμωση είναι μια διαδικασία διαχωρισμού η οποία χρησιμοποιεί πίεση για να ωθήσει ένα διάλυμα μέσω μιας μεμβράνης η οποία κρατάει την διαλυμένη ουσία στην μια πλευρά και επιτρέπει στον καθαρό, πλέον, διαλύτη να περάσει από την άλλη μεριά. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.14, τα τμήματα του δοχείου χωρίζονται από μια ημιδιαπερατή μεμβράνη. Το ένα τμήμα περιέχει μια ποσότητα καθαρού νερού ενώ το άλλο τμήμα περιέχει ίδια ποσότητα αλατούχου διαλύματος. Αρχικά οι στάθμες βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, ενώ στη συνέχεια η στάθμη του τμήματος που περιέχει το αλατούχο διάλυμα ανεβαίνει καθώς τα μόρια του νερού που βρίσκονται στο τμήμα με το καθαρό νερό περνούν στο άλλο τμήμα διαμέσου της μεμβράνης. Το διάλυμα δηλαδή με την μικρότερη συγκέντρωση αλάτων θα περάσει μέσα από την μεμβράνη προς το πυκνότερο διάλυμα μέχρι να εξισωθούν οι συγκεντρώσεις. Αν με κάποιο τρόπο ανακοπεί η πορεία των μορίων του καθαρού νερού προς το αλατούχο, εφαρμόζοντας κάποια πίεση, τότε η ροή σταματά και τα δύο διαλύματα βρίσκονται κάτω από μια ισορροπία πιέσεων.



*Εικόνα 1.14: Το φαινόμενο της όσμωσης[11]*

Η πίεση που εφαρμόζεται, ονομάζεται οσμωτική πίεση. Εάν αυξηθεί η τεχνητή πίεση στο αλατούχο διάλυμα, θα συμβεί το εξής φαινόμενο: το νερό που υπάρχει στο αλατούχο διάλυμα θα περνά στο διαμέρισμα με το καθαρό νερό και η στάθμη αυτού του διαμερίσματος θα ανεβαίνει. Μέσα από τους πόρους της μεμβράνης διέρχεται μόνο το καθαρό νερό, ενώ το αλάτι παραμένει στο διαμέρισμα του αλατούχου διαλύματος και η στάθμη του συνεχώς κατεβαίνει. Η τεχνική αυτή, η οποία προκάλεσε το αντίθετο φαινόμενο από την όσμωση ονομάζεται αντίστροφη όσμωση. Κατά τη διαδικασία αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση η αντλία υψηλής πίεσης διοχετεύεται το αλμυρό νερό στο σύστημα μεμβρανών. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.15, το νερό προς αφαλάτωση εισέρχεται στο σύστημα από την είσοδο 1 και τοποθετείται στον χώρο 3. Αυτός ο χώρος βρίσκεται υπό πίεση και έτσι το νερό αναγκάζεται κατά ποσοστό 25% να περάσει μέσα από τη μεμβράνη 2 και να εξέλθει καθαρό από την έξοδο 6. Διαφορετικά αν ξεπεραστεί το όριο πίεσης της βαλβίδας θα εξέλθει από την έξοδο 5 χωρίς να έχει καθαριστεί.



*Εικόνα 1.15: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας συσκευής αντίστροφης όσμωσης [10]*

Η αφαλάτωση θαλασσινού νερού ακολουθεί την εξής διαδικασία η οποία περιλαμβάνει 3 στάδια:

- το στάδιο της προεπεξεργασίας,
- το στάδιο της αντίστροφης όσμωσης,
- το τελικό στάδιο της μετα-επεξεργασίας.

Το στάδιο της προεπεξεργασίας είναι σημαντικό καθώς βοηθά στην προστασία των μεμβρανών από τα άλατα και τους μικροοργανισμούς. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει, ένα φίλτρο εισόδου (με τοποθέτηση σχάρας για να μην εισέρχονται ψάρια, πλαστικά κ.α. κατά την αναρρόφηση νερού), την προχλωρίωση του θαλασσινού νερού, την προσθήκη οξέων (για αποφυγή απόθεσης αλάτων), το φίλτρο άμμου (για φιλτράρισμα μικρότερων σωματιδίων), τα φίλτρα πολυπροπυλενίου (για

κατακράτηση των στερεών ουσιών με μέγεθος μέχρι και 1μm, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν φθορά στις μεμβράνες), την αποχλωρίωση και την αποστείρωση με υπεριώδη ακτινοβολία. Στο στάδιο της αντίστροφης όσμωσης, το νερό δέχεται πίεση ώστε να περάσει μέσα από τις μεμβράνες και να απορρίψει τα άλατά του. Αυτή η πίεση έχει μέγεθος 54-80 bar. Καθώς ένα μέρος του νερού περνάει μέσα από τις μεμβράνες, στο υπόλοιπο νερό αυξάνεται η συγκέντρωση των αλάτων.

Την ίδια στιγμή ένα μέρος του νερού που τροφοδοτείται στις μεμβράνες απορρίπτεται χωρίς να περάσει μέσα από αυτές. Χωρίς αυτή την ελεγχόμενη απόρριψη, η συγκέντρωση των αλάτων στο νερό θα συνέχιζε να αυξάνει, με επακόλουθο την εναπόθεση των υπερκορεσμένων αλάτων και αύξηση της οσμωτικής πίεσης κατά μήκος των μεμβρανών. Η ποσότητα του νερού αυτού είναι μεταξύ 20% και 70% της ροής τροφοδοσίας και εξαρτάται από τη συγκέντρωση των αλάτων στο νερό τροφοδοσίας. Στο στάδιο της μετα-επεξεργασίας πραγματοποιείται η προετοιμασία του παραγόμενου νερού ώστε να αρχίσει η διανομή του. Αυτή η προετοιμασία περιλαμβάνει την απομάκρυνση αερίων, όπως το υδρόθειο, την ρύθμιση της οξύτητας (pH), την αύξηση της σκληρότητας του νερού και την τελική χλωρίωση. Στην μέθοδο αυτή το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που καταναλώνεται χρησιμοποιείται από τις αντλίες που ασκούν πίεση στο νερό. Επειδή η οσμωτική πίεση (που πρέπει να υπερνικηθεί) είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των αλάτων, η αντίστροφη όσμωση είναι η πρώτη επιλογή για υφάλμυρα νερά, με την πίεση λειτουργίας να είναι 15 – 25 bar, ενώ για θαλάσσιο νερό είναι 54 – 80 bar, αφού η οσμωτική του πίεση είναι περίπου 25 bar. Η σημαντικότερη απώλεια ενέργειας είναι η εκτόνωση της άλμης, όταν βγαίνει με υψηλή πίεση απ' τη συσκευή και γι' αυτό, σε μεγάλες κυρίως μονάδες, υπάρχουν συστήματα ανάκτησης της ενέργειας αυτής, όπως υδροστρόβιλοι, με αποτελεσματικότητα μέχρι και 95%.



*Εικόνα 1.16: Εγκαταστάσεις μονάδας αντίστροφης όσμωσης [7]*

Εύρος μεγεθών	0.4-128.000 m <sup>3</sup> /ημ (Θ) 2.5-98.000 m <sup>3</sup> /ημ (Υ)
Νερό τροφοδοσίας	Θαλασσινό (Θ) Υφάλμυρο (Υ)
Ποιότητα παραγόμενου νερού	250-500 ppm TDS
Απαιτούμενη ενέργεια	Ηλεκτρική 3-15 kWh/m <sup>3</sup> (Θ) Ηλεκτρική 0.5-3 kWh/m <sup>3</sup> (Υ)

*Πίνακας 1.5: Χαρακτηριστικά αντίστροφης όσμωσης [7]*

#### **1.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ**

Η επιλογή βέλτιστης μεθόδου αφαλάτωσης βασίζεται σε παράγοντες όπως το νερό τροφοδοσίας, η απαιτούμενη ποιότητα του παραγόμενου νερού, το μέγεθος της μονάδας, η διαθεσιμότητα ηλεκτρικής ενέργειας και η διαχείριση της άλμης .

### 1. Νερό τροφοδοσίας

Το νερό τροφοδοσίας καθορίζει σημαντικά την τεχνολογία αφαλάτωσης που θα επιλεγεί. Για επεξεργασία θαλασσινού νερού επιλέγονται οι τεχνολογίες της πολυβάθμιας εκτόνωσης, της πολυβάθμιας εξάτμισης και της επανασυμπίεσης ατμών. Για την επεξεργασία υφάλμυρου νερού επιλέγεται η τεχνολογία της ηλεκτροδιάλυσης ενώ η αντίστροφη όσμωση επεξεργάζεται τόσο το θαλασσινό όσο και το υφάλμυρο νερό. Η επιλογή υφάλμυρου νερού πλεονεκτεί, έναντι του θαλασσινού, καθώς η συγκέντρωση αλάτων είναι μικρότερη πράγμα που συνδέεται άμεσα με το μέγεθος της απαιτούμενης ενέργειας.

### 2. Ποιότητα παραγόμενου νερού

Οι θερμικές διεργασίες (πολυβάθμια εκτόνωση, πολυβάθμια εξάτμιση, επανασυμπίεση ατμών) παράγουν αποσταγμένο νερό με συγκέντρωση αλάτων πολύ χαμηλή της τάξης των 10 ppm. Αντίθετα οι διεργασίες μεμβράνης (αντίστροφη όσμωση και 56 ηλεκτροδιάλυση) παράγουν νερό με συγκέντρωση αλάτων 350-500 ppm. Ο παράγοντας που καθορίζει την επιλογή της εκάστοτε τεχνολογίας εξαρτάται από τη χρήση για την οποία παράγεται το νερό. Σύμφωνα με την εμπειρία υπάρχουν αμφιβολίες για την καταλληλότητα των θερμικών διεργασιών για την παραγωγή πόσιμου νερού που θα καταναλωθεί μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα.

### 3. Μέγεθος μονάδας

Ο παράγοντας που καθορίζει τη δυναμικότητα μιας μονάδας αφαλάτωσης είναι το μέγεθος της ζήτησης νερού. Η πολυβάθμια εκτόνωση συνίσταται για περιπτώσεις μεγάλου μεγέθους (1000 – 60000 m<sup>3</sup>), η πολυβάθμια εξάτμιση για περιπτώσεις μεσαίου μεγέθους (500 – 20000 m<sup>3</sup>) ενώ η εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις για πολύ μικρές εφαρμογές (25 – 2.500 m<sup>3</sup>). Από την άλλη μεριά, οι διεργασίες μεμβράνης είναι κατάλληλες για κάθε είδους εφαρμογές (0,4 – 128.000 m<sup>3</sup>).

#### 4. Διαχείριση άλμης

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστεί κατά τη λειτουργία μιας μονάδας αφαλάτωσης, είναι η διαχείριση της άλμης. Η άλμη προέρχεται από την επεξεργασία του θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού και είναι ένα μείγμα με υψηλή αλατότητα. Οι επικρατέστερες λύσεις σήμερα είναι:

- α) να ταφεί στη γη
- β) να διοχετευτεί στη θάλασσα

Η πρώτη περίπτωση είναι περιβαλλοντικά απαράδεκτη καθώς η άλμη αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για τις καλλιέργειες. Για παράδειγμα το μεγάλο πρόβλημα έπεται από ένα τσουνάμι ή μια πλημμύρα της θάλασσας, δεν είναι η πλημμύρα αυτή καθ' αυτή αλλά το αλάτι που αφήνει πίσω της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να καταστρέφει κάθε καλλιέργεια στην ευρύτερη περιοχή μετατρέποντας τα χωράφια σε άγονα για πολλά χρόνια. Παρόλα αυτά όμως ούτε και η διάθεση στη θάλασσα είναι ακίνδυνη καθώς ελλοχεύει ο κίνδυνος αλλαγής της χημικής σύστασης του θαλασσινού νερού με καταστροφικές συνέπειες για το τοπικό οικοσύστημα. Η καλύτερη λύση που ενδείκνυται, είναι η επιστροφή της άλμης στη θάλασσα με ένα δεύτερο ρεύμα νερού σε σημείο μακριά από εκεί από όπου γίνεται η άντληση. Η σωστή διαχείριση της άλμης αυξάνουν το κόστος αλλά είναι απαραίτητη για την προστασία του περιβάλλοντος.

#### 5. Διαθεσιμότητα ηλεκτρικής ενέργειας

Η μέθοδος της αφαλάτωσης είναι αρκετά ενεργοβόρα και το μέγεθος της ενέργειας που απαιτείται ποικίλει ανάλογα με την δυναμικότητα της μονάδας αφαλάτωσης και από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται. Η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται στην πολυβάθμια εξάτμιση / εκτόνωση κυμαίνεται από 4-6 kWh/m<sup>3</sup> και στην επανασυμπύεση ατμών από 8-15 kWh/m<sup>3</sup>. Αντίθετα η αντίστροφη όσμωση και η ηλεκτροδιάλυση είναι οικονομικότερες και η απαιτούμενη ενέργεια κυμαίνεται από 0.5 - 3 kWh/m<sup>3</sup> και 1.5 - 4 kWh/m<sup>3</sup> αντίστοιχα. Λόγω του ότι η ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από τη ΔΕΗ είναι οικονομικά ασύμφορη (ειδικά σε μεγάλες εφαρμογές), τα τελευταία χρόνια έχει συνδυαστεί η μέθοδος της αφαλάτωσης με τη χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.)

## **2.ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΟΣΜΩΣΗ**

### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Ο στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει στοιχεία των διεργασιών διαχωρισμού μεμβράνης και να εξηγήσει τις αρχές αυτού του διαχωρισμού. Επίσης ορίζεται το εύρος για την εφαρμογή των διάφορων διαδικασιών μεμβράνης και συνοψίζονται οι παράμετροι απόδοσης των διεργασιών διαχωρισμού μεμβρανών.

Επιπλέον, γίνεται συνοπτική περιγραφή για τα διάφορα υλικά κατασκευής και τις διαμορφώσεις της μονάδας διαχωρισμού. Αυτό περιλαμβάνει επίσης τα στοιχεία της διαδικασίας αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση.

### **2.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ**

Ένας αριθμός από διεργασίες αφαλάτωσης με βάση τη μεμβράνη χρησιμοποιούνται σε βιομηχανική κλίμακα. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1, διαδικασίες με βάση τη μεμβράνη είναι η αντίστροφη όσμωση (reverse osmosis), νανοδιήθηση (nanofiltration), υπερδιήθηση (ultrafiltration) και μικροδιήθηση (microfiltration). Οι διαφορές ανάμεσα σε αυτές τις διαδικασίες φαίνονται στο εικόνα 2.1, όπου:

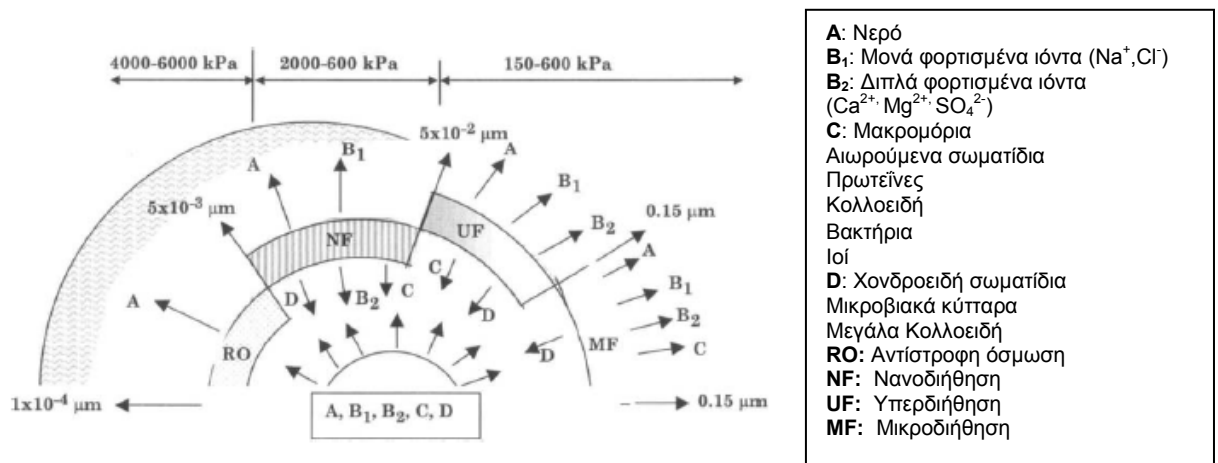
- η μικροδιήθηση λειτουργεί σε ένα εύρος μεγέθους των σωματιδίων έως 0,15  $\mu\text{m}$ .
- η υπερδιήθηση λειτουργεί σε ένα εύρος μεγέθους των σωματιδίων από 0,15  $\mu\text{m}$  έως  $5 \times 10^{-2}$   $\mu\text{m}$
- η νανοδιήθηση λειτουργεί σε ένα εύρος μεγέθους των σωματιδίων από  $5 \times 10^{-2}$   $\mu\text{m}$  έως  $5 \times 10^{-3}$   $\mu\text{m}$
- η αντίστροφη όσμωση λειτουργεί σε ένα εύρος μεγέθους των σωματιδίων του  $5 \times 10^{-3}$   $\mu\text{m}$  έως  $10^{-4}$   $\mu\text{m}$ .



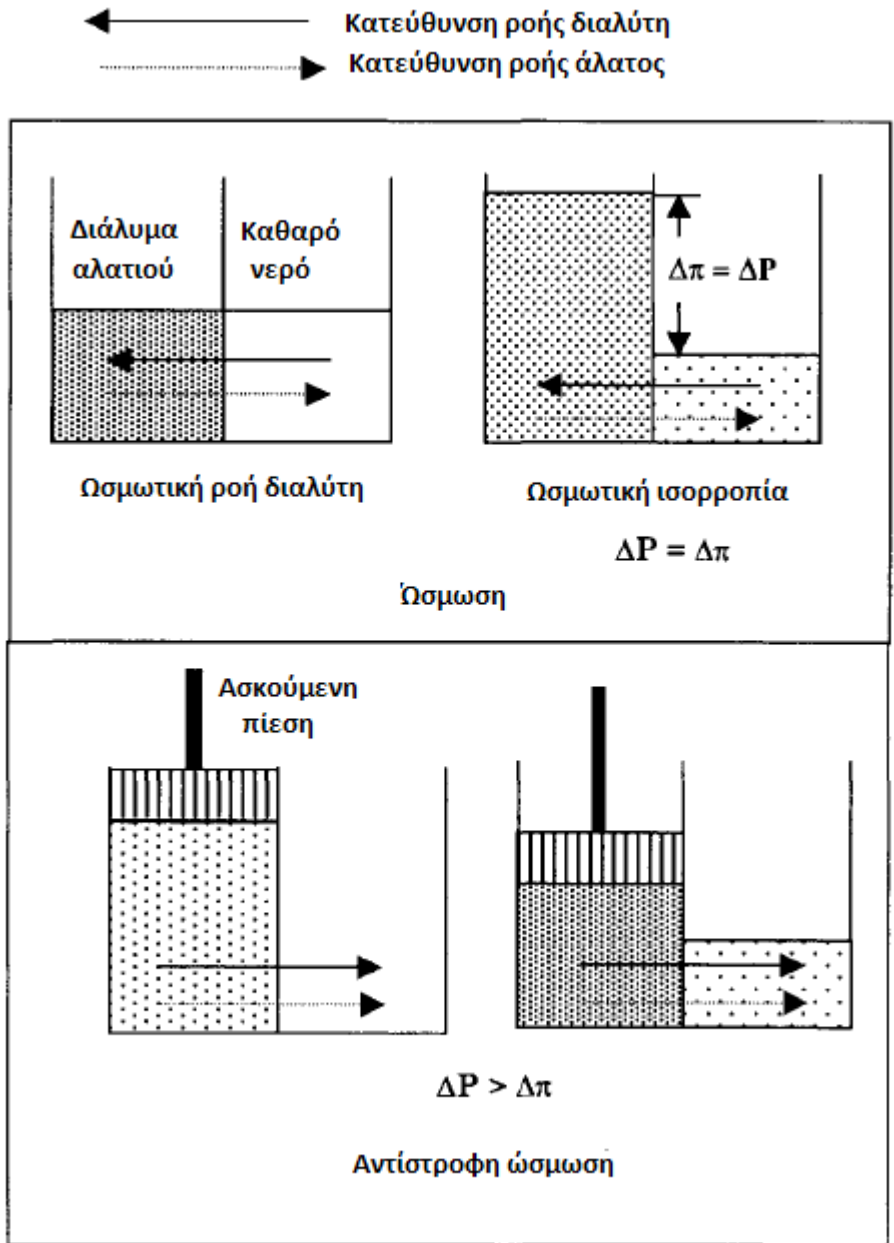
Υπάρχει μια εγγενής διαφορά στον μηχανισμό διαχωρισμού σε όλες τις διεργασίες φιλτραρίσματος και την διαδικασία αντίστροφης όσμωσης. Στο φιλτράρισμα, ο διαχωρισμός γίνεται από ένα μηχανισμό κοσκινίσματος, όπου η μεμβράνη αφήνει να περάσουν τα μικρότερα σωματίδια και συγκρατεί τα μεγαλύτερα. Στις διαδικασίες αντίστροφης όσμωσης ή όσμωσης διαπερνά τη μεμβράνη μόνο ο διαλύτης και συγκρατείται η διαλυμένη ουσία. Ο περαιτέρω διαχωρισμός των τεσσάρων διεργασιών μεμβράνης φαίνονται στο σχήμα. 1. Όπως φαίνεται, οι διαδικασίες μικροδιήθησης, υπερδιήθησης και νανοδιήθησης χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό του αποβαλλόμενου υλικού. Αντίθετα, η διαδικασία αντίστροφης όσμωσης χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό των διαλυμένων στερεών σωματιδίων. Η νανοδιήθηση χρησιμοποιείται για μερική μαλάκωση του υφάλμυρου νερού.

Το σχήμα για το φαινόμενο της ώσμωσης και την αντίστροφης όσμωσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.2. Στη διάταξη αυτή, η κατεύθυνση της ροής του διαλύτη καθορίζεται από το χημικό του δυναμικό, το οποίο είναι συνάρτηση της πίεσης, της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης των διαλυμένων στερεών ουσιών. Το καθαρό νερό σε επαφή με τις δύο πλευρές μιας ιδανικής ημιδιαπερατής μεμβράνης σε ίση πίεση και θερμοκρασία δεν έχει καθαρή ροή διαμέσου της μεμβράνης γιατί το χημικό δυναμικό είναι ίσο και στις δύο πλευρές. Εάν προστεθεί διαλυτό αλάτι από τη μία πλευρά, το χημικό δυναμικό αυτού του διαλύματος άλατος είναι μειωμένο. Θα εμφανιστεί οσμωτική ροή διαμέσου της μεμβράνης από την καθαρή πλευρά του νερού προς την πλευρά με το διάλυμα άλατος μέχρι να αποκατασταθεί η ισορροπία των χημικών δυναμικών.

Ισορροπία εμφανίζεται όταν η υδροστατική διαφορά πίεσης, που προκύπτει από την μεταβολή του όγκου στις δύο πλευρές, είναι ίση με την οσμωτική πίεση. Αυτό είναι μια ιδιότητα του διαλύματος ανεξάρτητη από τη μεμβράνη. Εφαρμογή μιας εξωτερικής πίεσης στην πλευρά του διαλύματος άλατος ίση με την οσμωτική πίεση θα προκαλέσει επίσης ισορροπία. Πρόσθετη πίεση θα αυξήσει το χημικό δυναμικό του νερού στο διάλυμα άλατος και προκαλεί ροή του διαλύτη προς την καθαρή πλευρά του νερού, επειδή έχει πλέον χαμηλότερο χημικό δυναμικό.



*Εικόνα 2.1: Διαδικασίες διαχωρισμού μεμβράνης και αντίστοιχα μεγέθη σωματιδίων [1]*



Εικόνα 2.2 : Διαδικασίες ώσμωσης και αντίστροφης ώσμωσης[1]

## 2.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Η διαδικασία αντίστροφης όσμωσης ορίζεται με βάση μια σειρά από μεταβλητές, οι οποίες είναι:

- Οσμωτική πίεση και πίεση λειτουργίας.
- Απόρριψη αλατιού.
- Ποσοστό ανάκτησης.

Εταιρίες κατασκευής μεμβρανών ορίζουν τις προδιαγραφές του συστήματος όσον αφορά την ποιότητα της τροφοδότησης, η οποία περιλαμβάνει την περιεκτικότητα σε αλάτι και τη θερμοκρασία.

### 2.3.1 ΟΣΜΩΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ ΚΑΙ ΠΙΕΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η οσμωτική πίεση ενός διαλύματος,  $\pi$ , μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά από μέτρηση της συγκέντρωσης των διαλυμένων αλάτων στο διάλυμα. Η οσμωτική πίεση ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$\pi = R * T * \sum X_i \quad (2.1)$$

όπου

$\pi$  είναι η οσμωτική πίεση ( $kPA$ ).

$T$  είναι η θερμοκρασία ( $K$ ).

$R$  είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων,  $8.314 \frac{kPa * m^3}{kg * mol * K}$

$\sum X_i$  είναι η συγκέντρωση όλων των συστατικών σε ένα διάλυμα ( $\frac{kg * mol}{m^3}$ ).

Μια προσέγγιση για την  $\pi$  μπορεί να γίνει με την παραδοχή ότι 1000 ppm συνολικών διαλυμένων στερεών σωματιδίων (Total Dissolved Solids TDS) ισούται με 75,84 kPa της οσμωτικής πίεσης.

Η πίεση λειτουργίας ρυθμίζεται για να αποφευχθούν οι αρνητικές επιπτώσεις των παρακάτω:

- Οσμωτική πίεση
- Απώλειες τριβής
- Αντοχή μεμβράνης
- Πίεση διηθήματος

Αν η πίεση λειτουργίας είναι ίση με το άθροισμα των πιο παραπάνω αντιστάσεων, ο καθαρός ρυθμός ροής που διαπερνά κατά μήκος της μεμβράνης θα είναι ελάχιστος ή σχεδόν μηδενικός, επομένως η πίεση λειτουργίας ορίζεται σε υψηλότερη τιμή, προκειμένου να διατηρηθεί οικονομικός ρυθμός ροής.

### 2.3.2 ΑΠΟΡΡΙΨΗ ΑΛΑΤΙΟΥ

Η απόρριψη αλατιού ορίζεται ως:

$$SR = 100\% * \left[ 1 - \left( \frac{X_p}{X_f} \right) \right] \quad (2.2)$$

όπου  $SR$  είναι η απόρριψη αλατιού (σε ποσοστό %),  $X_p$  είναι η περιεκτικότητα του διηθήματος του νερού σε αλάτι (σε ppm), και  $X_f$  είναι η περιεκτικότητα του τροφοδοτικού νερού σε αλάτι (σε ppm). Για παράδειγμα, τροφοδοτικό θαλασσινό νερό με 42.000 ppm και διήθημα με περιεκτικότητα σε αλάτι 150 ppm δίνει ένα ποσοστό περάσματος αλατιού 99,64%. Ομοίως, για τροφοδοτικό υφάλμυρο νερό με περιεκτικότητα σε αλάτι 5000 ppm και διήθημα με περιεκτικότητα σε αλάτι 150 ppm δίνει ένα ποσοστό περάσματος αλατιού 97%. Οι δύο περιπτώσεις υποδεικνύουν τη δραματική διαφορά μεταξύ των μεμβρανών αφαλάτωσης θαλασσινού και υφάλμυρου

νερού. Οι τρέχουσες τεχνολογίες μεμβράνης παρέχουν απόρριψη αλατιού με τιμές πάνω από 99% και για τις δύο μεμβράνες θαλασσινού και υφάλμυρου νερού.

### 2.3.3 ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ

Η ανάκτηση του διηθήματος είναι μια άλλη σημαντική παράμετρος στο σχεδιασμό και την λειτουργία των συστημάτων αντίστροφης όσμωσης. Η ανάκτηση ή συντελεστής μετατροπής του τροφοδοτικού νερού σε προϊόν (διήθημα) ορίζεται ως

$$R = 100\% * \left( \frac{M_p}{M_f} \right) \quad (2.3)$$

όπου  $R$  είναι το ποσοστό ανάκτησης(σε ποσοστό%),  $M_p$  είναι ο ρυθμός ροής του διηθήματος του νερού, και  $M_f$  είναι ο ρυθμός ροής του τροφοδοτικού νερού. Το ποσοστό ανάκτησης επηρεάζει το πέρασμα του αλατιού και τη ροή των προϊόντων. Όσο αυξάνεται το ποσοστό ανάκτησης, η συγκέντρωση άλατος στην τροφοδοτική πλευρά άλμης της μεμβράνης αυξάνει, το οποίο προκαλεί την αύξηση της ροής αλατιού σε όλη τη μεμβράνη. Επίσης, μια υψηλότερη συγκέντρωση αλατιού στο τροφοδοτικό διάλυμα άλμης αυξάνει την οσμωτική πίεση, μειώνοντας την ( $\Delta P - \Delta \pi$ ) και, κατά συνέπεια, μειώνει το ρυθμό ροής του νερού- προϊόντος.

Η ανάκτηση στη μεμβράνη στα συστήματα αντίστροφης όσμωσης έχει αυξηθεί διαχρονικά από χαμηλότερες τιμές (10-20%)στις τρέχουσες υψηλότερες τιμές (έως και 50%). Αυτό επιτυγχάνεται από το σωστό σχεδιασμό του συστήματος και τη χρήση πολλαπλών μονάδων σπειροειδών μεμβρανών μέσα στο ίδιο δοχείο πίεσης. Όσο για τις μεμβράνες λεπτών ινών είναι συνηθισμένο να χρησιμοποιήσει μια ξεχωριστή μονάδα μέσα στο ίδιο δοχείο πίεσης.

## **2.4 ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ**

Χαρακτηριστικά των μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

-Οι μεμβράνες σχηματίζονται από λεπτό στρώμα από πολυμερές υλικό πάχους αρκετών χιλιάδων Angstroms το οποίο ρίχνεται σε πολυμερές πορώδες υλικό.

-Οι εμπορικές μεμβράνες έχουν υψηλή διαπερατότητα νερού και υψηλό βαθμό ημιδιαπερατότητας, δηλαδή το ποσοστό της μεταφοράς νερού πρέπει να είναι πολύ υψηλότερο από το ρυθμό μεταφοράς των διαλυμένων ιόντων.

-Η μεμβράνη πρέπει να είναι σταθερή σε ένα ευρύ φάσμα του pH και της θερμοκρασίας και να έχουν καλή μηχανική ακεραιότητα.

-Η ζωή των εμπορικών μεμβρανών κυμαίνεται μεταξύ 3-5 ετών. Κατά μέσο όρο, το ετήσιο ποσοστό αναπλήρωσης μεμβρανών ανέρχεται σε 5-15%. Αυτό εξαρτάται από την ποιότητα του τροφοδοτικού νερού, τις συνθήκες προεπεξεργασίας και τη σταθερότητα της λειτουργίας.

-Σημαντικά είδη εμπορικών μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης περιλαμβάνουν οξική κυτταρίνη (CA) και πολυαμίδιο (PA).

-Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η επιλογή μεμβράνης συχνά διέπεται από μελέτες συμβατότητας παρά από την απόδοση διαχωρισμού και των συναφών χαρακτηριστικών της ροής.

### **2.4.1 ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ ΟΞΙΚΗΣ ΚΥΤΤΑΡΙΝΗΣ (CA MEMBRANES)**

Η αρχική μεμβράνη CA, που δημιουργήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1950 από τον Loeb και τον Sourirajan, έγινε από πολυμερή διοξική κυτταρίνη. Η τωρινή μεμβράνη CA είναι συνήθως κατασκευασμένη από ένα μείγμα διοξικής και τριοξικής κυτταρίνης. Η διαδικασία προετοιμασίας της μεμβράνης περιλαμβάνει λεπτή επικαλυμμένη χύτευση, φιλτράρισμα με κρύο νερό και υψηλή θερμοκρασία

σκλήρυνσης. Η διαδικασία χύτευσης συνδέεται με μερική αφαίρεση του υλικού του διαλύτη με εξάτμιση. Το φιλτράρισμα αφαιρεί τον υπόλοιπο διαλύτη και άλλες εκχυλίσιμες ενώσεις. Η σκλήρυνση γίνεται σε ζεστό νερό σε θερμοκρασία 60-90 °C. Αυτή η διαδικασία βελτιώνει την ημιδιαπερατότητα της μεμβράνης με μείωση της μεταφοράς του νερού και σημαντική μείωση του αλατιού που διαπερνά.

Οι μεμβράνες CA έχουν ασύμμετρο δομή με ένα πυκνό επιφανειακό στρώμα περίπου 1000-2000 Å (0,1-0,2 micron), η οποία είναι υπεύθυνη για την ιδιότητα απόρριψης του αλατιού. Το υπόλοιπο της ταινίας της μεμβράνης είναι σπογγώδες και πορώδες και έχει υψηλή διαπερατότητα νερού. Η απόρριψη του αλατιού και η ροή του νερού της CA μεμβράνης μπορεί να ελεγχθεί από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και τη διάρκεια της σκλήρυνσης.

#### **2.4.2 MEMBRANES ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΠΟΛΥΑΜΙΔΙΟΥ (PA MEMBRANES)**

Οι μεμβράνες σύνθετου πολυαμιδίου σχηματίζονται από δύο στρώματα, το πρώτο είναι ένα στήριγμα πορώδους πολυσουλφόνης και το δεύτερο είναι ένα ημιδιαπερατό στρώμα καρβοξυλικών οξικών χλωριούχων λειτουργικών ομάδων. Αυτή η διαδικασία κατασκευής επιτρέπει την ανεξάρτητη βελτιστοποίηση των ξεχωριστών ιδιοτήτων του στηρίγματος της μεμβράνης και της επιφάνειας απόρριψης του αλατιού. Η σύνθετη μεμβράνη που προκύπτει χαρακτηρίζεται από υψηλότερη ειδική ροή του νερού και χαμηλότερο πέρασμα του αλατιού από ό,τι στις CA μεμβράνες.

Οι μεμβράνες σύνθετου πολυαμιδίου είναι σταθερά πάνω από ένα ευρύτερο φάσμα pH από ό,τι οι CA μεμβράνες. Ωστόσο, οι μεμβράνες πολυαμιδίου είναι ευαίσθητες σε οξειδωτική υποβάθμιση από το ελεύθερο χλώριο, ενώ οι CA μεμβράνες μπορούν να αντέξουν ορισμένα επίπεδα έκθεσης σε ελεύθερο χλώριο. Σε σύγκριση με μια μεμβράνη πολυαμιδίου, η επιφάνεια της CA μεμβράνης είναι ομαλή και έχει ελάχιστη επιφάνεια που επιβαρύνεται. Λόγω της ουδέτερης επιφάνειας και της αντοχής σε ελεύθερο χλώριο, οι CA μεμβράνες θα έχουν συνήθως μια πιο σταθερή απόδοση από τις μεμβράνες πολυαμιδίου σε εφαρμογές όπου το τροφοδοτικό νερό έχει υψηλό δείκτη ακαθαρσιών, όπως γίνεται με τα αστικά λύματα και τα επιφανειακά αποθέματα νερού.



## **2.5 ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ**

Οι δύο πιο σημαντικοί τύποι διαμόρφωσης της μεμβράνης που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές της αντίστροφης όσμωσης είναι οι ινώδεις μεμβράνες (hollow fiber membranes) και οι μεμβράνες σπειροειδούς περιέλιξης (spiral wound membranes)

### **2.5.1 ΙΝΩΔΕΙΣ ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ (HOLLOW FIBER MEMBRANES)**

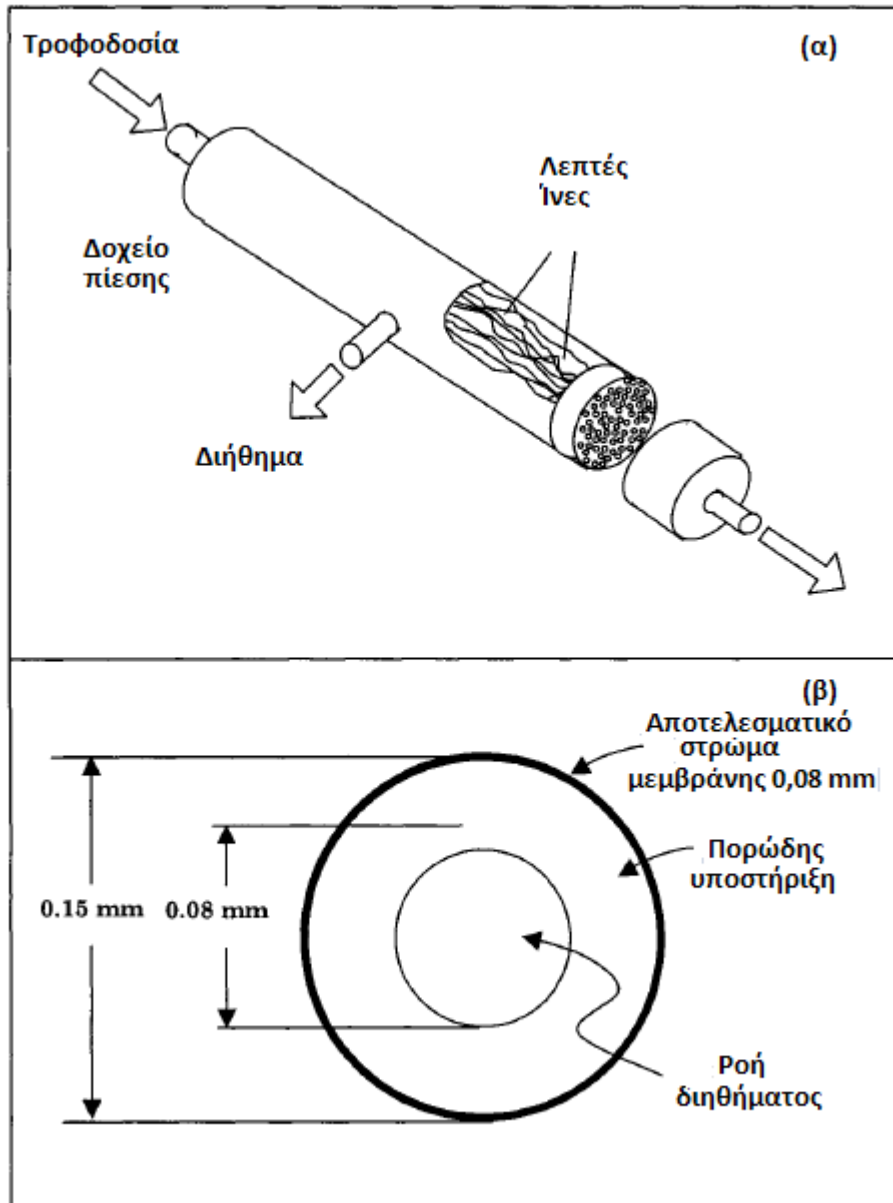
Η διαμόρφωση αυτή χρησιμοποιεί μεμβράνη με τη μορφή κοίλων ινών, οι οποίες έχουν εξαχθεί από κυτταρινικές ή μη κυτταρινικές ύλες. Οι ίνες είναι ασύμμετρες στη δομή και είναι τόσο λεπτές όσο μια ανθρώπινη τρίχα, περίπου μεταξύ 42 μm ID και 85 μm OD, Εικόνα 2.3. Εκατομμύρια από αυτές τις ίνες σχηματίζονται σε μια δέσμη και διπλώνεται στη μέση σε μήκος της τάξης των 120 cm. Ένας διάτρητος πλαστικός σωλήνας, που χρησιμεύει ως διανομέας τροφοδοτικού νερού τοποθετείται στο κέντρο και εκτείνεται σε όλο το μήκος της δέσμης. Η δέσμη είναι τυλιγμένη και τα δύο άκρα είναι εποξειδικά σφραγισμένα για να σχηματίσουν ένα φύλλο, γεγονός το οποίο αποτρέπει την τροφοδοτική ροή από την παράκαμψη στην έξοδο της άλμης.

Η δέσμη των ινώδων μεμβρανών, 10 εκατοστά έως 20 εκατοστά σε διάμετρο, περιέχεται σε κυλινδρική θήκη ή κέλυφος περίπου 137 cm μήκος και 15-30 cm σε διάμετρο. Η κατασκευή αυτή έχει την υψηλότερη ειδική επιφάνεια, που ορίζεται ως η συνολική έκταση ανά μονάδα όγκου, ανάμεσα σε όλες τις μονάδες διαμόρφωσης. Το πεπιεσμένο τροφοδοτικό νερό εισέρχεται στο τελικό νερό, διαπερνά μέσω του κεντρικού σωλήνα-διανομέα τον σωλήνα του τοίχου και ρέει ακτινωτά γύρω από τη δέσμη ινών προς το εξωτερικό κέλυφος πίεσης. Νερό διεισδύει μέσω του εξωτερικού τοίχου των ινών στον κοίλο πυρήνα ή τις τρύπες των ινών, μέσω αυτών των τρυπών διεισδύει στο φύλλο του σωλήνα ή στο τελικό προϊόν της δέσμης ινών, και εξέρχεται μέσα από τη σύνδεση του προϊόντος στο τέλος τροφοδοσίας του διαπεραστή.

Σε μια ινώδη μονάδα, η ροή του νερού που διαπερνά ανά μονάδα επιφανείας της μεμβράνης είναι χαμηλή, και ως εκ τούτου, η συγκέντρωση πόλωσης δεν είναι υψηλή στην επιφάνεια της μεμβράνης. Το αποτέλεσμα είναι ότι οι ινώδεις μονάδες

λειτουργούν σε ένα σύστημα μη τυρβώδους ή στρωτής ροής. Οι μεμβράνες αυτές πρέπει να λειτουργούν πάνω από μια ελάχιστη ροή απόρριψης για την ελαχιστοποίηση της συγκέντρωσης πόλωσης και τη διατήρηση ομαλής κατανομής της ροής μέσα από τη δέσμη ινών. Συνήθως, ένας ινώδης ξεχωριστός διαπεραστής μπορεί να λειτουργεί με ανάκτηση έως και 50 % και να πληρεί την ελάχιστη απαιτούμενη ροή απόρριψης. Η ινώδης μονάδα επιτρέπει μια μεγάλη επιφάνεια μεμβράνης ανά μονάδα όγκου των διαπεραστών που οδηγεί σε συμπαγή συστήματα. Οι ινώδεις μεμβράνες είναι διαθέσιμες για εφαρμογές υφάλμυρου και θαλασσινού νερού εφαρμογές.

Τα υλικά μεμβράνης είναι μείγματα οξικής κυτταρίνης και υλικού τύπου πολυαμιδίου. Λόγω των πολύ στενά συσκευασμένων ινών και της πολύπλοκης ροής της τροφοδοτικής ροής στο εσωτερικό της μονάδας οι μεμβράνες λεπτών ινών απαιτούν τροφοδοτικό νερό καλύτερης ποιότητας (χαμηλότερη συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων) από τις μεμβράνες σπειροειδούς περιέλιξης.



*Εικόνα 2.3: Μεμβράνες λεπτών ινών. (α) Συνολικά. (β) Διαστάσεις ινών [1]*

## 2.5.2 MEMBRANES ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΟΥΣ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ (SPIRAL WOUND MEMBRANES)

Σε μια διαμόρφωση μεμβρανών σπειροειδούς περιέλιξης δύο επίπεδα φύλλα της μεμβράνης χωρίζονται διαμέσω ενός συλλέκτη διαπερατού υλικού για να σχηματίσουν ένα φύλλο. Αυτή η συναρμολόγηση είναι σφραγισμένη στις τρεις πλευρές με την τέταρτη πλευρά να παραμένει ανοιχτή για δυνατότητα διαπερατότητας στην έξοδο. Ένα υλικό φύλλου για την τροφοδοτική άλμη προστίθεται στη συναρμολόγηση των φύλλων. Ορισμένες από αυτές τις

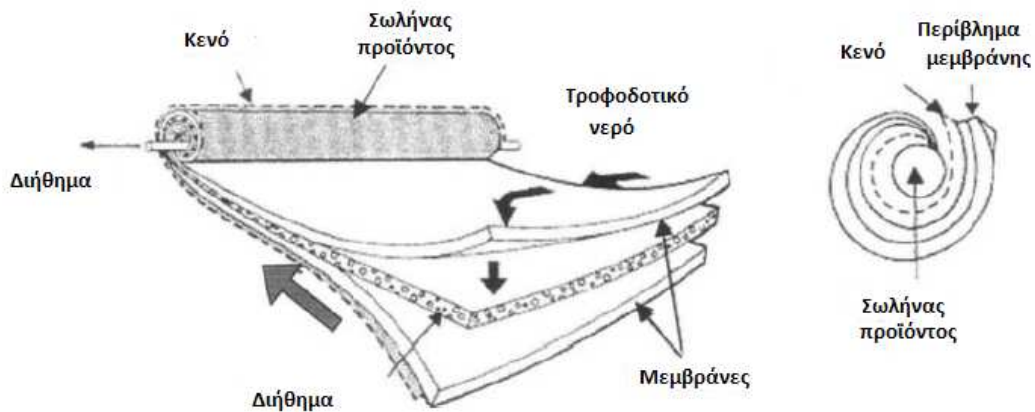
συναρμολογήσεις ή φύλλα τυλίγονται γύρω από ένα κεντρικό πλαστικό διαπερατό σωλήνα. Αυτός ο σωλήνας είναι διάτρητος για τη συλλογή του διηθήματος από τις πολλαπλές συναρμολογήσεις των φύλλων. Η συνηθισμένη βιομηχανική μεμβράνη σπειροειδούς περιέλιξης είναι περίπου 100 ή 150cm μήκος και 10 ή 20 εκατοστά σε διάμετρο(Εικόνα 2.4).

Η ροή της τροφοδοτικής άλμης μέσα από το στοιχείο είναι ένα ευθύ αξονικό μονοπάτι από την τροφοδοσία στο αντίθετο άκρο της άλμης, που τρέχει παράλληλα με την επιφάνεια της μεμβράνης. Το τροφοδοτικό κανάλι προκαλεί αναταράξεις και μειώνει την συγκέντρωση της πόλωσης. Οι κατασκευαστές διευκρινίζουν τις απαιτήσεις της ροής της άλμης για τον έλεγχο της συγκέντρωσης της πόλωσης, περιορίζοντας την ανάκτηση (ή μετατροπή) ανά στοιχείο έως 10- 20%.

Ως εκ τούτου, η ανάκτηση (ή μετατροπή) είναι συνάρτηση του μήκους της πορείας της τροφοδοτικής άλμης. Για να λειτουργεί σε αποδεκτές ανακτήσεις, τα σπειροειδή συστήματα είναι συνήθως κατασκευασμένα με τρία έως έξι στοιχεία μεμβράνης συνδεδεμένα σε σειρά με ένα σωλήνα πίεσης. Το ρεύμα της άλμης από το πρώτο στοιχείο μεμβράνης γίνεται η τροφοδοσία για το επόμενο στοιχείο, και ούτω καθ' εξής για κάθε στοιχείο στο εσωτερικό του σωλήνα πίεσης.

Το ρεύμα της άλμης από το τελευταίο στοιχείο μεμβράνης εξέρχεται από το σωλήνα πίεσης στα απόβλητα. Ό,τι διαπερνά από κάθε στοιχείο μεμβράνης εισέρχεται στο διαπερατό σωλήνα συλλέκτη και εξέρχεται από αυτόν, όπως ένα συνηθισμένο διαπερατό ρεύμα. Ένας ξεχωριστός σωλήνας πίεσης με τέσσερα έως έξι στοιχεία μεμβράνης συνδεδεμένα σε σειρά μπορεί να λειτουργεί με ανάκτηση έως 50% υπό κανονικές συνθήκες σχεδιασμού.

Τα στοιχεία των μεμβρανών σπειροειδούς περιέλιξης πιο συχνά κατασκευάζονται από επίπεδο φύλλο μεμβράνης είτε από μίγμα διοξικής και τριοξικής κυτταρίνης είτε από λεπτό σύνθετο επικάλυμμα. Ένα λεπτό σύνθετο επικάλυμμα μεμβράνης αποτελείται από ένα λεπτό ενεργό στρώμα ενός πολυμερούς χυτού πάνω σε ένα πιο παχύ στρώμα υποστήριξης ενός διαφορετικού πολυμερούς. Οι σύνθετες μεμβράνες παρουσιάζουν συνήθως μεγαλύτερη απόρριψη σε χαμηλότερες πιέσεις λειτουργίας από τα μείγματα οξικής κυτταρίνης. Τα σύνθετα υλικά της μεμβράνης μπορεί να είναι πολυαμίδιο, πολυσουλφόνη, πολυουρεθάνης, ή άλλα πολυμερή.



*Εικόνα 2.4: Μεμβράνες σπειροειδούς περιέλιξης [1]*

## 2.6 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ

Τα συστήματα RO αποτελούνται από τα εξής βασικά στοιχεία:

- Μονάδα παροχής τροφοδοτικού νερού
- Σύστημα προεπεξεργασίας
- Μονάδα άντλησης υψηλής πίεσης
- Μονάδα συναρμολόγησης στοιχείων της μεμβράνης
- Σύστημα μετρήσεων και ελέγχου
- Επεξεργασία διαπερατότητας και μονάδα αποθήκευσης
- Μονάδα καθαρισμού

Η εικόνα 2.5 δείχνει ένα τυπικό διάγραμμα για τη διαδικασία αντίστροφης όσμωσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το σύστημα στην εικόνα 2.5 είναι μόνο ένα παράδειγμα, όπου το επίπεδο της προεπεξεργασίας της τροφοδοσίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας.

Χαρακτηριστικά της διαδικασίας αντίστροφης όσμωσης περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- Τα μεγάλα σωματίδια απομακρύνονται από το τροφοδοτικό νερό χρησιμοποιώντας φίλτρα πλέγματος ή μετακινούμενα προστατευτικά φύλλα. Τα φίλτρα πλέγματος χρησιμοποιούνται σε πηγάδια δικτύων ύδρευσης για να σταματήσουν και να αφαιρέσουν τα σωματίδια, που μπορεί να αντληθούν από το πηγάδι. Τα μετακινούμενα προστατευτικά φύλλα χρησιμοποιούνται κυρίως για τις πηγές των επιφανειακών υδάτων, τα οποία συνήθως έχουν μεγάλες συγκεντρώσεις των βιολογικών υπολειμμάτων.

- Είναι κοινή πρακτική να απολυμαίνεται το τροφοδοτικό νερό επιφάνειας, ώστε να ελεγχθεί η βιολογική δραστηριότητα. Η βιολογική δραστηριότητα στο νερό των γεωτρήσεων είναι συνήθως πολύ χαμηλή, και στην πλειονότητα των περιπτώσεων, δεν χρειάζεται χλωρίωση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, χλωρίωση χρησιμοποιείται για την οξειδωση σιδήρου και μαγγανίου στο νερό των γεωτρήσεων και πριν από τη διήθηση. Το νερό της γεώτρησης που περιέχει υδρόθειο δεν θα πρέπει να χλωριωμένο ή να εκτίθεται στον αέρα. Στην παρουσία ενός οξειδωτικού, το ιόν σουλφίδιο μπορεί να οξειδωθεί σε στοιχειακό θείο, το οποίο τελικά μπορεί να συνδεθεί στα στοιχεία μεμβράνης.

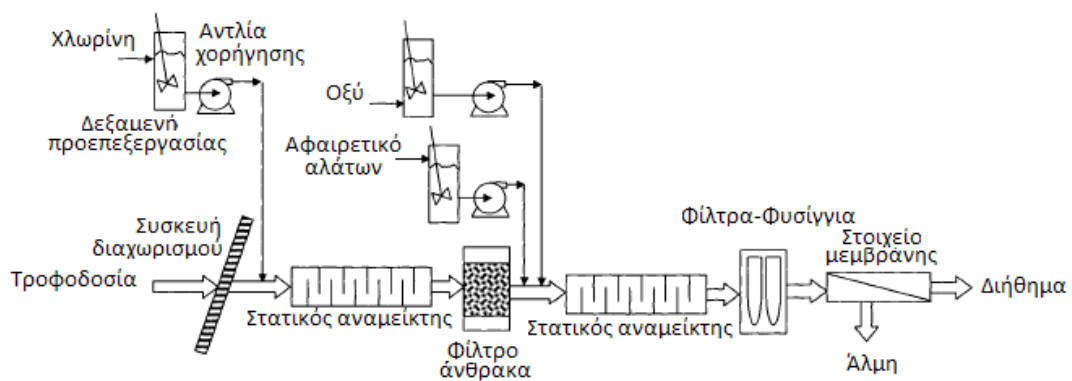
- Η τοποθέτηση των επιφανειακών υδάτων σε μια δεξαμενή οδηγεί σε μερική μείωση των αιωρούμενων σωματιδίων. Η προσθήκη κροκιδωτικών μέσων, όπως ο σίδηρος ή άλατα αλουμινίου, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία της αλλεπάλληλων υδροξειδίων. Αυτά τα υδροξείδια εξουδετερώνουν τα κολλοειδή σωματίδια που επιβαρύνουν την επιφάνεια και απορροφώνται από τα σωματίδια που επιπλέουν πριν εγκατασταθούν στο κάτω μέρος. Για να αυξηθεί το μέγεθος και η δύναμη του μείγματος αυτού, μια μακρά αλυσίδα οργανικών πολυμερών μπορούν να προστεθούν στο νερό για να δεσμεύσει τα σωματίδια του μείγματος μαζί. Η χρήση του ασβέστη έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του pH, σχηματισμό ανθρακικού ασβεστίου και σωματιδίων υδροξειδίου του μαγνησίου. Ο καθαρισμός του ασβέστη έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της σκληρότητας και αλκαλικότητας, και τον καθαρισμό του επεξεργασμένου νερού.

- Το νερό που προέρχεται από πηγάδια περιέχει συνήθως χαμηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων, λόγω του φιλτραρίσματος στον υδροφορέα. Η προεπεξεργασία αυτού του νερού συνήθως περιορίζεται στην εξέταση των πολύ μικρών σωματιδίων, προσθήκη μηχανισμού κατακράτησης με κλίμακα στο τροφοδοτικό νερό, και φίλτρα-φυσίγγια.

- Τα επιφανειακά ύδατα μπορεί να περιέχουν διάφορες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων, οι οποίες είναι είτε ανόργανες είτε βιολογικής προέλευσης. Τα επιφανειακά ύδατα συνήθως απαιτούν απολύμανση για τον έλεγχο της βιολογικής δραστηριότητας και την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων με φιλτράρισμα. Η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας φιλτραρίσματος μπορεί να αυξηθεί με την προσθήκη βοηθητικών φιλτραρίσματος, όπως κροκιδωτικά και οργανικά πολυμερή. Ορισμένα επιφανειακά ύδατα μπορεί να περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις διαλυμένων οργανικών ουσιών. Αυτές μπορούν να αφαιρεθούν με το πέρασμα του τροφοδοτικού νερού μέσω ενός φίλτρου ενεργού άνθρακα. Ανάλογα με τη σύνθεση του νερού, μπορεί να απαιτηθεί αύξηση της οξύτητας και προσθήκη μηχανισμού κατακράτησης. Το διάγραμμα ροής του συστήματος προεπεξεργασίας για επιφανειακά ύδατα φαίνεται παρακάτω.

- Τα φίλτρα-φυσίγγια, που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως συνήθως σε όλα τα συστήματα αντίστροφης όσμωσης πριν από την αντλία υψηλής πίεσης, χρησιμεύουν ως το τελικό εμπόδιο για τα σωματίδια του νερού. Η ονομαστική τιμή που χρησιμοποιείται συνήθως στα συστήματα αντίστροφης όσμωσης είναι της τάξεως των 5 έως 15 microns. Μερικά συστήματα χρησιμοποιούν δοχεία με τιμές micron μικρότερες από το 1 micron. Όμως φίλτρα με μικρές τιμές micron απαιτούν ένα υψηλή αξία αντικατάστασης με σχετικά μικρή βελτίωση στην τελική ποιότητα του τροφοδοτικού νερού.

- Πρόσφατα, νέος εξοπλισμός προεπεξεργασίας για τα συστήματα αντίστροφης όσμωσης έχει εισαχθεί στην αγορά. Αποτελείται από μονάδες μικροδιήθησης τριχοειδών και μεμβρανών υπερδιήθησης. Αυτό το νέο υλικό μπορεί να λειτουργήσει αξιόπιστα σε πολύ υψηλά ποσοστά ανάκτησης και χαμηλή πίεση τροφοδοσίας. Τα νέα τριχοειδή συστήματα μπορούν να παρέχουν καλύτερη ποιότητα νερού τροφοδοσίας από ορισμένα από τα συμβατικά στάδια φιλτραρίσματος που λειτουργούν σε σειρά. Το κόστος αυτού του νέου εξοπλισμού είναι ακόμη πολύ υψηλό σε σύγκριση με το κόστος μιας μονάδας αντίστροφης όσμωσης.



*Εικόνα 2.5: Τυπική διαδικασία αντίστροφης όσμωσης [1]*

## 2.7 ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η διαδικασία αντίστροφης όσμωσης ορίζεται με βάση μια σειρά από μεταβλητές οι οποίες είναι:

- Οσμωτική πίεση
- Μεταφορά νερού
- Μεταφορά Αλατιού
- Πέρασμα Αλατιού
- Απόρριψη Αλατιού
- Ανάκτηση της ποσότητας που διαπερνά
- Συγκέντρωση πόλωσης



Τα κεφάλαια που ακολουθούν περιλαμβάνουν τις εξισώσεις και τους όρους που αποτελούν το απλό μοντέλο ενός συστήματος αντίστροφης όσμωσης. Το μοντέλο βασίζεται στις εξής παραδοχές:

- Σταθερή κατάσταση και ισοθερμική λειτουργία.
- Οι συντελεστές διαπερατότητας διαφόρων ιόντων αλατιού ή του νερού είναι ανεξάρτητες από τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση.
- Παρόμοιοι συντελεστές διαπερατότητας για τα διάφορα ιόντα αλατιού.
- Ο ρυθμός ροής του αλατιού κατά μήκος της μεμβράνης είναι αμελητέος σε σύγκριση με το ρυθμό ροής του νερού που διαπερνά.
- Πλήρης ανάμιξη στην περιοχή διαπέρασης.
- Η συγκέντρωση αλατιού στην περιοχή τροφοδοσίας κυμαίνεται γραμμικά κατά μήκος της περιοχής μεμβράνης.

### 2.7.1 ΜΑΖΑ ΠΟΥ ΔΙΑΠΕΡΝΑ ΚΑΙ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ ΑΛΑΤΙΟΥ

Η μάζα που διαπερνά και οι διακυμάνσεις αλατιού δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$M_f = M_p + M_b \quad (2.4)$$

$$X_f * M_f = X_p * M_p + X_b * M_b \quad (2.5)$$

Όπου

$M_f$  είναι ο τροφοδοτικός ρυθμός ροής,  $\frac{kg}{s}$ .

$M_p$  είναι ο διαπερνών ρυθμός ροής,  $\frac{kg}{s}$ .

$M_b$  είναι ο ρυθμός ροής της άλμης,  $\frac{kg}{s}$ .

$X_f$  είναι η αλατότητα της τροφοδοσίας,  $\frac{kg}{m^3}$ .

$X_p$  είναι η διαπερνούσα αλατότητα,  $\frac{kg}{m^3}$ .

$X_b$  είναι η αλατότητα της άλμης,  $kg$ .

## 2.7.2 ΡΟΗ ΝΕΡΟΥ

Η ακόλουθη σχέση καθορίζει το ποσοστό του νερού που διαπερνά μέσα από μια ημιδιαπερατή μεμβράνη

$$M_p = (\Delta P - \Delta \pi) * K_w * A \quad (2.6)$$

όπου

$M_p$  είναι ο ρυθμός της ροής του νερού μέσω της μεμβράνης,  $m^3/s$ .

$\Delta \pi$  είναι η οσμωτική διαφορά πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης,  $kPa$ .

$K_w$  είναι ο συντελεστής διαπερατότητας του νερού,  $m^3/m^2 * s * kPa$ .

$A$  είναι η περιοχή μεμβράνης,  $m^2$ .

Στην εξίσωση (2.6) οι όροι  $\Delta P$  και  $\Delta \pi$  αντιπροσωπεύουν την διαφορά καθαρής υδραυλικής και οσμωτικής πίεσης διαμέσου της μεμβράνης, αντίστοιχα, ή

$$\Delta P = \bar{P} - P_p \quad (2.7)$$

$$\Delta \pi = \bar{\pi} - \pi_p \quad (2.8)$$

Όπου:

$P_p$  και  $\pi_p$  η διαπερνούσα υδραυλική και οσμωτική πίεση αντίστοιχα.

$\bar{P}$  και  $\bar{\pi}$  είναι η μέση υδραυλική και οσμωτική πίεση στην τροφοδοτική πλευρά και δίνονται από τις εξής εξισώσεις

$$\bar{P} = 0.5 * (P_f + P_b) \quad (2.9)$$

$$\bar{\pi} = 0.5 * (\pi_f + \pi_b) \quad (2.10)$$

όπου  $P_f$  και  $\pi_f$  η υδραυλική και οσμωτική πίεση της τροφοδοτικής ροής, αντίστοιχα, ενώ η  $P_b$  και  $\pi_b$ , η υδραυλική και οσμωτική πίεση στο ρεύμα απόρριψης, αντίστοιχα.

### 2.7.3 ΡΟΗ ΑΛΑΤΙΟΥ

Ο ρυθμός της ροής του αλατιού μέσω της μεμβράνης ορίζεται από

$$M_s = (\bar{X} - X_p) * K_s * A \quad (2.11)$$

Όπου:

$M_s$  είναι ο ρυθμός ροής του αλατιού μέσω της μεμβράνης,  $\frac{kg}{s}$ .

$K_s$  είναι ο συντελεστής διαπερατότητας της μεμβράνης για το αλάτι,  $\frac{m^3}{m^2 * s}$ .

$X_p$  είναι η συνολική συγκέντρωση διαλυμένων στερεών σωματιδίων που διαπερνούν,  $\frac{kg}{m^3}$ .

$A$  είναι η επιφάνεια μεμβράνης,  $m^2$ .

Στην εξίσωση (2.11) ο όρος  $\bar{X}$  ορίζεται ως

$$\bar{X} = \frac{M_f * X_f + M_b * X_b}{M_f + M_b} \quad (2.12)$$

όπου  $X_f$  και  $X_b$  οι συγκεντρώσεις αλατιού στο τροφοδοτικό ρεύμα και το ρεύμα απόρριψης αντίστοιχα.

Οι εξισώσεις (2.6) και (2.11) δείχνουν ότι για μια δεδομένη μεμβράνη:

- Ο ρυθμός της ροής του νερού μέσα από μια μεμβράνη είναι ανάλογος με την καθαρή διαφορά πίεσης  $(\Delta P - \Delta \pi)$  διαμέσου της μεμβράνης.

- Ο ρυθμός ροής αλατιού είναι ανάλογος με τη διαφορά συγκέντρωσης διαμέσου της μεμβράνης  $(\bar{X} - X_p)$  και είναι ανεξάρτητος της ασκούμενης πίεσης.

Η αλατότητα του διήθηματος,  $X_p$ , δίνεται από τον τύπο:

$$X_p = \frac{M_s}{M_d} \quad (2.13)$$

Όπου  $M_d$  ο μειωμένος ρυθμός ροής διαμέσου της μεμβράνης δηλαδή ουσιαστικά είναι η  $M_p$

Το γεγονός ότι το νερό και το αλάτι έχουν διαφορετικούς ρυθμούς μεταφοράς μάζας μέσα από μια δεδομένη μεμβράνη δημιουργεί το φαινόμενο της απόρριψης αλατιού. Καμιά μεμβράνη δεν είναι ιδανική στην απόρριψη αλατιού. Απλώς οι διαφορετικοί ρυθμοί μεταφοράς μάζας δημιουργούν μια φαινομενική απόρριψη. Οι εξισώσεις (2.6) και (2.11) δείχνουν ότι η αύξηση της λειτουργικής πίεσης θα αυξήσει τη ροή του νερού χωρίς να αλλάξει η ροή άλατος, με αποτέλεσμα χαμηλότερη διαπερνούσα αλατότητα.

#### 2.7.4 ΗΜΙΕΜΠΕΙΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Πολλές προσεγγίσεις έχουν υιοθετηθεί στην αξιολόγηση των πειραματικών μοντέλων, οι οποίες περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Μη αναστρέψιμο θερμοδυναμικό μοντέλο.
- Μηχανικό μοντέλο.
- Μοντέλο διαλύματος-διάχυσης.
- Μοντέλο τριχοειδούς ροής επιλεκτικής προσρόφησης.
- Μοντέλο παχύρρευστης ροής διάχυσης.
- Λεπτό πορώδες μοντέλο.

Όλα τα μοντέλα αυτά είναι ειδικές περιπτώσεις των στατιστικών-μηχανικών (statistical-mechanical) μοντέλων των Mason και Lonsdale (1990).

Το στατιστικό-μηχανικό μοντέλο περιλαμβάνει τις ακόλουθες εξισώσεις:

-Απόρριψη αλατιού

$$SR = \left( \frac{C_1}{M_p/A} + C_2 \right)^{-1} \quad (2.14)$$

-Ροή που διαπερνά

$$M_p/A = (D_1 * c_w + D_2) * (\Delta p - \sigma * \Delta \pi) \quad (2.15)$$

-Συγκέντρωση αλατιού στο τοίχωμα της μεμβράνης

$$c_w = c_b + (c_b - c_d) * (e^{M_p/A * k} - 1) \quad (2.16)$$

Οι μεταβλητές στο παραπάνω μοντέλο ορίζονται ως εξής:

-  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $D_1$  και  $D_2$  είναι οι προκύπτουσες σταθερές των εξισώσεων (2.14) και (2.15) από πειραματικά δεδομένα.

-  $SR$  είναι η απόρριψη αλατιού.

- $M_p$  είναι ο ρυθμός ροής που διαπερνά,  $m^3/s$ .
- $A$  είναι η επιφάνεια μεμβράνης,  $m^2$ .
- $\Delta P$  είναι η διαφορά πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης,  $kPa$ .
- $\Delta \pi$  είναι η οσμωτική διαφορά πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης,  $kPa$ .
- $c_w$  είναι η συγκέντρωση αλατιού στο τοίχωμα της μεμβράνης,  $kg/m^3$ .
- $c_b$  είναι η συγκέντρωση αλατιού στο τροφοδοτικό μέρος,  $kg/m^3$ .
- $c_d$  είναι η συγκέντρωση αλατιού στο ρεύμα που διαπερνά,  $kg/m^3$ .
- $k$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας,  $m/s$ .
- $\sigma$  είναι ο συντελεστής ανάκλασης.

Το λεπτό πορώδες μοντέλο περιλαμβάνει τις ακόλουθες εξισώσεις:

-Απόρριψη Αλατιού

$$SR = 1 - \left[ A_1 - (1 - A_1) * e^{-\frac{A_2 * M_p}{A * D_{sw}}} \right]^{-1} \quad (2.17)$$

- Ροή που διαπερνά

$$\frac{M_p}{A} = \frac{\Delta p - \sigma \Delta \pi}{B_1 * c_d + B_2 * \mu} \quad (2.18)$$

- Συγκέντρωση αλατιού στο τοίχωμα της μεμβράνης

$$c_w = c_b + (c_b - c_d) * (e^{\frac{M_p}{A * k}} - 1) \quad (2.19)$$

Οι μεταβλητές στο παραπάνω μοντέλο είναι παρόμοιες με αυτές του statistical-mechanical μοντέλου, εκτός από τα ακόλουθα:

-  $A_1, A_2, B_1$  και  $B_2$  είναι οι προκύπτουσες σταθερές των εξισώσεων (2.17) και (2.18) από πειραματικά δεδομένα.

-  $\mu$  είναι το δυναμικό ιξώδες του νερού,  $\frac{kg}{m^*s}$ .

-  $D_{sw}$  είναι ο συντελεστής διάχυσης της διαλυμένης ουσίας στο διάλυμα,  $\frac{m^2}{s}$ .

Και τα δύο μοντέλα είναι μη γραμμικά και απαιτούν επαναληπτική λύση για τον προσδιορισμό της ροής που διαπερνά, της απόρριψης αλατιού και της συγκέντρωσης αλατιού στο τοίχωμα της μεμβράνης.

## 2.7.5 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΠΟΛΩΣΗΣ

Καθώς το νερό ρέει μέσα από τη μεμβράνη και η μεμβράνη απορρίπτει άλατα, ένα οριακό στρώμα σχηματίζεται κοντά στην επιφάνεια της μεμβράνης στο οποίο η συγκέντρωση αλατιού υπερβαίνει τη συγκέντρωση αλατιού που έχει το μεγαλύτερο μέρος του διαλύματος. Αυτή η αύξηση της συγκέντρωσης άλατος ονομάζεται συγκέντρωση πόλωσης (concentration polarization). Η επίδραση της συγκέντρωσης πόλωσης είναι η μείωση της πραγματικής ροής του παραγόμενου νερού και της απόρριψης αλατιού σε σχέση πάντα με τις θεωρητικές εκτιμήσεις. Οι επιπτώσεις της συγκέντρωσης πόλωσης έχουν ως εξής:

- Μεγαλύτερη οσμωτική πίεση στην επιφάνεια της μεμβράνης σε σχέση με το μεγαλύτερο μέρος του τροφοδοτικού διαλύματος,  $\Delta\pi$ , και μειωμένη την καθαρή κινητήρια διαφορά πίεσης στη μεμβράνη ( $\Delta P - \Delta\pi$ ).

- Μειωμένη ροή νερού διαμέσου της μεμβράνης ( $M_d$ ).

- Αυξημένη ροή αλατιού διαμέσου της μεμβράνης ( $M_g$ ).

- Αυξημένη πιθανότητα υπέρβασης της διαλυτότητας των μερικώς διαλυτών αλάτων στην επιφάνεια της μεμβράνης, και πιθανότητα καθίζησης στη μεμβράνη

Ο παράγοντας συγκέντρωσης πόλωσης (Concentration Polarization Factor-  $CPF$ ) μπορεί να οριστεί ως ο λόγος της συγκέντρωσης αλατιού στην επιφάνεια μεμβράνης ( $C_s$ ) προς τη συνολική συγκέντρωση ( $C_b$ ), όπου

$$CPF = C_s / C_b \quad (2.20)$$

Μια αύξηση στη ροή που διαπερνά θα αυξήσει την παροχή των ιόντων στην επιφάνεια της μεμβράνης και την αύξηση της  $C_s$ . Η αύξηση της τροφοδοτικής ροής εντείνει τις αναταράξεις και μειώνει το πάχος του στρώματος υψηλής συγκέντρωσης κοντά στην επιφάνεια της μεμβράνης. Ως εκ τούτου, η  $CPF$  είναι ανάλογη με τη ροή που διαπερνά ( $M_d$ ), και αντιστρόφως ανάλογη με τη μέση τροφοδοτική ροή ( $M_f$ ), όπου

$$CPF = K_3 * \exp(M_d / M_f) \quad (2.21)$$

όπου  $K_3$  είναι μια σταθερά της αναλογικότητας, ανάλογα με τη γεωμετρία του συστήματος.

Η  $CPF$  μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του ποσοστού ανάκτησης της μεμβράνης ( $R$ ):

$$CPF = K_3 * \exp\left(\frac{2 * R}{2 - R}\right) \quad (2.22)$$

Η τιμή του  $CPF$  1.2, αντιστοιχεί σε ποσοστό ανάκτησης 18%.



## 2.8 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ

Παρακάτω θα δοθούν δυο παραδείγματα μονάδων αφαλάτωσης με συγκεκριμένα δεδομένα, τα οποία μέσω των εξισώσεων του παρόντος Κεφαλαίου 4 βοηθούν στην εύρεση νέων χαρακτηριστικών του συστήματος. Οι λύσεις των δυο παραδειγμάτων έχουν γίνει σε μορφή MATHCAD

### 2.8.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

#### Δεδομένα

$$\text{Διαπερατότητα νερού: } k_w = 2.05 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{m^2 \cdot s}$$

$$\text{Διαπερατότητα αλατιού: } k_s = 2.03 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{m^2 \cdot s}$$

$$\text{Αλατότητα τροφοδοτικού ρεύματος: } X_f = 42 \frac{kg}{m^3}$$

$$\text{Αλατότητα ρεύματος που διαπερνά: } X_d = X_p = 0.145 \frac{kg}{m^3}$$

$$\text{Ρυθμός ροής του τροφοδοτικού ρεύματος: } M_f = 2.5 \frac{kg}{s}$$

$$\text{Ρυθμός ροής του ρεύματος που διαπερνά: } M_d = 1 \frac{kg}{s}$$

$$\text{Πίεση στο ρεύμα τροφοδοσίας: } P_f = 8000 \text{ kPa}$$

$$\text{Πίεση στο ρεύμα απόρριψης: } P_b = 7800 \text{ kPa}$$

$$\text{Πίεση στο ρεύμα που διαπερνά: } P_p = 101 \text{ kPa}$$

### Υπόλοιπες μεταβλητές

$M_b$ ,  $X_b$  οσμωτικές πιέσεις  $\Pi_b$ ,  $\Pi_f$ ,  $\Pi_p$  στην πλευρά της άλμης της τροφοδοσίας και του ρεύματος που διαπερνά αντίστοιχα, μέση οσμωτική πίεση στην τροφοδοτική πλευρά  $\Pi$ , οσμωτική διαφορά πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης  $\Delta\Pi$ , διαφορά πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης  $\Delta p$ .

### Επίλυση

$$M_f := 2.5 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$M_d := 1 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$M_b := M_f - M_d$$

$$M_b = 1.5 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$X_f := 42 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$X_d := 0.145 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$X_b := \frac{M_f \cdot X_f - M_d \cdot X_d}{M_b}$$

$$X_b = 69.903 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$X := \frac{M_f \cdot X_f + M_b \cdot X_b}{M_f + M_b}$$

$$X = 52.464 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\Pi_f := 75.84 X_f$$

$$\Pi_f = 3.185 \times 10^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\Pi_b := 75.84 X_b$$

$$\Pi_b = 5.301 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$X_p := X_d$$

$$X_p = 0.145 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\Pi_p := 75.84 X_p$$

$$\Pi_p = 10.997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\Pi := (\Pi_f + \Pi_b) \cdot 0.5$$

$$\Pi = 4.243 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta \Pi := \Pi - \Pi_p$$

$$\Delta \Pi = 4.232 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$P_f := 8000 \text{ kPa}$$

$$P_p := 101 \text{ kPa}$$

$$P_b := 7800 \text{ kPa}$$

$$\Delta P := (P_f + P_b) \cdot 0.5 - P_p$$

$$\Delta P = 7.799 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$\Delta P := 7799 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$k_w := 2.05 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

$$k_s := 2.03 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

$$A := \frac{Md}{(\Delta P - \Delta \Pi) \cdot kw}$$

$$A = 136.769 \text{m}^2$$

## 2.8.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2

### Δεδομένα ενός στοιχείου

Απόρριψη αλατιού:  $SR = 0.995$

Ποσοστό ανάκτησης στη μεμβράνη:  $R = 0,1$

Επιφάνεια μεμβράνης:  $A = 2.6 \text{ m}^2$

Πτώση πίεσης στην απόρριψη:  $P_f - P_b = 69 \text{ kPa}$

Ρυθμός ροής του ρεύματος που διαπερνά:  $Q_d = 1.736 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

Μέγιστη τιμή ροής ρεύματος τροφοδοσίας =  $3.785 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

Ελάχιστη τιμή ροής ρεύματος απόρριψης =  $0.868 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

Πίεση στο ρεύμα τροφοδοσίας:  $P_f = 5500 \text{ kPa}$

### Δεδομένα συστήματος

Αλατότητα του τροφοδοτικού ρεύματος:  $X_f = 42 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Πίεση στο ρεύμα που διαπερνά:  $P_p = 101 \text{ kPa}$

Ρυθμός ροής του ρεύματος που διαπερνά:  $M_d = 5.787 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

### Υπόλοιπες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται

Αλατότητα ρεύματος που διαπερνά  $X_p$  , ρυθμός ροής τροφοδοτικού ρεύματος ενός στοιχείου  $Q_f$  , ρυθμός ροής ρεύματος στην πλευρά της άλμης ενός στοιχείου  $Q_b$  , ρυθμός ροής τροφοδοτικού ρεύματος  $M_f$  , αλατότητα στην πλευρά της άλμης  $X_b$ , οσμωτικές πιέσεις  $\Pi_b$ ,  $\Pi_f$ ,  $\Pi_p$  στην πλευρά της άλμης της τροφοδοσίας και του ρεύματος που διαπερνά αντίστοιχα, μέση οσμωτική πίεση στην τροφοδοτική πλευρά  $\Pi$  , πίεση στην πλευρά της άλμης  $P_b$  , οσμωτική διαφορά πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης  $\Delta\Pi$  , διαφορά πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης  $\Delta p$ .

### Επίλυση

$$SR := 0.99\%$$

$$X_f := 42 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$X_p := (1 - SR) \cdot X_f$$

$$X_p = 0.21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$Q_d := 1.736 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$R := 0.1$$

$$Q_f := \frac{Q_d}{R}$$

$$Q_f = 1.736 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$M_d := 5.787 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_f < 3.785 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$M_f := \frac{M_d}{Q_d} \cdot Q_f$$

$$M_f = 0.579 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_b := Q_f - Q_d$$

$$Q_b = 1.562 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_b > 0.868 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$X_b := \frac{Q_f \cdot X_f - Q_d \cdot X_p}{Q_b}$$

$$X_b = 46.643 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\Pi_f := 75.84 X_f$$

$$\Pi_f = 3.185 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\Pi_b := 75.84 X_b$$

$$\Pi_b = 3.537 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\Pi_p := 75.84 X_p$$

$$\Pi_p = 15.926 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\Pi := (\Pi_f + \Pi_b) \cdot 0.5$$

$$\Pi = 3.361 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta \Pi := \Pi - \Pi_p$$

$$\Delta \Pi = 3.345 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$P_f := 5500 \text{ kPa}$$

$$P_b := P_f - 69 \text{ kPa}$$

$$P_b = 5.431 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$P_p := 101 \text{ kPa}$$

$$\Delta p := (P_f + P_b) \cdot 0.5 - P_p$$

$$\Delta p = 5.364 \times 10^6 \text{ Pa}$$

### **3. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ**

#### **3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Ο στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει στοιχεία του κόστους αφαλάτωσης. Η παρουσίαση περιγράφει στοιχεία του άμεσου / έμμεσου και λειτουργικού κόστους. Ένας αριθμός από μελέτες παρουσιάζονται για τη διαδικασία υπολογισμού. Επίσης, παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των στοιχείων κόστους

#### **3.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ**

Το κόστος του προϊόντος της μονάδας εξαρτάται από αρκετούς σχεδιασμούς και λειτουργικές μεταβλητές:

- Αλατότητα και ποιότητα του νερού τροφοδοσίας: Μικρότερη αλατότητα της τροφοδοσίας επιτρέπει υψηλότερα ποσοστά μετατροπής. Ως αποτέλεσμα, το εργοστάσιο μπορεί να λειτουργεί με χαμηλότερη ειδική ισχύ κατανάλωσης και δοσολογία των χημικών ουσιών για την αφαίρεση αλάτων. Επίσης, ο χρόνος διακοπής που σχετίζεται με χημική κλιμάκωση είναι σημαντικά μειωμένος.

-Χωρητικότητα της εγκατάστασης: μεγαλύτερη χωρητικότητα της εγκατάστασης μειώνει το κόστος κεφαλαίου για τη μονάδα. Παρόλα αυτά, η αύξηση της χωρητικότητας της εγκατάστασης συνεπάγεται υψηλότερο κεφάλαιο.

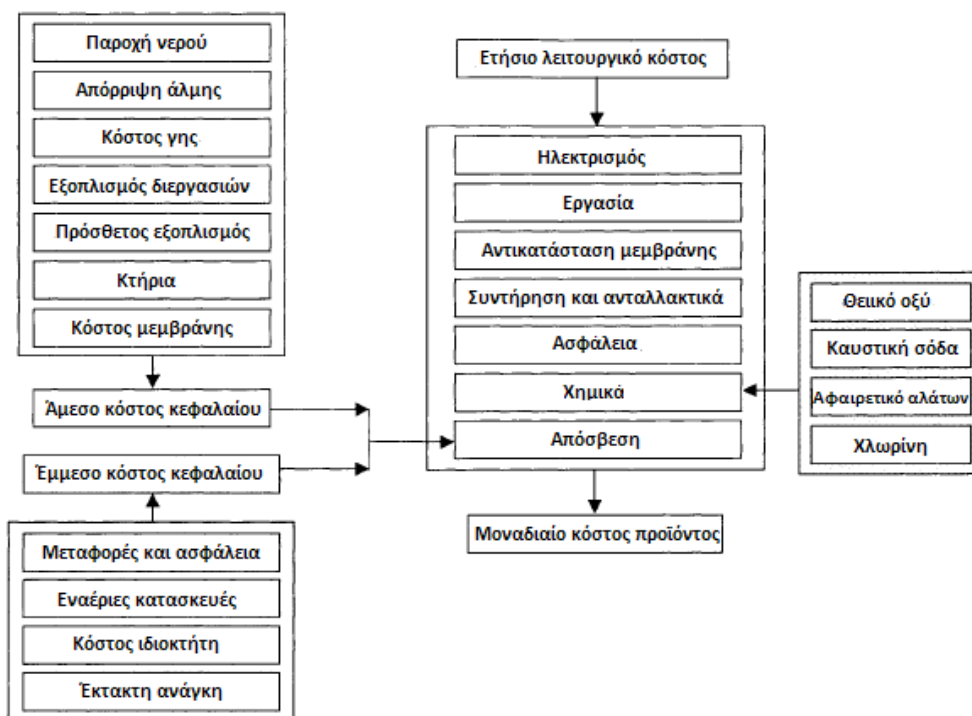
- Συνθήκες τοποθεσίας: Εγκατάσταση νέων μονάδων σε ήδη υφιστάμενες εγκαταστάσεις, θα εξαλείψει το κόστος που σχετίζεται με εξοπλισμούς για μεταφορά τροφοδοτικού νερού, απόρριψη της άλμης και προεπεξεργασίας του τροφοδοτικού νερού.



- Ειδικευμένο προσωπικό: η ύπαρξη ειδικευμένων χειριστών, μηχανικών και η διοίκηση θα είχε ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη διαθεσιμότητα της μονάδας, υψηλότερη δυνατότητα παραγωγής και λιγότερο χρόνο διακοπής που οφείλεται στις μεταφορές των συσκευών.
- Κόστος ενέργειας: η διαθεσιμότητα φθηνών πηγών για χαμηλό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και ατμού θέρμανσης έχουν ισχυρό αντίκτυπο στο κόστος της μονάδας.
- Χρόνος ζωής της μονάδας και αποσβέσεις: η αύξηση της ζωής της μονάδας μειώνει το κόστος κεφαλαίου του προϊόντος.

### **3.3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ**

Οι υπολογισμοί του κόστους της μονάδας εξαρτώνται από τις δυνατότητες του συστήματος, χαρακτηριστικά της περιοχής και χαρακτηριστικά του σχεδιασμού. Οι δυνατότητες του συστήματος προσδιορίζουν τα μεγέθη για τους διάφορους εξοπλισμούς διεργασιών, τις αντλητικές μονάδες και το μέγεθος της περιοχής της μεμβράνης. Χαρακτηριστικά της τοποθεσίας έχουν ισχυρή επίδραση σχετικά με το είδος του εξοπλισμού προεπεξεργασίας και μετα-επεξεργασίας, και τα ποσοστά της κατανάλωσης των χημικών ουσιών. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά σχεδίασης της διαδικασίας επηρεάζουν την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, ατμού θέρμανσης, και χημικών ουσιών. Η Εικόνα 3.1 δείχνει μια περίληψη για τα οικονομικά στοιχεία των διαδικασιών αφαλάτωσης. Όπως φαίνεται το κόστος παραγωγής είναι χωρισμένο στο άμεσο / έμμεσο κόστος και το ετήσιο λειτουργικό κόστος.



Εικόνα 3.1: Στοιχεία κόστους των διεργασιών αφαλάτωσης [1]

### 3.4 ΑΜΕΣΟ ΚΟΣΤΟΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Το άμεσο κόστος κεφαλαίου καλύπτει το κόστος αγοράς των διαφόρων τύπων εξοπλισμού, βοηθητικού εξοπλισμού, το κόστος γης, την κατασκευή, και τα κτήρια . Τα ακόλουθα δίνουν σύντομη περιγραφή των διαφόρων στοιχείων του κόστους με τις τρέχουσες εκτιμήσεις κόστους.

α. Κόστος γης: Το κόστος γης μπορεί να ποικίλλει σημαντικά από μηδενικά έξοδα μέχρι ένα συνολικό ποσό που εξαρτάται από τις ιδιότητες της τοποθεσίας. Μονάδες που ανήκουν στο κράτος έχουν συνήθως μηδενικά έξοδα. Επίσης, μονάδες στο πλαίσιο των συμβάσεων BOOT με τις κυβερνήσεις ή δήμους μπορούν να μηδενίσουν ή να μειώσουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τα έξοδα.

β. Παροχή νερού: Πρόσφατες εκτιμήσεις δείχνουν \$650/m βάθους για την κατασκευή. Η μέση δυνατότητας ύδρευσης υπολογίζεται σε 500 m<sup>3</sup>/d.

γ. Εξοπλισμός Διεργασιών: Αυτό είναι ένα από τα πιο ακριβά στοιχεία και εξαρτάται από τον τύπο της διαδικασίας και τη χωρητικότητα. Το κόστος του εξοπλισμού διεργασιών μπορεί να είναι λιγότερο από \$1000. Ένα καλό παράδειγμα είναι μια μονάδα αντίστροφης όσμωσης εργαστηριακής κλίμακας που λειτουργεί με νερό της βρύσης χαμηλής περιεκτικότητας σε αλάτι. Από την άλλη, το κόστος εξοπλισμού για σύστημα αντίστροφης όσμωσης 100.000 m<sup>3</sup>/d θα ήταν περίπου \$50x10<sup>6</sup>. Το κόστος εξοπλισμού για συστήματα MSF και MED είναι πιο ακριβό από ότι για διαδικασίες αντίστροφης όσμωσης με τις σημερινές εκτιμήσεις να φθάνουν τα \$40x10<sup>6</sup> για χωρητικότητα μονάδων 27.000m<sup>3</sup>/d. Στοιχεία που περιλαμβάνονται σε αυτή την κατηγορία είναι τα παρακάτω:

- Όργανα και συστήματα ελέγχου
- Αγωγοί και βαλβίδες
- Ηλεκτρική καλωδίωση
- Αντλίες
- Συστήματα καθαρισμού
- Εξοπλισμός προεπεξεργασίας και μετά-επεξεργασίας
- Γραμμή πρόσληψης θαλασσινού νερού και αποβολής της άλμης
- Μονάδα χλωρίωσης

δ. Βοηθητικός εξοπλισμός:

Στο βοηθητικό εξοπλισμό περιλαμβάνονται:

- Συστήματα πρόσληψης νερού ή πηγάδια
- Σωληνώσεις μεταφοράς.
- Δεξαμενές αποθήκευσης
- Γεννήτριες και μετασχηματιστές
- Αντλίες
- Αγωγοί και βαλβίδες

ε. Κόστος κτηρίων:

Το κόστος κτηρίων κυμαίνεται σε ένα ευρύ φάσμα από \$100/m<sup>2</sup> έως \$1000/m<sup>2</sup>. Αυτό το εύρος εξαρτάται από την περιοχή τον τύπο του κτηρίου. Τα κτήρια περιλαμβάνουν τα εξής:

- Αίθουσα ελέγχου
- Εργαστήριο
- Γραφεία

στ. Κόστος μεμβράνης:

Το κόστος των μονάδων μεμβράνης κυμαίνεται μεταξύ \$500 έως \$1000 ανά μονάδα, που έχουν τα ποσοστά παραγωγής των 50-100 m<sup>3</sup>/d.

### **3.5 ΕΜΜΕΣΟ ΚΟΣΤΟΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ**

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

α. Μεταφορά και ασφάλιση

Το κόστος αυτό είναι ίσο με το 5% του συνολικού άμεσου κόστους.

β. Λειτουργικό κόστος κατασκευής

Το κόστος αυτό είναι ίσο με το 15% του άμεσου κόστους υλικών και εργασίας και στη συνέχεια προσαρμόζεται στο μέγεθος (συνολικό κόστος κεφαλαίου) της μονάδας. Γενικά έξοδα κατασκευής περιλαμβάνουν τα εξής:

- Πρόσθετες παροχές
- Επιβαρύνσεις Εργασίας
- Επίβλεψη της εργασίας
- Προσωρινές εγκαταστάσεις
- Εξοπλισμός κατασκευαστικών έργων
- Μικρά εργαλεία
- Κέρδος του εργολάβου

#### γ. Έξοδα ιδιοκτήτη

Δαπάνες του ιδιοκτήτη είναι τα μηχανολογικά και τα νομικά έξοδα. Οι δαπάνες αυτές είναι ίσο με το 10% άμεσου κόστους υλικών και εργασίας και στη συνέχεια προσαρμόζεται στο μέγεθος της μονάδας.

#### δ. Έκτακτη ανάγκη

Το σχέδιο έκτακτης ανάγκης λαμβάνεται στο 10% των συνολικών άμεσων δαπανών.

### **3.6 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ**

Το κόστος λειτουργίας καλύπτει όλες τις δαπάνες που πραγματοποιούνται μετά την εξουσιοδότηση της μονάδας και κατά τη διάρκεια της πραγματικής λειτουργίας. Τα στοιχεία αυτά περιλαμβάνουν την εργασία ,την ενέργεια, χημικά, ανταλλακτικά κτλ. Τα ακόλουθα δίνει σύντομη περιγραφή του κάθε στοιχείου και τρέχουσες εκτιμήσεις του κόστους:

#### α. Ηλεκτρική ενέργεια

Το κόστος κυμαίνεται σε ένα εύρος \$0.04-0.09/kWh. Το ανώτατο όριο είναι χαρακτηριστικό των Ευρωπαϊκών χωρών και το κατώτατο όριο μπορεί να βρεθεί στις Gulf States και τις ΗΠΑ

#### β. Εργασία

Αυτό το στοιχείο του κόστους εξαρτάται από την τοποθεσία και από το αν η μονάδα ανήκει στο κράτος ή σε ιδιώτες. Επιπλέον, οι πρόσφατες τάσεις στη λειτουργία της εγκατάστασης σκοπεύουν σε λειτουργία που περιλαμβάνει εξωτερικούς συνεργάτες αλλά και καθήκοντα συντήρησης. Αυτό μειώνει το ανθρώπινο δυναμικό πλήρους ωραρίου, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει το διευθυντή της μονάδας και μια μικρή ομάδα από έμπειρους μηχανικούς και τεχνικούς.

#### γ. Αντικατάσταση μεμβράνης

Το ποσοστό του κόστους αντικατάστασης μπορεί να ποικίλλει μεταξύ 5% -20% ετησίως. Το κατώτατο όριο ισχύει για υφάλμυρο νερό με χαμηλή περιεκτικότητα σε αλάτι που υποστηρίζεται από το σωστό σύστημα λειτουργίας και προεπεξεργασίας και το ανώτερο όριο ισχύει για θαλασσινό νερό υψηλής αλατότητας (όπως στην Gulf area) και οφείλεται σε σχετικά φτωχή λειτουργία και αναποτελεσματικό σύστημα προεπεξεργασίας.

#### δ. Συντήρηση και Ανταλλακτικά

Αυτό το στοιχείο του κόστους μπορεί να συμβάλλει σε ένα ποσοστό χαμηλότερο από το 2% του συνολικού κόστους κεφαλαίου που χρησιμοποιείται ως ετήσιο ποσοστό.

#### ε. Ασφάλιση

Η ασφάλιση υπολογίζεται στο 0,5% του συνολικού κόστους κεφαλαίου.

#### στ. Απόσβεση ή Πάγια Τέλη

Αυτό το στοιχείο καθορίζει τις ετήσιες πληρωμές που καλύπτουν το σύνολο του άμεσου και έμμεσου κόστους. Το κόστος αυτό προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του συνολικού άμεσου και έμμεσου κόστους με το συντελεστή απόσβεσης, ο οποίος ορίζεται από την ακόλουθη σχέση

$$a = \frac{i * (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3.1)$$

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

#### ζ. Χημικά

Οι χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία και τον καθαρισμό της τροφοδοσίας περιλαμβάνουνθειικό οξύ, καυστική σόδα, αφαιρετικά χλωρίου, και χλώριο. Το κόστος αυτών των στοιχείων μπορεί να επηρεαστεί από τη διαθεσιμότητα των γύρω εργοστασίων παραγωγής και τις τιμές στην παγκόσμια αγορά. Επίσης, η χημική επεξεργασία διαφέρει ανάμεσα στις θερμικές και τις διαδικασίες μεμβράνης, όπου υψηλότερο ειδικό κόστος υπολογίζεται για τις διαδικασίες μεμβράνης. Επίσης, η επεξεργασία εξαρτάται από τη μέγιστη θερμοκρασία άλμης και την περιεκτικότητα της τροφοδοσίας σε αλάτι. Ο πίνακας 3.1 δίνει εκτιμήσεις για το κόστος ανά μονάδα των χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται στη θερμική αφαλάτωση και αφαλάτωση μεμβράνης, τα ποσοστά χορήγησης, καθώς και συγκεκριμένα ποσοστά ανά μονάδα όγκου του παραγόμενου νερού

Χημικές ουσίες	Μοναδιαίο Κόστος (\$/kg χημικής ουσίας)	Ποσοστό δοσολογίας (kg χημικής ουσίας/kg νερού)	Ειδικό Κόστος (\$/m <sup>3</sup> νερού)
Θειικό Οξύ	0.504	2.42*10 <sup>-5</sup>	0.0122
Καυστική σόδα	0.701	1.4*10 <sup>-5</sup>	0.0098
Αφαιρετικό αλάτων	1.9	4.99*10 <sup>-6</sup>	0.0095
Χλώριο	0.482	4*10 <sup>-6</sup>	0.00193

*Πίνακας 3.1 : Υπολογισμός του κόστους των χημικών ουσιών και των ποσοστών δοσολογίας [1]*

### 3.7 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ

Ο Πίνακας 3.2 δείχνει μια περίληψη για το κόστος ανά μονάδα προϊόντος των σημαντικότερων διεργασιών αφαλάτωσης (MSF, RO, MED, MVC) όπως αυτές παρουσιάστηκαν από διάφορους ερευνητές. Περιλαμβάνει επίσης δεδομένα για τα MED-TVC και δύο νέα συστήματα, τα οποία περιλαμβάνουν MED με αντλία απορρόφησης θερμότητας (MED-ABS) και μια κάθετη δεσμίδα MED (MED-V) . Τα στοιχεία δείχνουν τις ακόλουθες τάσεις:

- Το κόστος ανά μονάδα προϊόντος της διαδικασίας αντίστροφης όσμωσης εξαρτάται από τη χωρητικότητα. Πρόσφατες εκτιμήσεις δίνουν \$0.55/m<sup>3</sup> για το μεγάλο σχέδιο αντίστροφης όσμωσης στη Φλόριντα των ΗΠΑ, με χωρητικότητα 113.652 m<sup>3</sup>/d. Εξετάζοντας πρόσφατα στοιχεία, μονάδες μικρότερης χωρητικότητας κοστίζουν \$0.83/m<sup>3</sup> και \$1.22/m<sup>3</sup> για τις χωρητικότητες της τάξης των 40.000 m<sup>3</sup>/d και 20.000 m<sup>3</sup>/d, αντίστοιχα. Ανάλογες τιμές ισχύουν σε υπάρχουσες μονάδες αντίστροφης όσμωσης στην Κύπρο.

- Το κόστος ανά μονάδα προϊόντος σε συστήματα αντίστροφης όσμωσης έχει μειωθεί τα τελευταία χρόνια.



- Το κόστος ανά μονάδα προϊόντος για τα συστήματα MSF, MED και MED-TVC είναι υψηλότερο από τη διαδικασία αντίστροφης όσμωσης με τιμές κατά μέσο όρο  $\$1.5/m^3$ .

- Το υψηλότερο κόστος ανά μονάδα προϊόντος έχει προσφερθεί για τη διαδικασία MVC. Ο Veza(1995) αναφέρει τιμή η οποία ανέρχεται στα  $\$3.22/m^3$ , ωστόσο, αυτή η υψηλή τιμή αποδίδεται στο υψηλό κόστος ενέργειας. Αυτό ανεξάρτητα από τη διαθεσιμότητα εργοστασίων. Πρόσφατοι οικονομικοί υπολογισμοί του Morin (1999) δείχνουν παρόμοια και υψηλά κόστη ανά μονάδα προϊόντος με μέσο όρο  $\$2.43/m^3$ .

- Οι χαμηλότερες τιμές ανά μονάδα προϊόντος του πίνακα 3.2 είναι εκείνες για τους καινοτόμους σχηματισμούς, που περιλαμβάνουν την κάθετη δεσμίδα MED και τη MED σε συνδυασμό με αντλία απορρόφησης θερμότητας. Η χωρητικότητα του κάθετου συστήματος είναι  $340.965 m^3/d$ , η μεγαλύτερη που βρέθηκε σε αυτόν τον πίνακα. Η άλλη διαμόρφωση είναι μια πρωτότυπη μονάδα, η οποία έχει ποσοστό απόδοσης 21, το οποίο είναι πολύ υψηλό σε σύγκριση με τη συμβατική σχέση απόδοσης του φάσματος 8-16 για το MED σύστημα με / χωρίς θερμική συμπίεση ατμού.

Οι πιο κρίσιμες παράμετροι για την αξιολόγηση του κόστους είναι τα πάγια τέλη(αποσβέσεις), καθώς και το κόστος της ενέργειας. Άλλες παράμετροι που έχουν μικρότερη επίδραση στο κόστος ανά μονάδα προϊόντος περιλαμβάνουν το κόστος των χημικών προϊόντων κατεργασίας. Οι πίνακες 3.3, 3.4, 3.5 και 3.6 περιλαμβάνουν εκτιμήσεις για το κόστος του κεφαλαίου της διαδικασίας, της ενέργεια, των χημικών προϊόντων και αντικατάστασης μεμβράνης.

Χημικές ουσίες	Μοναδιαίο Κόστος (\$/kg χημικής ουσίας)	Ποσοστό δοσολογίας (kg χημικής ουσίας/kg νερού)	Ειδικό Κόστος (\$/m <sup>3</sup> νερού)
Θειϊκό Οξύ	0.504	$2.42 \cdot 10^{-5}$	0.0122
Καυστική σόδα	0.701	$1.4 \cdot 10^{-5}$	0.0098
Αφαιρετικό αλάτων	1.9	$4.99 \cdot 10^{-6}$	0.0095
Χλώριο	0.482	$4 \cdot 10^{-6}$	0.00193

*Πίνακας 3.1 : Υπολογισμός του κόστους των χημικών ουσιών και των ποσοστών δοσολογίας [1]*

Πίνακας 3.2 : Μοναδιαίο κόστος των προϊόντων για τις συμβατικές και τις δυο καινοτόμες διαδικασίες [1]

### **A. Καινοτόμες διαδικασίες**

<b>Αναφορά</b>	<b>\$/m<sup>3</sup></b>	<b>Παρατηρήσεις</b>
Hammond et al. (1994)	0.48	MED -V, 340.956 m <sup>3</sup> /d, 30 στάδια Κράμα αλουμινίου. Πτυχωτός σωλήνας
DeGunzbourg και Larger (1998)	0.35	MED-ABS, 9600 m <sup>3</sup> /d. Θερμότητα απορρόφησης Τουρμπίνα αντλίας και αερίου.

### **B. Μηχανική συμπίεση ατμού (MVC)**

<b>Αναφορά</b>	<b>\$/m<sup>3</sup></b>	<b>Παρατηρήσεις</b>
Matz και Fisher (1981)	1.51	1000 m <sup>3</sup> /d
Darwish και Al-Najim (1987)	0.89	750 m <sup>3</sup> /d
Darwish et al. (1990)	5	100 m <sup>3</sup> /d
Leitner (1992)	2.48	4000 m <sup>3</sup> /d
Zimmerman (1994)	0.46	20,000 m <sup>3</sup> /d
Veza (1995)	3.22	500 m <sup>3</sup> /d
Morin (1999)	2.43	4546 m <sup>3</sup> /d

### **Γ. Αντίστροφη Ωσμωση (RO)**

<b>Αναφορά</b>	<b>\$/m<sup>3</sup></b>	<b>Παρατηρήσεις</b>
Darwish και Al-Najim (1987)	0.64	Σε ένα στάδιο
Darwish και Al-Najim (1987)	0.76	Σε δύο στάδια
Darwish et al. (1990)	2.37	100 m <sup>3</sup> /d
Leitner (1992)	1.98	4000 m <sup>3</sup> /d
Leitner (1992)	1.09	37,850 m <sup>3</sup> /d
Wade (1993)	1.39	32000 m <sup>3</sup> /d
Zimmerman (1994)	0.58	20,000 m <sup>3</sup> /d
Pappas (1997)	1.22	20,000 m <sup>3</sup> /d
Leitner (1998)	0.83	40,000 m <sup>3</sup> /d
Morin (1999)	1.29	4546 m <sup>3</sup> /d
Morin (1999)	0.68	45460 m <sup>3</sup> /d
Leitner (1999)	0.55	113,652 m <sup>3</sup> /d

### **Δ. Πολυβάθμια εκτόνωση (MSF)**

<b>Αναφορά</b>	<b>\$/m<sup>3</sup></b>	<b>Παρατηρήσεις</b>
Darwish και Al-Najim (1987)	0.77	Σε ένα στάδιο
Darwish και Al-Najim (1987)	1.84	Σε δυο στάδια
Leitner (1992)	1.25	37,850 m <sup>3</sup> /d
Morin (1993)	1.61	45461 m <sup>3</sup> /d
Wade (1993)	1.57	Τουρμπίνα Ατμού
Wade (1993)	1.44	Τουρμπίνα αερίου
Morin (1999)	1.498	45460 m <sup>3</sup> /d

*Συνέχεια Πίνακα 3.2 : Μοναδιαίο κόστος των προϊόντων για τις συμβατικές και τις δυο καινοτόμες διαδικασίες [1]*

**Ε. Πολυβάθμια εξάτμιση (MED)**

<b>Αναφορά</b>	<b>\$/m<sup>3</sup></b>	<b>Παρατηρήσεις</b>
Darwish και Al-Najim (1987)	0.87	Σε ένα στάδιο
Darwish και Al-Najim (1987)	1.95	Σε δυο στάδια
Leitner (1992)	1.08	37,850 m <sup>3</sup> /d
Wade (1993)	1.31	Τουρμπίνα αερίου
Morin (1993)	1.24	22730 m <sup>3</sup> /d
Morin (1999)	1.397	22730 m <sup>3</sup> /d

**ΣΤ. Πολυβάθμια εξάτμιση - Θερμική συμπίεση ατμού (MED-TVC)**

<b>Αναφορά</b>	<b>\$/m<sup>3</sup></b>	<b>Παρατηρήσεις</b>
Darwish και Al-Najim (1987)	2.34	Σε ένα στάδιο
Darwish και Al-Najim (1987)	1.31	Σε δυο στάδια
Morin (1993)	1.55	22166 m <sup>3</sup> /d

<b>Αναφορά</b>	<b>Διαδικασία</b>	<b>\$</b>	<b>\$/ (m<sup>3</sup>/d)</b>	<b>Χωρητικότητα</b>
Matz and Fisher (1981)	RO	9.24x10 <sup>5</sup>	924	1000 m <sup>3</sup> /d
Leitner (1992)	RO	49.7x10 <sup>6</sup>	1313.1	37,850 m <sup>3</sup> /d
Wade (1993)	RO	53.3x10 <sup>6</sup>	1665.6	32,000 m <sup>3</sup> /d
Leitner (1999)	RO	98x10 <sup>6</sup>	1035	94,625 m <sup>3</sup> /d χαμηλή αλατότητα τροφοδοτικού νερού (26,000 to 30,000 ppm)
Matz and Fisher (1981)	MVC	8.94x10 <sup>5</sup>	894	1000 m <sup>3</sup> /d
Veza (1995)	MVC	1.586x10 <sup>6</sup>	1322	1200 m <sup>3</sup> /d
Leitner (1992)	MSF	60.5x10 <sup>6</sup>	1598	37,850 m <sup>3</sup> /d
Wade (1993)	MSF	72.6x10 <sup>6</sup>	2269	32,000 m <sup>3</sup> /d
Morin (1993)	MSF	76.817x10 <sup>6</sup>	1690	45460 m <sup>3</sup> /d
Leitner (1992)	MED	70.4x10 <sup>6</sup>	1860	37,850 m <sup>3</sup> /d
Wade (1993)	MED	67.2x10 <sup>6</sup>	2100	32,000 m <sup>3</sup> /d
Morin (1993)	MED	35.05x10 <sup>6</sup>	1562	22730 m <sup>3</sup> /d
Morin (1993)	MED-TVC	34.65x10 <sup>6</sup>	1524	22730 m <sup>3</sup> /d
Hammond et al. (1994)	MED-V	187.1x10 <sup>6</sup>	548	340956 m <sup>3</sup> /d

*Πίνακας 3.3 : Κόστος κεφαλαίου για διάφορες διαδικασίες αφαλάτωσης[1]*

Αναφορά	Διαδικασία	\$/έτος	\$/m <sup>3</sup>	Χωρητικότητα
Matz και Fisher (1981)	RO	1.71x10 <sup>6</sup>	0.52	1000 m <sup>3</sup> /d
Leitner (1992)	RO	4.3x10 <sup>6</sup>	0.35	37850 m <sup>3</sup> /d
Wade (1993)	RO	6.261x10 <sup>6</sup>	0.63	32000 m <sup>3</sup> /d
Zimmerman (1994)	RO	1.971x10 <sup>6</sup>	0.3	20000 m <sup>3</sup> /d
Veza (1995)	MVC	1.68x10 <sup>5</sup>	1.057	500 m <sup>3</sup> /d
Zimmerman (1994)	MVC	2.69x10 <sup>6</sup>	0.41	20000 m <sup>3</sup> /d
Matz και Fisher (1981)	MVC	3.42x10 <sup>5</sup>	0.52	2000 m <sup>3</sup> /d
DeGunzbourg και Larger (1998)	MED-ABS	5.21x10 <sup>5</sup>	0.165	9600 m <sup>3</sup> /d
Morin (1993)	MED-TVC	5.658x10 <sup>6</sup>	0.758	22730 m <sup>3</sup> /d
Hammond et al. (1994)	MED-V	13.65x10 <sup>6</sup>	0.129	340956 m <sup>3</sup> /d
Leitner (1992)	MED	1x10 <sup>6</sup>	0.08	37850 m <sup>3</sup> /d
Morin (1993)	MED	3.719x10 <sup>6</sup>	0.49	22730 m <sup>3</sup> /d
Wade (1993)	MED	1.2059x10 <sup>7</sup>	1.147	32000 m <sup>3</sup> /d
Leitner (1992)	MSF	4.3x10 <sup>6</sup>	0.35	37850 m <sup>3</sup> /d
Wade (1993)	MSF	1.1539x10 <sup>7</sup>	1.098	32000 m <sup>3</sup> /d
Morin (1993)	MSF	1.2453x10 <sup>7</sup>	0.88	45461 m <sup>3</sup> /d

Πίνακας 3.4: Κόστος της ενέργειας για τις διάφορες διαδικασίες αφαλάτωσης[1]

Αναφορά	Διαδικασία	\$/m <sup>3</sup>	Χωρητικότητα
Matz and Fisher (1981)	RO	0.11	1000 m <sup>3</sup> /d
Darwish et al. (1990)	RO	0.35	100 m <sup>3</sup> /d
Leitner (1992)	RO	0.07	37850 m <sup>3</sup> /d
Wade (1993)	RO	0.33	32000 m <sup>3</sup> /d
Zimmerman (1994)	RO	0.07	20000 m <sup>3</sup> /d
Zimmerman (1994)	MVC	0.05	20000 m <sup>3</sup> /d
Darwish et al. (1990)	MVC	0.025	100 m <sup>3</sup> /d
Matz and Fisher (1981)	MVC	0.02	1000 m <sup>3</sup> /d
DeGunzbourg and Larger (1998)	MED-ABS	0.08	9600 m <sup>3</sup> /d
Hammond et al. (1994)	MED-V	0.04	340956 m <sup>3</sup> /d
Leitner (1992)	MED	0.024	37850 m <sup>3</sup> /d
Morin (1993)	MED	0.0606	22730 m <sup>3</sup> /d
Wade (1993)	MED	0.207	32000 m <sup>3</sup> /d
Leitner (1992)	MSF	0.024	37850 m <sup>3</sup> /d
Wade (1993)	MSF	0.207	32000 m <sup>3</sup> /d
Morin (1993)	MSF	0.058	45461 m <sup>3</sup> /d

Πίνακας 3.4 : Κόστος χημικών για διάφορες διεργασίες αφαλάτωσης [1]

Αναφορά	\$/έτος	\$/m <sup>3</sup>	Χωρητικότητα
Matz και Fisher (1981)	2.673x10 <sup>5</sup>	0.81	1000 m <sup>3</sup> /d
Darwish et al. (1990)	5600	0.17	100 m <sup>3</sup> /d
Wade (1993)	2.722x10 <sup>6</sup>	0.27	32000 m <sup>3</sup> /d
Leitner (1992)	25000	0.19	400 m <sup>3</sup> /d
Leitner (1992)	1.9x10 <sup>6</sup>	0.153	37850 m <sup>3</sup> /d

*Πίνακας 3.5 : Κόστος αντικατάστασης της μεμβράνης [1]*

### 3.8 ΕΤΗΣΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΟΣΤΟΥΣ ΓΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Ακολούθως θα παρατεθούν τα ετήσια στοιχεία κόστους για τις πιο βασικές διαδικασίες αφαλάτωσης (RO, MSF, MED, MVC), τα οποία προέρχονται από παραδοχές που έχουν γίνει. Αυτές οι παραδοχές βασίζονται στις συνεχόμενες μελέτες και έρευνες που έχουν γίνει διεθνώς πρόσφατα και είναι οι εξής:

- Διάρκεια ζωής εγκαταστάσεων: 30 χρόνια
- Ηλεκτρικό κόστος: \$0.05/m<sup>3</sup>
- Μέση λανθάνουσα θερμότητα ατμού: 2200 kJ/kg
- Θερμικό κόστος ατμού: \$1.466/MkJ
- Συντελεστής απόδοσης της πολυβάθμιας εξάτμισης και πολυβάθμιας εκτόνωσης: 8 kg προϊόντος/kg ατμού
- Ειδικό κόστος εργασίας: \$0.1/m<sup>3</sup>
- Ποσοστό τόκων: 5%
- Διαθεσιμότητα εγκαταστάσεων: 0.9

Στους πίνακες 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 παρουσιάζονται τα ετήσια στοιχεία κόστους των τεσσάρων διαδικασιών αφαλάτωσης για αυτά τα δεδομένα

	<b>\$/έτος</b>	<b>\$/m<sup>3</sup></b>	<b>\$/ (m<sup>3</sup>/d)</b>
Πάγια τέλη	4.163.292	0.387	127.2
Ατμός	4.334.723	0.4036	132.4
Ηλεκτρική Ενέργεια	2.688.033	0.05	82.1
Χημικά	268.803	0.025	8.21
Λειτουργικά Εργασίας	1075213,35	0.1	32.85
Σύνολο	12530064.53	1.165	383

*Πίνακας 3.6: Συνοπτική παρουσίαση των ετήσιων στοιχείων κόστους της πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) [1]*

	<b>\$/έτος</b>	<b>\$/m<sup>3</sup></b>	<b>\$/ (m<sup>3</sup>/d)</b>
Πάγια τέλη	1.301.029	0.330	108.4
Ατμός	1.589.217	0.403	132.4
Ηλεκτρική Ενέργεια	985.500	0.250	82.1
Χημικά	98.550	0.025	8.2
Λειτουργικά Εργασίας	394200	0.100	32.9
Σύνολο	4368496	1.108	364.0

*Πίνακας 3.7: Συνοπτική παρουσίαση των ετήσιων στοιχείων κόστους της πολυβάθμιας εξάτμισης (MED) [1]*

	<b>\$/έτος</b>	<b>\$/m<sup>3</sup></b>	<b>\$/ (m<sup>3</sup>/d)</b>
Πάγια τέλη	26,02	0.026	8.7
Ηλεκτρική Ενέργεια	34,4925	0.35	115
Χημικά	24,638	0.025	8.2
Λειτουργικά Εργασίας	98,55	0.1	33
Σύνολο	494,133	0.501	165

*Πίνακας 3.8: Συνοπτική παρουσίαση των ετήσιων στοιχείων κόστους της διαδικασίας της μηχανικής συμπίεσης ατμών (MVC) [1]*

	<b>\$/έτος</b>	<b>\$/m<sup>3</sup></b>	<b>\$(m<sup>3</sup>/d)</b>
Πάγια τέλη	6,375,041	0.205	67.4
Ηλεκτρική Ενέργεια	6,216,863	0.200	65.7
Χημικά	1,039,129	0.033	11.0
Αντικατάσταση μεμβράνης	5,880,000	0.189	62.1
Λειτουργικά Εργασίας	1,554,216	0.050	16.4
Σύνολο	21,065,248	0.678	222.6

*Πίνακας 3.9: Συνοπτική παρουσίαση των ετήσιων στοιχείων κόστους της αντίστροφης όσμωσης (RO) [1]*

### **3.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Οι εκτιμήσεις των οικονομικών θεμάτων για τη θερμική αφαλάτωση και την αφαλάτωση με μεμβράνη γίνονται με βάση τα δεδομένα που υπάρχουν για το συγκεκριμένο πεδίο και τις μελέτες σχεδιασμού. Η ανάλυση παρουσιάζεται για σημαντικότερες διαδικασίες αφαλάτωσης, δηλαδή τις MSF, MED, MVC, and RO. Τα συμπεράσματα είναι τα εξής:

- Αύξηση της χωρητικότητας της μονάδας, αν και αυξάνει το κόστος του κεφαλαίου, έχει μια ουσιαστική επίδραση στο κόστος ανά μονάδα προϊόντος. Αυτό φαίνεται σε πολλά παραδείγματα για τις διάφορες διαδικασίες αφαλάτωσης.
- Μια καλή εκτίμηση του κόστους ανά μονάδα προϊόντος για την διαδικασία αντίστροφης όσμωσης θα βοηθήσει τη διαχείριση των πάγιων τελών ,της δύναμης, και της αντικατάστασης μεμβράνης. Μια επιθεώρηση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων δείχνουν δραστική μείωση των χημικών και του κόστους εργασίας.
- Κάθε ένα από τα πάγια τέλη και το κόστος ενέργειας στις διαδικασίες MSF και MED αντιπροσωπεύουν το 40-50% του συνολικού κόστους ανά μονάδα προϊόντος.
- Σήμερα, οι διαδικασίες αντίστροφης όσμωσης αντιπροσωπεύουν την καλύτερη δυνατή επιλογή για την αφαλάτωση του νερού με χαμηλή αλατότητα. Αυτό ισχύει ανεξάρτητα με τη χωρητικότητα της μονάδας. Το καλύτερο παράδειγμα είναι μια

μονάδα αντίστροφης όσμωσης στη Φλόριντα με χωρητικότητα 94.625 m<sup>3</sup>/d και η αλατότητα του τροφοδοτικού νερού λιγότερο από 30.000 ppm.

- Η βέλτιστη επιλογή για την αφαλάτωση νερού με μεγαλύτερη αλατότητα εξαρτάται από τη απαιτούμενη χωρητικότητα, όπου η διαδικασία MSF θα είναι βέλτιστη για χωρητικότητες πάνω από 25.000 m<sup>3</sup>/d, η MED διαδικασία για χωρητικότητες κατά μέσο όρο 10.000 m<sup>3</sup>/d, και η MED διαδικασία για χωρητικότητες κατά μέσο όρο 3000 m<sup>3</sup>/d.



## **4.ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΠΕ)**

### **4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ορίζονται οι ενεργειακές πηγές, οι οποίες υπάρχουν εν αφθονία στο φυσικό μας περιβάλλον. Είναι η πρώτη μορφή ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος πριν στραφεί έντονα στη χρήση του άνθρακα και των υδρογονανθράκων. Οι πιο σημαντικές μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι οι εξής:

1. Ηλιακή ενέργεια
2. Αιολική ενέργεια
3. Φωτοβολταϊκά (Φ/Β)
4. Γεωθερμία

Τα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ είναι τα εξής:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από τους εξαντλήσιμους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο
- Είναι γεωγραφικά διεσπαρμένες και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, δίνοντας τη δυνατότητα να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες μεταφοράς ενέργειας.
- Δίνουν τη δυνατότητα επιλογής της κατάλληλης μορφής ενέργειας που είναι προσαρμοσμένη στις ανάγκες του χρήστη (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών έως αιολική ενέργεια για

ηλεκτροπαραγωγή) , επιτυγχάνοντας ορθολογικότερη χρησιμοποίηση των ενεργειακών πόρων.

- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος, το οποίο επιπλέον δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ είναι εντάσεως εργασίας, δημιουργώντας πολλές θέσεις εργασίας ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό.

Θα γίνει μια εκτενής περιγραφή της αιολικής ενέργειας και των φωτοβολταϊκών λόγω του ότι η διάταξη που θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο περιλαμβάνει αυτές τις δυο ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

## **4.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ (Φ/Β)**

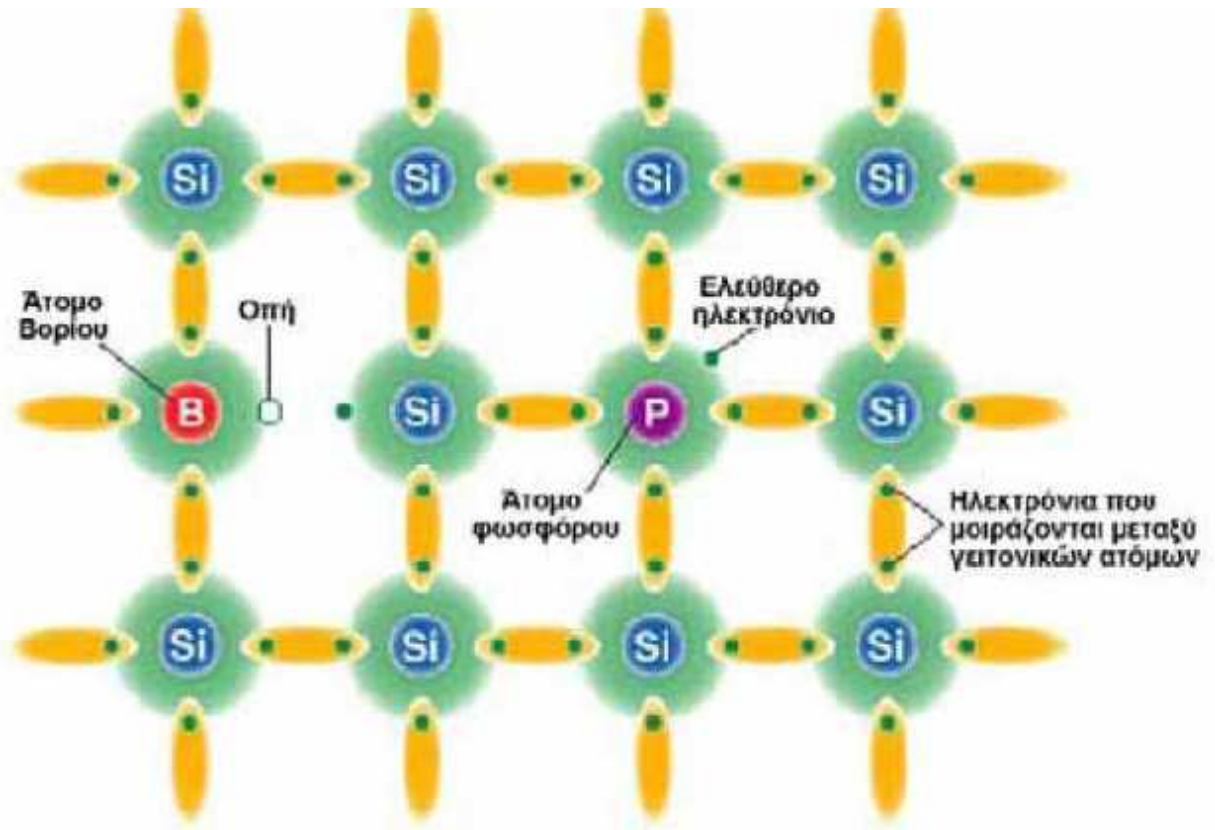
### **4.2.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**

Οι ηλιακές κυψέλες, κοινώς τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, είναι «συσκευές» που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια άμεσα σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Μια φωτοβολταϊκή κυψέλη αποτελείται από συνδυασμό δυο λεπτών στρωμάτων από διαφορετικούς ημιαγωγούς, γνωστούς ως p-type ημιαγωγός και n-type ημιαγωγός. Οι κυριότεροι ημιαγωγοί είναι τετρασθενή στοιχεία, όπως το πυρίτιο και το γερμάνιο ή χημικές ενώσεις όπως το αρσενιούχο γάλλιο και το θειούχο κάδμιο. Για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών κυψελών χρησιμοποιείται το πυρίτιο (αν και είναι δυνατή και η κατασκευή και από άλλα υλικά). Ο κρύσταλλος του πυριτίου έχει κυβική δομή (εδώ για απλοποίηση θα θεωρήσουμε τα άτομα σε ένα επίπεδο). Το πυρίτιο ανήκει στην Ομάδα IV του περιοδικού πίνακα, δηλαδή κάθε άτομο έχει τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους. Κάθε άτομο συγκρατείται στο κρυσταλλικό πλέγμα με αμοιβαία συνεισφορά δύο ηλεκτρονίων και με άλλα τέσσερα άτομα πυριτίου σε ίσες αποστάσεις. Επομένως όλα τα ηλεκτρόνια σθένους είναι απασχολημένα στους δεσμούς, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν ελεύθεροι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος και το σώμα να μην διαθέτει ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Γενικά τα ηλεκτρόνια που μπορούν να λάβουν μέρος στο σχηματισμό ενώσεων βρίσκονται στη ζώνη σθένους. Είναι δυνατόν υπό κατάλληλες συνθήκες (με τη δράση κάποιας ενέργειας), κάποια ηλεκτρόνια να αποκτήσουν ικανή ενέργεια για να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας οπότε το υλικό μετατρέπεται σε αγωγό του ηλεκτρισμού. Στην περίπτωση των ατόμων πυριτίου, που μας ενδιαφέρει, η απαιτούμενη ενέργεια ώστε ένα ηλεκτρόνιο να μεταπηδήσει στη ζώνη αγωγιμότητας επιτυγχάνεται με τη δράση θερμότητας ή φωτονίων.

Όταν το ηλεκτρόνιο μεταπηδήσει στη ζώνη αγωγιμότητας, κινείται ελεύθερα άγοντας το ηλεκτρικό του φορτίο έχοντας όμως αφήσει πίσω του μια οπή, δηλαδή μια περιοχή όπου υπάρχει θετικό φορτίο. Για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών κυψελών χρησιμοποιούνται ημιαγωγοί τύπου n-type και p-type. Οι n-type ημιαγωγοί έχουν αρνητικό φορτίο και για αυτό οι ημιαγωγοί αυτοί ονομάζονται n(negative)-type. Ενώ κατασκευάζονται από κρυσταλλικό πυρίτιο με ελάχιστες ποσότητες προσμίξεων (συνήθως φωσφόρου) έτσι ώστε να υπάρχει περίσσεια ελευθέρων ηλεκτρονίων. Οι p-type ημιαγωγοί κατασκευάζονται και αυτοί από κρυσταλλικό πυρίτιο στο οποίο όμως εισάγονται διαφορετικού τύπου προσμίξεις (συνήθως βόριο) οπότε το υλικό παρουσιάζει έλλειμμα ελευθέρων ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια που “λείπουν” ονομάζονται οπές. Η έλλειψη των αρνητικά φορτισμένων ηλεκτρονίων μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμη με την ύπαρξη θετικού φορτίου και για αυτό οι ημιαγωγοί του τύπου αυτού ονομάζονται p(positive)-type . Στο παρακάτω εικόνα φαίνεται το κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με άτομα προσμίξεων ( άτομα βόριο και φωσφόρου).

Το υλικό που χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία των Φ/Β κυψελίδων, είναι το Πυρίτιο (Si). Το πυρίτιο είναι ένας ημιαγωγός με έμμεσο ενεργειακό διάκενο 1,1 eV. Αν και οι δύο αυτές ιδιότητες (έμμεσο και σχετικά μικρή τιμή διακένου) δεν είναι ιδεώδεις για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, το πυρίτιο είναι ο ημιαγωγός που κυριάρχησε από την αρχή αλλά μέχρι και σήμερα, σαν υλικό κατασκευής των ηλιακών στοιχείων. Η αιτία είναι ίσως ότι το πυρίτιο έχει ήδη πλούσιο παρελθόν 3-4 δεκαετιών σαν το κύριο υλικό των διατάξεων των ημιαγωγών της ηλεκτρονικής. Επομένως οι ιδιότητες του είναι καλά μελετημένες και το υλικό κυκλοφορεί στην αγορά σε αρκετά μεγάλες ποσότητες, με ικανοποιητική καθαρότητα και τελειότητα κρυσταλλικής δομής, με τη χρησιμοποίηση τεχνολογικών μεθόδων δοκιμασμένων με επιτυχία.

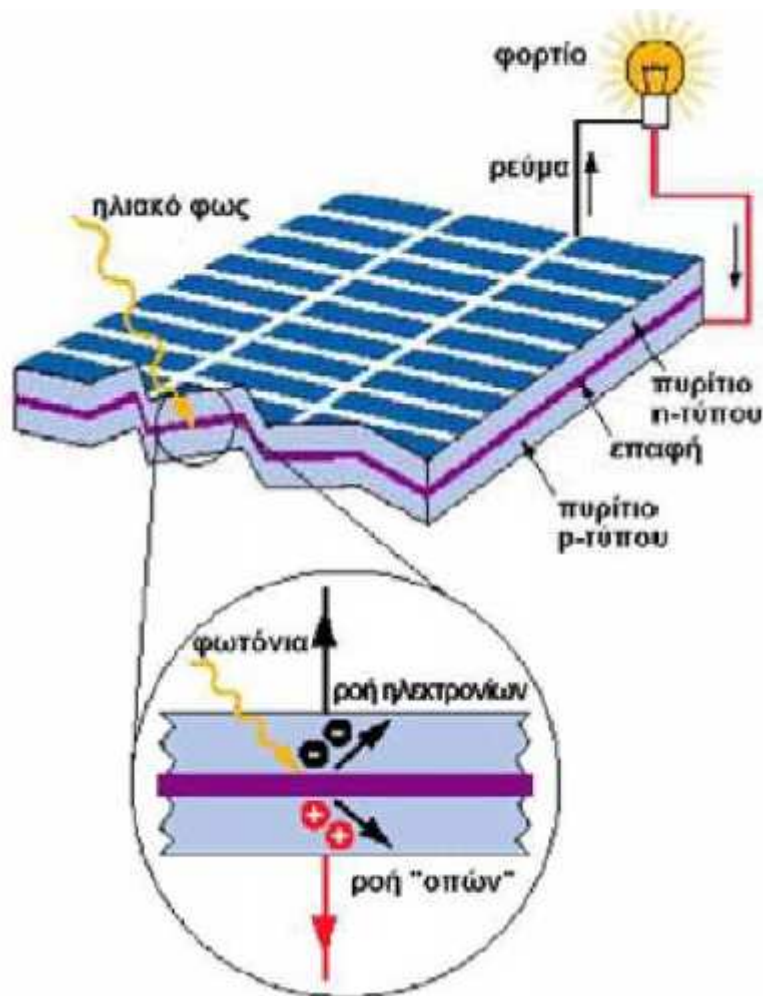


*Εικόνα 4.1 : Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με άτομα πρόσμιξης [15]*

#### 4.2.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ

Όπως αναφέρθηκε τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι με τη μορφή ενός δίσκου (δηλαδή η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου), που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενεργεία ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Έτσι, δημιουργείται όσο διαρκεί η ακτινοβολία μια περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανααυθενθούν με φορείς αντίθετου προσήμου), μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωση p-n οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού της πεδίου. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται

προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Συνεπώς, αν κατασκευαστεί ένα κύκλωμα όπως αυτό του σχήματος είναι δυνατόν να παραχθεί ηλεκτρική ισχύς από τις κυψέλες αφού τα ελεύθερα ηλεκτρόνια πρέπει να διέλθουν μέσω του φορτίου για τον επανασυνδυασμό τους με τις θετικές οπές.



Εικόνα 4.2 : Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο σε μια ηλιακή κυψέλη [23]

Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων

παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

Το υλικό που χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία των Φ/Β στοιχείων, είναι το Πυρίτιο (Si). Το πυρίτιο είναι ένας ημιαγωγός με έμμεσο ενεργειακό διάκενο 1,1 eV. Αν και οι δύο αυτές ιδιότητες (έμμεσο και σχετικά μικρή τιμή διακένου) δεν είναι ιδεώδεις για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, το πυρίτιο είναι ο ημιαγωγός που κυριάρχησε από την αρχή αλλά μέχρι και σήμερα, σαν υλικό κατασκευής των ηλιακών στοιχείων. Η αιτία είναι ίσως ότι το πυρίτιο έχει ήδη πλούσιο παρελθόν 3-4 δεκαετιών σαν το κύριο υλικό των διατάξεων των ημιαγωγών της ηλεκτρονικής. Επομένως οι ιδιότητες του είναι καλά μελετημένες και το υλικό κυκλοφορεί στην αγορά σε αρκετά μεγάλες ποσότητες, με ικανοποιητική καθαρότητα και τελειότητα κρυσταλλικής δομής, με τη χρησιμοποίηση τεχνολογικών μεθόδων δοκιμασμένων με επιτυχία.

Τα Φ/Β στοιχεία πυριτίου διακρίνονται ανάλογα με τη δομή του βασικού υλικού ή τον τρόπο παρασκευής. Οι διαφορετικοί τύποι είναι οι εξής:

- Φ/Β στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (m-Si)

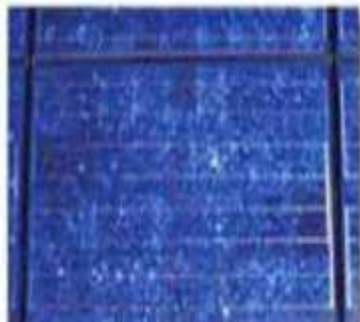
Το βασικό υλικό είναι μονοκρυσταλλικό. Το πάχος του υλικού είναι σχετικά μεγάλο (300μm). Η απόδοση τους, με τη μορφή της κυψελίδας, κυμαίνεται από 21% έως 24%, ενώ με τη μορφή των Φ/Β 13% έως 16%. Χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος κατασκευής.



Εικόνα 4.3: Κυψέλη μονοκρυσταλλικού πυριτίου [23]

- Φ/Β στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (p-Si)

Δυνατότητα κατασκευής μεγάλων επιφανειών. Συνήθως κόβονται σε τετραγωνικής μορφής στοιχεία. Αποτελούνται από λεπτά στρώματα, πάχους 10 έως 50  $\mu\text{m}$ . Στην επιφάνεια της κυψέλης, διακρίνονται οι διαφορετικές μονοκρυσταλλικές περιοχές. Τα όρια τους αποτελούν θέσεις παγίδευσης των φορέων. Άρα, όσο μικρότερο το συνολικό μήκος των οριακών περιοχών μέσα στο δεδομένης διάστασης Φ/Β στοιχείο, τόσο καλύτερη η ηλεκτρική αγωγιμότητα τους. Γενικά, όσο μεγαλύτερες οι διαστάσεις των μονοκρυσταλλικών περιοχών του πολυκρυσταλλικού Φ/Β στοιχείου, τόσο υψηλότερη η απόδοση τους, η οποία κυμαίνεται από 17% έως 20 %, σε εργαστηριακή μορφή κυψελίδας και από 10% έως 14% σε βιομηχανική μορφή Φ/Β πλαισίου. Το κόστος κατασκευής τους είναι χαμηλότερο σε σχέση με το αντίστοιχο του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο με τη δημιουργία λεπτής ταινίας από τηγμένο υλικό κατασκευάζεται και ένας άλλος τύπος Φ/Β στοιχείων, τα Φ/Β στοιχεία-ταινία (Ribbon Silicon ) που έχουν απόδοση περί το 13%. Η μέθοδος αυτή είναι υψηλού κόστους, και προς το παρόν, έχει περιορισμένη βιομηχανική παραγωγή.



Εικόνα 4.4: Κυψέλη πολυκρυσταλλικού πυριτίου [23]

- Φ/Β στοιχεία άμορφου πυριτίου

Τεχνολογία λεπτών επιστρώσεων ή υμενίων (thin films), θεωρητικά πολύ χαμηλού κόστους παραγωγής, εξαιτίας της μικρής χρησιμοποιούμενης μάζας υλικού. Το λεπτό επίστρωμα σχηματίζεται πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους. Η απόδοση των Φ/Β στοιχείων αυτών μειώνεται έντονα, στα αρχικά στάδια φωτισμού τους, στα επίπεδα 6-8 %. Σήμερα η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την παρασκευή σύνθετων Φ/Β στοιχείων, με διαδοχικές ενώσεις δύο ή τριών στρωμάτων με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα, με σκοπό την αύξηση του αξιοποιήσιμου τμήματος του ηλιακού φάσματος. Έτσι, είναι δυνατή η κατασκευή ποικίλων σχημάτων εφαρμογών από πολύ μικρό μέγεθος (υπολογιστές αριθμητικών πράξεων) μέχρι μεγάλων διαστάσεων (πλαίσια σταθερού ή ευκάμπτου σχήματος).



*Εικόνα 4.5: Κυψέλη άμορφου πυριτίου [23]*

- Φ/Β στοιχεία υβριδικά

Ως υβριδικό ορίζουμε ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί τουλάχιστον δυο διαφορετικές πηγές ενέργειας. Τα υβριδικά συνδυάζουν τις τεχνολογίες των άμορφων και των μονοκρυσταλλικών, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα και των δύο τεχνολογιών. Εφόσον συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα και των δυο παρατηρούμε μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης ανά απαιτούμενη επιφάνεια. Στον αντίποδα όμως



το κόστος κατασκευής τους είναι αρκετά ακριβότερο και από τα Φ/Β στοιχεία άμορφου πυριτίου αλλά και φυσικά από τα Φ/Β στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου.

#### 4.2.3 Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΚΑΙ Φ/Β ΣΥΣΤΟΙΧΙΕΣ

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα ώστε να δίνουν την επιθυμητή τάση εξόδου, διαμορφώνουν Φ/Β πλαίσια. Τα Φ/Β πλαίσια είναι η δομική μονάδα που κατασκευάζεται βιομηχανικά και κυκλοφορεί στο εμπόριο για να χρησιμοποιηθεί ως συλλέκτης στη συγκρότηση των Φ/Β γεννητριών. Λόγω των απαιτούμενων υλικών και εργασιών για την κατασκευή του, το κόστος των Φ/Β πλαισίων είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το κόστος των ηλιακών στοιχείων που περιέχουν. Για την αύξηση της αξιοπιστίας ενός Φ/Β συστήματος είναι σκόπιμο οι συνδέσεις των Φ/Β στοιχείων μέσα στα πλαίσια να μην είναι μόνο στη σειρά αλλά και παράλληλες. Έτσι, αν ένα Φ/Β στοιχείο σκιαστεί (π.χ. από τις ακαθαρσίες που μπορεί να αφήσει ένα πουλί) ή αν πάθει βλάβη δε θα μηδενιστεί η ισχύς που παράγει το σύστημα, όπως αν συνέβαινε αν όλα τα Φ/Β στοιχεία ήταν σε σύνδεση στη σειρά.

Τέλος, πολλά Φ/Β πλαίσια σχηματίζουν τις Φ/Β συστοιχίες. Στις συστοιχίες ο εγκαταστάτης μπορεί να ενώσει τα πλαίσια σε σειρά ή παράλληλα ανάλογα την τάση και την ένταση του ρεύματος που επιθυμεί για το σύστημα του.



Εικόνα 4.6: Φωτοβολταϊκές συστοιχίες [26]

### 4.3 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Η αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού πραγματοποιείται με τη βοήθεια των ανεμογεννητριών. Έτσι λοιπόν η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανικό έργο μέσω μιας αεροδυναμικής διάταξης. Αυτό το μηχανικό έργο δύναται να είναι εκμεταλλεύσιμο τοπικά. Στη γενικότερη όμως περίπτωση απαιτείται η μετατροπή του σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας, είτε διότι δε χρειάζεται αποκλειστικά μηχανικό έργο είτε διότι ο τόπος της κατανάλωσης δε συμπίπτει με την περιοχή όπου είναι εγκατεστημένος ο ανεμοκινητήρας, δηλαδή απαιτείται η μεταφορά της δεσμευόμενης αιολικής ενέργειας. Η πιο διαδεδομένη μορφή ενέργειας στην οποία μετατρέπεται το μηχανικό έργο είναι η ηλεκτρική. Εντούτοις, επιστημονικές έρευνες έχουν στραφεί προς την αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού για την παραγωγή υδρογόνου με τη μέθοδο της ηλεκτρόλυσης το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αέριο καύσιμο αναδεικνύοντας μία οικολογικά αποδεκτή λύση δεδομένου ότι η καύση του υδρογόνου παράγει ως καυσαέριο νερό σε αέρια μορφή (υδρατμούς).

#### 4.3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Η ισχύς που αποδίδεται από μία ανεμογεννήτρια παρέχεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P_{Α/Γ} = \frac{1}{2} C_p * \rho * U^3 * A \quad (4.1)$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του αέρα που πνέει με ταχύτητα  $U$  και διέρχεται από επιφάνεια εμβαδού  $A$ . Από την παραπάνω σχέση ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συντελεστής  $C_p$  ο οποίος ονομάζεται συντελεστής ισχύος, εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας και είναι συνάρτηση της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου  $\lambda$ . Η ταχύτητα ακροπτερυγίου ορίζεται από τη σχέση

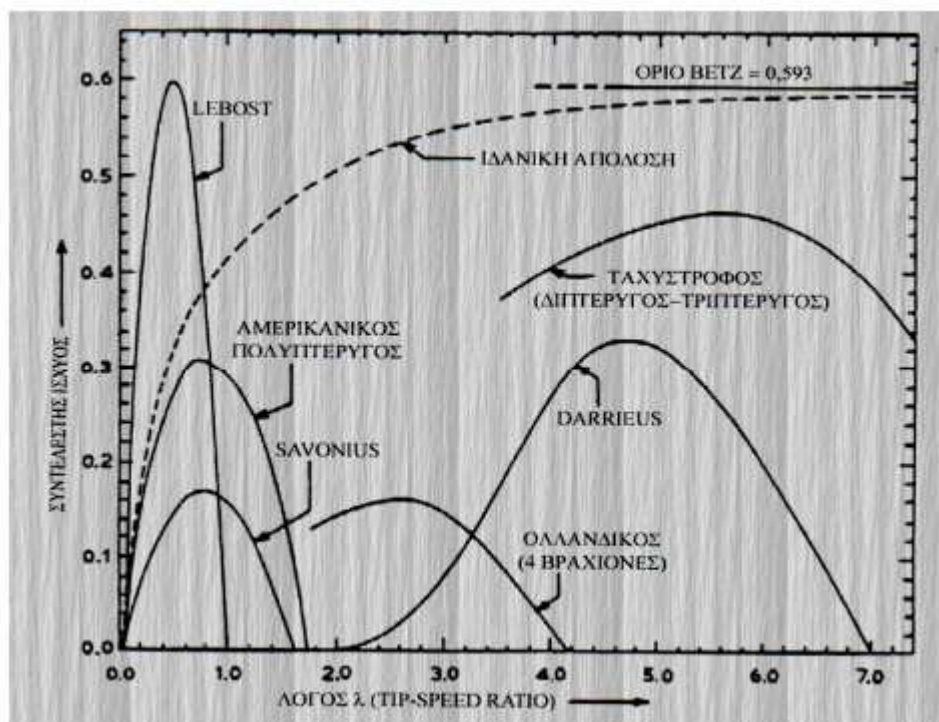
$$\lambda = \frac{\omega * R}{U} \quad (4.2)$$

όπου  $\omega$  είναι η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα (ο φέρων πτερύγια) και  $R$  η ακτίνα του. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει ο συντελεστής ισχύος είναι

$$C_{p,max} = \frac{16}{27} = 59\% \quad \text{και ονομάζεται όριο του Betz. Αυτό σημαίνει ότι ο βέλτιστος}$$

δρομέας κάτω από δανικές συνθήκες λειτουργίας δύναται να δεσμεύει μόνο 59% της

ισχύος του ανέμου. Το όριο αυτό αποτελεί μέγιστος βαθμός απόδοσης για ιδανική έλικα. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μεταβολές του συντελεστή ισχύος για διάφορους τύπους ανεμογεννητριών συναρτήσει της ταχύτητας ακροπτερυγίου.



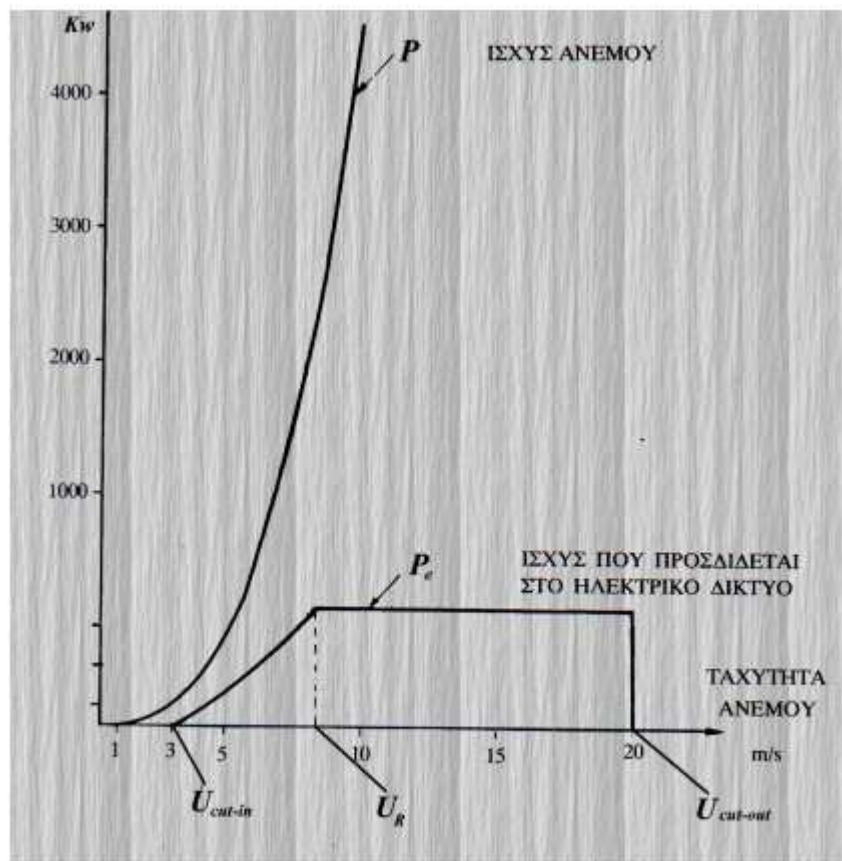
Εικόνα 4.7: Συντελεστής ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας ακροπτερυγίου [16]

Μία ανεμογεννήτρια χαρακτηρίζεται από τρεις τιμές ταχύτητας του ανέμου:

- Την ταχύτητα  $U_{cut-in}$  η οποία ονομάζεται ταχύτητα έναρξης λειτουργίας δηλαδή η ταχύτητα στην οποία η ανεμογεννήτρια αρχίζει να περιστρέφεται.
- Την ταχύτητα  $U_R$  που αποτελεί τη μικρότερη ταχύτητα στην οποία ο δρομέας αναπτύσσει την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας και ονομάζεται ονομαστική ταχύτητα ανέμου.

- Την ταχύτητα  $U_{cut-out}$  η οποία καλείται ταχύτητα διακοπής λειτουργίας για την οποία λαμβάνει χώρα διακοπή της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας κυρίως για λόγους ασφαλείας.

Τα ανωτέρω συνοψίζονται στο σχήμα που ακολουθεί όπου παρατίθενται η καμπύλη ισχύος του ανέμου καθώς και μίας τυπικής ανεμογεννήτριας. Με βάση το σχήμα αυτό αλλά και την εξαγόμενη κατανομή Weibull είναι δυνατόν να υπολογιστεί το ποσό της ενέργειας που παράγεται από μία ανεμογεννήτρια. Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι το ποσό αυτό είναι διάφορο της ποσότητας  $E_R = 8760 * P_R$  , όπου  $P_R$  είναι η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας, δεδομένου ότι η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει έντονη διακύμανση στο χρόνο.



Εικόνα 4.7: Καμπύλη ισχύος ανέμου και ανεμογεννήτριας [16]

Για να υπολογιστεί η πραγματικά αποδιδόμενη ετήσια ενέργεια θα πρέπει να υπολογιστεί η μέση τιμή της ισχύος  $\overline{P_g}$  :

$$\begin{aligned} \overline{P_g} &= \int_0^{\infty} \frac{1}{2} * C_p * \rho * U^3 * A * P(U) * \partial U = \\ & \int_{U_{cut-in}}^{U_g} \frac{1}{2} * C_p * \rho * U^3 * A * P(U) * \partial U + \int_{U_g}^{U_{cut-out}} \frac{1}{2} C_p * \rho * U^3 * A * P(U) * \partial U = \\ & \int_{U_{cut-in}}^{U_R} \frac{1}{2} * C_p * \rho * U^3 * A * P(U) * \partial U + P_R * [P(U \leq U_{cut-out}) - P(U \leq U_R)] \end{aligned}$$

(4.3)

Επομένως, η ενέργεια που αποδίδεται από την ανεμογεννήτρια δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E_g = 8760 * \overline{P_g} \quad (4.4)$$

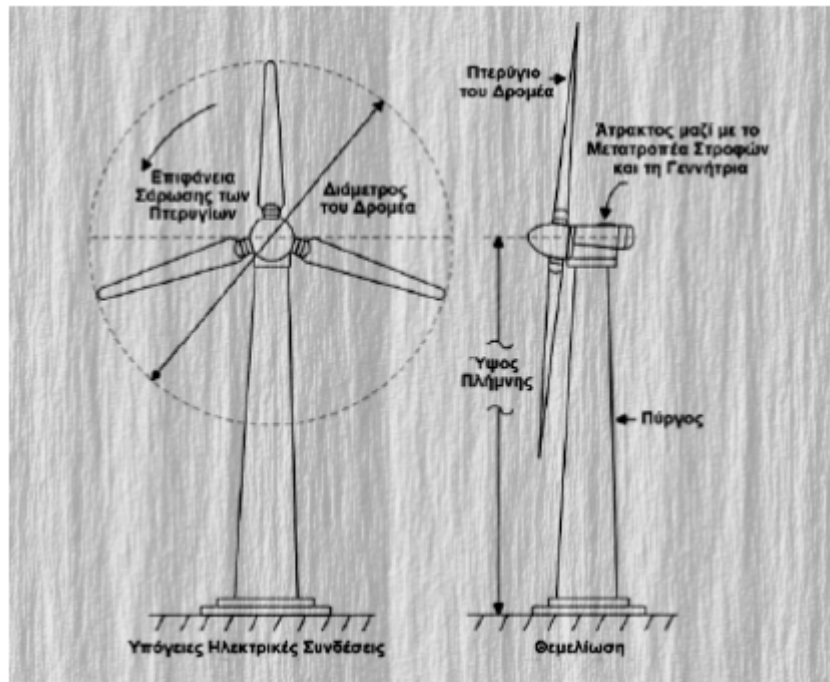
### 4.3.2 ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Δυο κατηγορίες στις οποίες ταξινομούνται οι ανεμογεννήτριες είναι οι αιολικές μηχανές οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα. Από τις δύο αυτές κατηγορίες ιδιαίτερη αναφορά θα γίνει στους ανεμοκινητήρες οριζόντιου άξονα.

#### 4.3.2.1 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ

Τα κύρια μέρη μίας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα είναι ο δρομέας, το σύστημα μεταβολής στροφών και μετάδοσης ισχύος (κιβώτιο ταχυτήτων), το σύστημα πέδησης, τα έδρανα του άξονα, οι ελαστικοί σύνδεσμοι, η ηλεκτρική γεννήτρια, το σύστημα προσανατολισμού, ο πύργος στήριξης και η θεμελίωση. Στην εικόνα 4.8 παρατίθεται η σχηματική διάταξη μίας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.

Ο δρομέας είναι ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία στη σχεδίαση του αιολικού συστήματος και αποτελείται από την πλήμνη και τα πτερύγια. Το πτερύγιο έχει αεροδυναμικό σχήμα και μπορεί να είναι ενιαίο ή να διαθέτει ακροπτερύγιο. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων (αριθμός πτερυγίων, κατανομή πλάτους, επιλογή αεροτομής, συστροφή) προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής σχεδίασης. Η πλήμνη παραλαμβάνει τα φορτία και τις ροπές και είναι συνδεδεμένη με άξονα χαμηλής ταχύτητας. Το κιβώτιο ταχυτήτων παραλαμβάνει την κινητική ενέργεια από την άτρακτο χαμηλής ταχύτητας και την μεταφέρει στην άτρακτο υψηλής ταχύτητας με ένα λόγο μετάδοσης 50:1. Η ηλεκτρική γεννήτρια μπορεί να είναι σύγχρονη ή ασύγχρονη γεννήτρια, προτιμώνται όμως οι ασύγχρονες λόγω της απλότητας κατασκευής τους ενώ οι σύγχρονες έχουν καλύτερη συμπεριφορά στα αδύναμα δίκτυα. Το σύστημα προσανατολισμού είναι ένας σερβοκινητήρας ο οποίος ελέγχεται από τον ανεμοδείκτη του ανεμογράφου και αναγκάζει το δρομέα να παρακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου και να παραμένει κάθετος σε αυτήν. Επιπλέον το ανεμόμετρο ενεργοποιεί και απενεργοποιεί την ανεμογεννήτρια για τις διάφορες ταχύτητες ανέμου. Ο πύργος της ανεμογεννήτριας στηρίζει το θάλαμο της ανεμογεννήτριας και το δρομέα. Μπορεί να είναι τύπου δικτυώματος, σωληνωτός και σπανιότερα κατασκευασμένος από σκυρόδεμα. Η θεμελίωση γίνεται με οπλισμένο σκυρόδεμα πάνω στο οποίο τοποθετούνται οι κοχλίες του πύργου. Ο πύργος έχει σχήμα κώνου που εξυπηρετεί την αύξηση της αντοχής και την εξοικονόμηση υλικών με τη διάμετρο να αυξάνεται προς την πλευρά της βάσης. Μεγάλη σημασία έχει η γείωση που πρέπει να έχει η μεταλλική κατασκευή της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 4.8: Σχηματική διάταξη ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα [16]

#### 4.3.2.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥ

Οι ανεμογεννήτριες με βάση την εγκατεστημένη ισχύ διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες

- Ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος <20KW
- Ανεμογεννήτριες μέσης ισχύος 20-250KW
- Ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος >250KW

Τα πλεονεκτήματα των μεγάλων και μικρών ανεμογεννητριών συνοψίζονται ακόλουθα:

(i) Πλεονεκτήματα μεγάλων ανεμογεννητριών

Υπάρχουν οικονομίες κλίμακας στις ανεμογεννήτριες δηλαδή οι μεγαλύτερες μηχανές είναι συνήθως ικανές να αποδώσουν την ηλεκτρική ενέργεια με χαμηλότερο

κόστος από τις μικρότερες μηχανές. Ο λόγος είναι ότι το κόστος των θεμελίων, του οδικού δικτύου, της ηλεκτρικής σύνδεσης πλέγματος και διαφόρων άλλων στοιχείων στο στρόβιλο (όπως το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου) είναι κάπως ανεξάρτητο από το μέγεθος της μηχανής.

Οι μεγαλύτερες μηχανές είναι ιδανικές για την παράκτια αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού. Το κόστος των θεμελίων δεν αυξάνεται αναλογικά προς το μέγεθος της μηχανής και οι δαπάνες συντήρησης είναι κατά ένα μεγάλο μέρος ανεξάρτητες από το μέγεθος της μηχανής.

Στις περιοχές όπου είναι δύσκολο να βρεθούν οι περιοχές για περισσότερες από μία ανεμογεννήτριες, ένας μεγάλος ανεμοκινητήρας είναι αποτελεσματικότερος.

(ii) Πλεονεκτήματα μικρών ανεμογεννητριών

Το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να είναι πάρα πολύ αδύνατο για να διαχειριστεί την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μία μεγάλη μηχανή. Το γεγονός αυτό συμβαίνει σε περιοχές με χαμηλή πυκνότητα πληθυσμών και μικρή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ένα αιολικό πάρκο (που αποτελείται από μικρές ανεμογεννήτριες) παρουσιάζει μικρότερη διακύμανση.

Το κόστος χρησιμοποίησης μεγάλων γερανοφόρων οχημάτων και της οικοδόμησης ενός δρόμου αρκετά ισχυρού για να φέρει τα τμήματα των ανεμογεννητριών μπορεί να καταστήσει τις μικρές ανεμογεννήτριες οικονομικότερες σε ορισμένες περιοχές. Σε ενδεχόμενο προσωρινής διακοπής λειτουργίας των ανεμοκινητήρων (λόγω ατμοσφαιρικής ηλεκτρικής εκκένωσης) οι επιπτώσεις είναι ασήμαντες σε σύγκριση με μία μεγάλη ανεμογεννήτρια.

Οι μεγάλες αιολικές μηχανές έχουν συνήθως χαμηλότερη περιστροφική ταχύτητα σε σύγκριση με τις μικρότερες μηχανές το οποίο σημαίνει ότι μια μεγάλη μηχανή δεν προσελκύει τόση προσοχή όση πολλές μικρές και γρήγορα κινούμενες μηχανές.





*Εικόνα 4.9: Αιολικό πάρκο στη θέση Κουτσουνοράχη στη Μήλο [5]*

## **5. ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

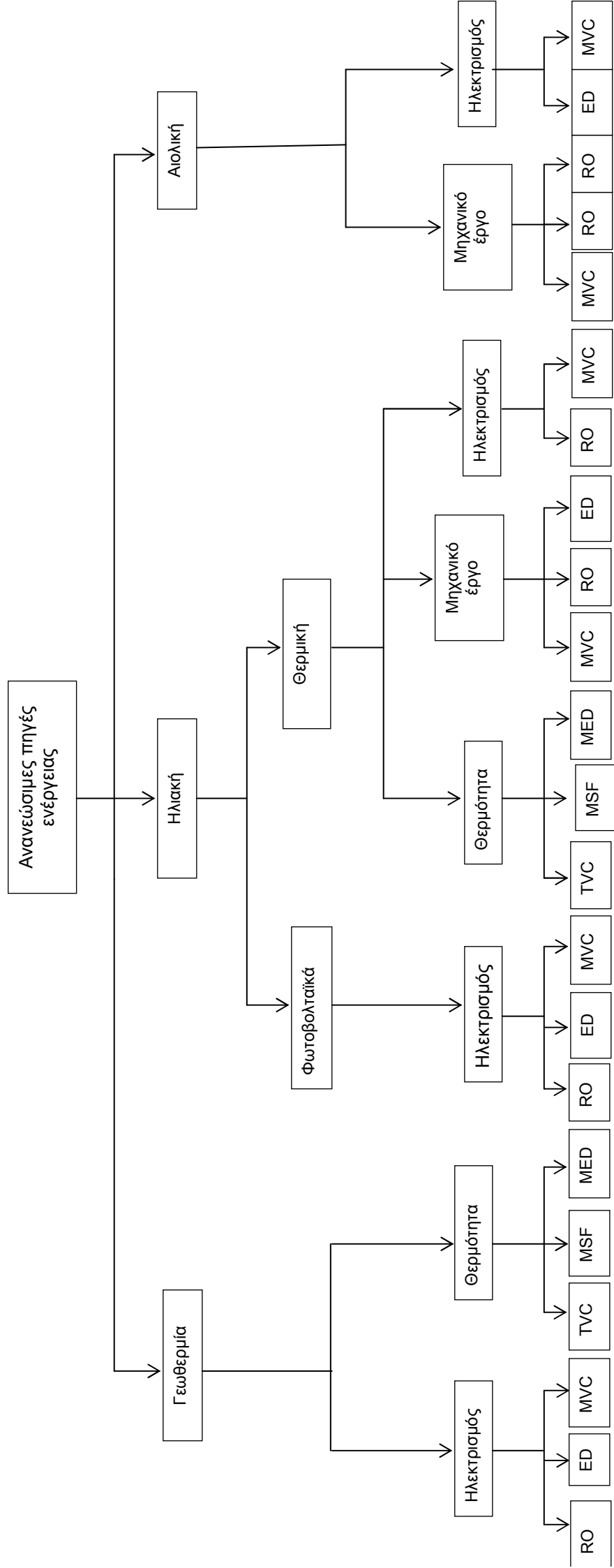
### **5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε διεργασίες αφαλάτωσης περιλαμβάνουν την αιολική ενέργεια, την ηλιακή θερμική ενέργεια, τα φωτοβολταϊκά και τη γεωθερμία. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με γνώμονα συστήματα αφαλάτωσης εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις διαδικασίες απόσταξης οι οποίες οδηγούνται από την θερμότητα που παράγεται από τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει διαδικασίες απόσταξης ή διαδικασίες με χρήση μεμβρανών, οι οποίες λειτουργούν με ηλεκτρική ή μηχανική ενέργεια που παράγεται από ΑΠΕ.

### **5.2 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Ο πιο διερευνηθείς τρόπος σύζευξης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και διαδικασιών αφαλάτωσης είναι η χρήση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή πόσιμου νερού με τη βοήθεια ηλιακών αποστακτήρων.

Πολλές προσπάθειες και πειράματα έχουν διεξαχθεί σε όλο τον κόσμο, σε μια προσπάθεια να βρεθούν οι κατάλληλες διαδικασίες σύζευξης μεταξύ των διαδικασιών αφαλάτωσης και των ΑΠΕ. Η καταλληλότητα μιας συγκεκριμένης ανανεώσιμης πηγής ενέργειας για την τροφοδότηση ορισμένων συστημάτων αφαλάτωσης εξαρτάται τόσο από τις απαιτήσεις των εν λόγω διαδικασιών όσο και από τη μορφή της ενέργειας που μπορεί να ληφθεί από την υπό εξέταση πηγή. Διαφορετικοί εφικτοί συνδυασμοί μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των τεχνολογιών αφαλάτωσης μπορούν να γίνουν. Η διασύνδεση μεταξύ των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και το σύστημα αφαλάτωσης επιτυγχάνεται στο σημείο όπου η ενέργεια που παράγεται από το σύστημα ΑΠΕ προωθείται στη μονάδα αφαλάτωσης. Αυτή η ενέργεια μπορεί να είναι σε διάφορες μορφές, όπως θερμική ενέργεια, ηλεκτρική ενέργεια ή μηχανική ενέργεια. Η Εικ. 5.1 δείχνει τους πιθανούς συνδυασμούς διαδικασιών αφαλάτωσης με ΑΠΕ.



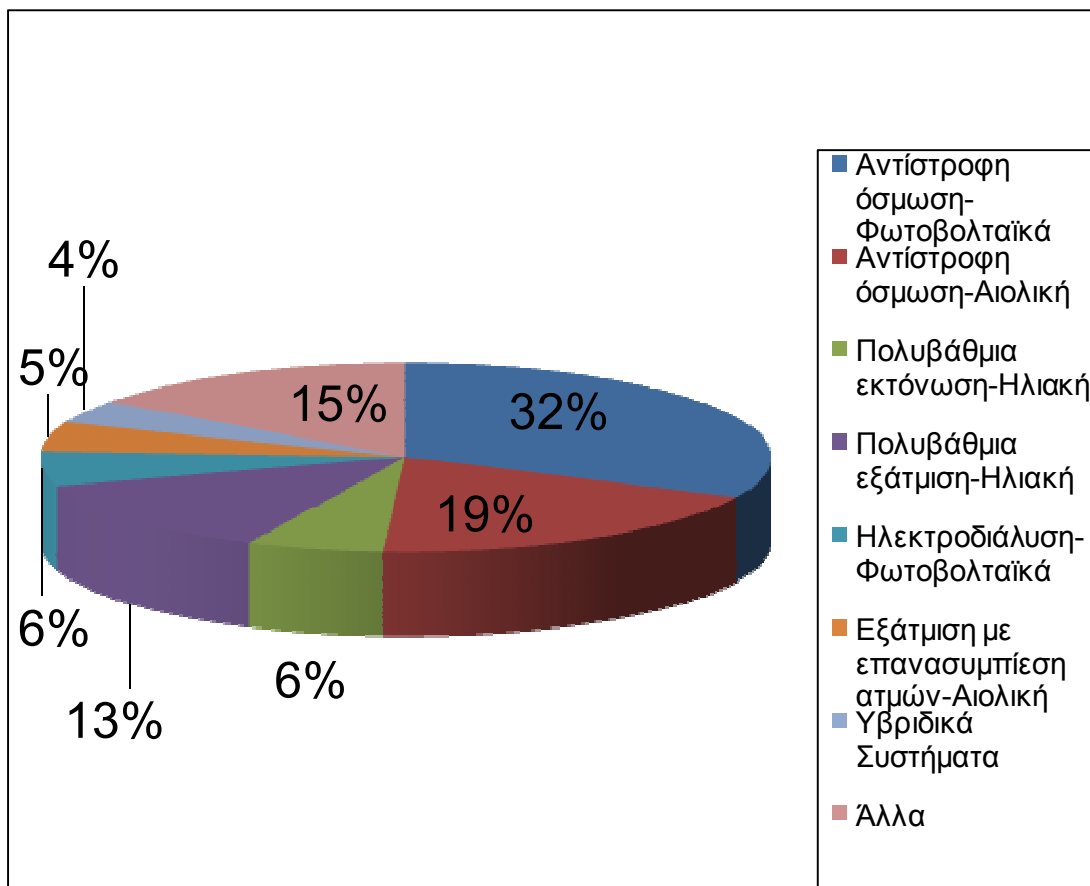
RO=αντίστροφη όσμωση, ED=ηλεκτροδιάλυση, MVC=μηχανική συμπίεση ατμών, TVC=θερμική συμπίεση ατμών, MSF=πολυβάθμια εκτόνωση, MED=πολυβάθμια εξάτμιση

Εικόνα 5.1: Συνδυασμός ΑΠΕ και διαδικασιών αφαλάτωσης [2]

Πρόσφατα, υπάρχει μια σημαντική αύξηση της αποδοτικότητας και μείωση του κόστους και πρόοδος στις συμβατικές εγκαταστάσεις αφαλάτωσης, που οδηγούνται από ατμό η ηλεκτρική ενέργεια.

Υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αφαλάτωσης που έχουν εντοπιστεί και ελέγχονται στο πλαίσιο της συνεχούς έρευνας για καινοτόμες διαδικασίες αφαλάτωσης. Λεπτομερείς εκτιμήσεις των διαθέσιμων και αξιοποιήσιμων υδάτινων πόρων και των αναγκών σε νερό έχουν πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο ερευνητικών προγραμμάτων, λαμβάνοντας υπόψη τρέχουσες και μελλοντικές τάσεις της οικονομικής ανάπτυξης και περιβαλλοντικούς και κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες. Επιπλέον, οι δυνατότητες της αγοράς για αφαλάτωση με ΑΠΕ σε συγκεκριμένες περιοχές έχουν εντοπιστεί, με βάση τη αξιολόγηση των προβλημάτων της λειψυδρίας και του δυναμικού των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με στόχο να προσδιοριστούν οικονομικά ανταγωνιστικές επιλογές για συστήματα που οδηγούνται από ΑΠΕ.

Δεδομένου ότι υπάρχουν πολλά κριτήρια που επηρεάζουν τον προσδιορισμό του βέλτιστου συνδυασμού των ΑΠΕ και τεχνολογιών αφαλάτωσης, υπάρχει ένα ευρύ φάσμα των υφιστάμενων εγκαταστάσεων αφαλάτωσης με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η Εικ. 5.2 δείχνει την κατανομή των τεχνολογιών αφαλάτωσης που τροφοδοτούνται με ΑΠΕ.



*Εικόνα 5.2:Κατανομή συστημάτων αφαλάτωσης οδηγούμενα με ΑΠΕ [2]*

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν την καλύτερη επιλογή για τον ενεργειακό εφοδιασμό αυτόνομων συστημάτων αφαλάτωσης, ιδίως στις άγονες και παράκτιες περιοχές όπου υπάρχει έλλειψη παροχής συμβατικής ενέργειας. Αυτάρκεια και τοπική υποστήριξη μπορεί να επιτευχθεί τόσο με τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όσο και των συστημάτων αφαλάτωσης. Οι καιρικές συνθήκες οδηγούν σε αξιοσημείωτη συμφωνία ,για ένα συγκεκριμένο χρόνο, μεταξύ της διαθεσιμότητας των ΑΠΕ, ειδικά όταν αφορά την ηλιακή ενέργεια, και την εκτεταμένη ζήτηση νερού. Η λειτουργία και η συντήρηση των ΑΠΕ σε απομακρυσμένες περιοχές είναι συχνά ευκολότερη από ό,τι της συμβατικής ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επιτρέπουν τη διαφοροποίηση των ενεργειακών πόρων και συμβάλουν στην αποφυγή της εξάρτησης του εξωτερικού ενεργειακού εφοδιασμού. Οι διεργασίες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού απαιτούν την έντονη κατανάλωση ενέργειας. Ως εκ τούτου, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων είναι σημαντικές. Αξίζει να σημειωθεί ότι η

συνολική παγκόσμια δυνατότητα για αφαλατωμένο νερό είναι περίπου  $23 * 10^6$  m<sup>3</sup>/d. Η μείωση του κόστους των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι σημαντική κατά την τελευταία δεκαετία. Ως εκ τούτου, οι μελλοντικές μειώσεις του κόστους αυτών των συστημάτων και η άνοδος των τιμών των ορυκτών καυσίμων θα μπορούσαν να καταστήσουν δυνατή την ανταγωνιστικότητα της αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού που οδηγείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Παρά τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία των συστημάτων αφαλάτωσης, τα τρέχουσα εγκατεστημένα συστήματα αφαλάτωσης με ΑΠΕ είναι λιγοστά και περιορίζονται περίπου στο 0,02% των συνολικών συστημάτων αφαλάτωσης . Οι λόγοι συχνά συσχετίζονται με θέματα όπως:

(i) Διαθεσιμότητα

Η γεωγραφική κατανομή του δυναμικού των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δε συμβαδίζει πάντα με τις τοπικές κοινότητες νερού.

(ii) Κόστη

Οι αρχικές δαπάνες κεφαλαίου και τα διάφορα στοιχεία του συστήματος εξακολουθούν να είναι ακριβά. Ακόμη και αν οι τιμές μειώνονται συνεχώς, παραμένουν σε πολλές περιπτώσεις απαγορευτικές για εμπορευματοποίηση.

(iii) Τεχνολογίες

Οι τεχνολογίες επιβάλλουν το συνδυασμό της μετατροπής της ενέργειας και των συστημάτων αφαλάτωσης. Μια πραγματική πρόκληση για τις τεχνολογίες αυτές θα είναι ο βέλτιστος τεχνολογικός σχεδιασμός συνδυαστικών μονάδων που αυξάνει την αποτελεσματικότητα την ποσότητα του παραγόμενου νερού και τη μείωση του κόστους.

(iv) Βιωσιμότητα

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι αναπτυσσόμενες τεχνολογίες δεν ταιριάζουν με το χαμηλό επίπεδο των υποδομών που συχνά χαρακτηρίζει θέσεις με σοβαρή έλλειψη νερού. Η εμπειρία έχει δείξει ότι πολλές προσπάθειες για την ενσωμάτωση προηγμένων λύσεων αφαλάτωσης σε απομονωμένες περιοχές απέτυχε λόγω της έλλειψης αξιόπιστων τεχνικών υποστήριξη . Η μετατροπή των ανανεώσιμων πηγών

ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ηλιακής, απαιτεί υψηλό κόστος επένδυσης και οι τεχνολογίες δεν είναι ακόμη αρκετά ανεπτυγμένες για να αξιοποιηθούν σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας.

### **5.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ**

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαδικασίες αφαλάτωσης και περιλαμβάνουν την αιολική, την ηλιακή θερμική ενέργεια, τα φωτοβολταϊκά και τη γεωθερμία. Ο συνδυασμός των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με μονάδες αφαλάτωσης, ωστόσο, απαιτεί μια σειρά από σημαντικούς παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν. Δεν είναι όλοι οι συνδυασμοί των συστημάτων αφαλάτωσης οδηγούμενοι από ΑΠΕ εφικτοί, δεδομένου ότι πολλοί από αυτούς τους πιθανούς συνδυασμούς μπορεί να είναι βιώσιμοι υπό ορισμένες συνθήκες. Ο βέλτιστος συνδυασμός της τεχνολογίας πρέπει να μελετηθεί σε συνάρτηση με διάφορες τοπικές παραμέτρους, όπως τις γεωγραφικές συνθήκες, την τοπογραφία της τοποθεσίας τις δυνατότητες και το είδος της ενέργειας που διατίθεται σε χαμηλό κόστος, τη διαθεσιμότητα των τοπικών υποδομών (συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρικών δικτύων), το μέγεθος της εγκατάστασης και την αλατότητα του τροφοδοτικού νερού.

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή διαδικασία της αφαλάτωσης που είναι κατάλληλη για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, όπως:

- (i) Η ποσότητα του γλυκού νερού που απαιτείται σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή σε συνδυασμό με το εύρος της δυνατότητας εφαρμογής των διαφόρων διαδικασιών αφαλάτωσης.
- (ii) Η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας.
- (iii) Η καταλληλότητα της διαδικασίας για εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας.
- (iv) Οι απαιτήσεις επεξεργασίας του θαλασσινού νερού.
- (v) Το κόστος κεφαλαίου του εξοπλισμού και των εισαγόμενων υλικών.
- (vi) Η έκταση γης που απαιτείται, ή που θα μπορούσε να γίνει διαθέσιμη, για την εγκατάσταση του εξοπλισμού.

(vii) Κριτήρια ανθεκτικότητας και απλότητας λειτουργίας.

(viii) Χαμηλή συντήρηση, μικρό μέγεθος και εύκολη μεταφορά στην περιοχή.

(ix) Αποδοχή και υποστήριξη από την τοπική κοινότητα με ελάχιστη αλλαγή στο κοινωνικό περιβάλλον.

(x) Οργάνωση σε τοπικό επίπεδο, με σχετικά απλή εκπαίδευση.



## **6.ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ**

### **6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η αφαλάτωση, σε συνδυασμό με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), προσφέρουν μια πολλά υποσχόμενη προοπτική για την κάλυψη των βασικών αναγκών σε νερό και παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου η σύνδεση με το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο δεν είναι οικονομικά προσιτή ή δεν είναι εφικτή. Μια σημαντική εφαρμογή είναι η χρήση των υβριδικών συστημάτων, ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών για τη μεταφορά θαλάσσιου ή υφάλμυρου νερού σε μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης. Παρακάτω θα παρουσιαστεί ένα αυτόνομο υβριδικό (αιολική και ηλιακή ενέργεια) σύστημα αντίστροφης όσμωσης (RO) για αφαλάτωση θαλασσινού νερού καθώς και τα συμπεράσματα που αποκτήθηκαν μετά από πολλά χρόνια λειτουργίας. Το σύστημα έχει εγκατασταθεί στο αιολικό πάρκο του Κέντρου ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΚΑΠΕ) στο Λαύριο, τοποθεσία κοντά στην Αθήνα. Οι μετρήσεις που έχουν ληφθεί καθώς και τα διδάγματα από το υβριδικό σύστημα RO παρουσιάζονται παρακάτω. Επίσης, παραθέτονται προτάσεις για μια πιο οικονομική και αποτελεσματική μονάδα. Ακολούθως, θα γίνει μια σύντομη περιγραφή και σύγκριση με παρόμοια συστήματα που έχουν εγκατασταθεί σε όλο τον κόσμο. Τελικά, ο κύριος σκοπός της περιγραφής που θα γίνει είναι να αποδείξει ότι ο συνδυασμός των δύο τεχνολογιών είναι μια εφικτή εναλλακτική λύση και να δείξει ότι η εξέταση σημαντικών παραμέτρων (σχεδιασμός, επιλογή των ΑΠΕ, επιλογή υλικού), θα μπορούσε να είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση.

Το σύστημα αναπτύχθηκε και εγκαταστάθηκε το 2001 στο πλαίσιο του έργου «Σχεδιασμός και Ανάπτυξη ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης με ανεμογεννήτρια και φωτοβολταϊκά».

Το 2004, το ΚΑΠΕ, στο πλαίσιο του Εθνικού Επιχειρησιακού Προγράμματος για την Ανταγωνιστικότητα, αποφάσισε να προμηθευτεί ένα σύστημα παροχής ενέργειας και αντικατέστησε το σύστημα αντίστροφης όσμωσης με ένα καινούριο. Το νέο σύστημα αντίστροφης όσμωσης λειτουργεί με επιτυχία από το 2004, σχεδόν με την ίδια λογική με το πρώτο.

## 6.2 ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΤΟΥ ΚΑΠΕ

Το αυτόνομο υβριδικό σύστημα αντίστροφης όσμωσης του ΚΑΠΕ αποτελείται κυρίως από φωτοβολταϊκές γεννήτριες 3,96 kWp, ανεμογεννήτρια 900W, μονάδα αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού 130 L/h, μια σειρά μπαταριών 1800 A\*h/100h και δύο μετατροπείς 1,5 και 4 kW ονομαστικής ισχύος. Πιο αναλυτικά τεχνικά στοιχεία για το υβριδικό σύστημα παρέχονται παρακάτω.

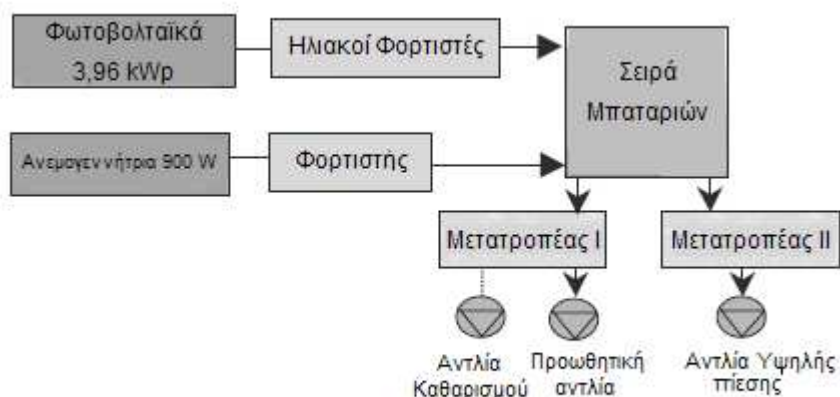
Η φωτοβολταϊκή συστοιχία (Siemens, SM110) χωρίζεται σε τρεις επιμερείς συστοιχίες, εκ των οποίων η κάθε μια αποτελείται από 12 πλαίσια και συνδέεται με έναν ελεγκτή φόρτισης (Steca, Tarom). Η φωτοβολταϊκή συστοιχία έχει ρυθμιζόμενη κλίση κατά τη διάρκεια του έτους ανάλογα με το ύψος του ήλιου.

Η ανεμογεννήτρια (Whisper H40) έχει το δικό της φορτιστή, ο οποίος ελέγχει την τάση της γεννήτριας και αποτρέπει την υπερφόρτιση της μπαταρίας. Ένας ειδικά σχεδιασμένος αντιστάτης χρησιμοποιείται για απόρριψη φορτίου. Ακόμη υπάρχει ένας διακόπτης για να σταματήσει η ανεμογεννήτρια.

Η ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά οδηγεί τη μονάδα αντίστροφης όσμωσης. Μια σειρά μπαταριών, που αποτελείται από 12 στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά των 1850 A\*h/100h η κάθε μία, χρησιμοποιείται κυρίως για την παροχή σταθερής δύναμης στη μονάδα αντίστροφης όσμωσης.

Δύο μετατροπείς χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της συνεχούς τάσης της σειράς των μπαταριών σε εναλλασσόμενη στην κύρια μονάδα αντίστροφης όσμωσης. Ένας μετατροπέας (I) των 1,5 kW (Siemens ESW 3024) οδηγεί την προωθητική αντλία και την αντλία καθαρισμού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας καθαρισμού. Επιπλέον μπορεί να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια για άλλα βοηθητικά στοιχεία. Ένας δεύτερος μετατροπέας (II) των 4kW (Studer HPC 4400-24V) οδηγεί την αντλία υψηλής πίεσης της μονάδας αντίστροφης όσμωσης. Αυτός ο μετατροπέας αντικατέστησε τον αρχικό μετατροπέα 3kW του συστήματος τροφοδοσίας, παρέχοντας σταθερή λειτουργία της αντλία υψηλής πίεσης. Ο μετατροπέας των 3 kW που αντικαταστάθηκε, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού του 2006, παρουσίασε συχνά προβλήματα υπερθέρμανσης.

Η μονάδα αντίστροφης όσμωσης λειτουργεί με ένα κλειστό κύκλωμα νερού δεδομένου ότι δεν υπάρχει διαθέσιμο θαλασσινό νερό στην τοποθεσία. Το θαλασσινό νερό (διάλυμα NaCl) για τη μονάδα επιτυγχάνεται με την ανάμιξη νερού βρύσης με αλάτι σε μια δεξαμενή αποθήκευσης νερού 1 m<sup>3</sup>. Στη μονάδα αντίστροφης όσμωσης το νερό που διαπερνά φτάνει τα 130 L/h. Η μονάδα λειτουργεί με συντελεστή ανάκτησης 13%. Μια προωθητική αντλία (Lowara 2HMS3 / A) 0,47 kW, μονοφασικού κινητήρα, οδηγεί το τροφοδοτικό νερό από τη δεξαμενή αποθήκευσης προς τη μονάδα αντίστροφης όσμωσης. Αυτή η διαδικασία υποκινείται από το μετατροπέα των 1,5 kW στα 24 V (Εικόνα 6.1).



*Εικόνα 6.1: Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα της υβριδικής μονάδας αντίστροφης όσμωσης του ΚΑΠΕ [17]*

Το σύστημα προεπεξεργασίας είναι απλό και αποτελείται από ένα φίλτρο άνθρακα για την αποχλωρίωση του νερού και δύο φίλτρα σε μορφή φυσιγγίων των 25 μm και 5 μm αντίστοιχα, για φιλτράρισμα-καθάρισμα.

Μια αντλία υψηλής πίεσης θετικού εκτοπίσματος (Danfoss APP1.0) των 2,2 kW (τριφασικός κινητήρας) οδηγεί το τροφοδοτικό νερό με πίεση της τάξης των 52 bar προς τις μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης. Αυτή η διαδικασία υποκινείται από το μετατροπέα των 4 kW στα 24 V. Η αντλία υψηλής πίεσης είναι μια αντλία αξονικών εμβόλων και δεν απαιτεί καμία συντήρηση (δεν απαιτείται λάδι λίπανσης).

Για τη μονάδα αντίστροφης όσμωσης, χρησιμοποιούνται σπειροειδείς μεμβράνες 2 "FilmTec, SW30-2540. Δύο δοχεία πίεσης, με μια μεμβράνη το κάθε ένα, είναι συνδεδεμένα σε σειρά για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού συγκέντρωσης περίπου 37.700 ppm TDS. Το παραγόμενο νερό είναι καλής ποιότητας, με συγκέντρωση περίπου 235 μS/cm. Η μετρούμενη ειδική κατανάλωση ενέργειας και των δύο αντλιών είναι 16,5 kW\*h/m<sup>3</sup>. Η άλμη που εξέρχεται από τις μεμβράνες επιστρέφει στη δεξαμενή αποθήκευσης νερού. Δεν περιλαμβάνεται σύστημα ανάκτησης ενέργειας λόγω του μικρού μεγέθους της μονάδας. Επιπλέον, για τον καθαρισμό της μεμβράνης χρησιμοποιείται μια αντλία (Lowara BGM3/A) 650W μονοφασικού κινητήρα. Η δεξαμενή καθαρισμού είναι υπερωψωμένη για την εξασφάλιση του καθαρισμού των μεμβρανών σε περίπτωση που δεν υπάρχει ηλεκτρικό ρεύμα.

Για να εξεταστεί η απόδοση της μονάδας και για να γίνει η τήρηση αρχείων, αναλογικά όργανα με έξοδο 4-20 mA περιλαμβάνονται. Οι μετρήσεις έχουν ως εξής:

Για τη μονάδα αντίστροφης όσμωσης:

- Μέτρηση της πίεσης στην είσοδο και έξοδο της αντλίας υψηλής πίεσης
- Θερμοκρασία του τροφοδοτικού νερού
- Διαπερνούσα αγωγιμότητα
- Διαπερνών ρυθμός ροής που διαπερνά

Στο υπόλοιπο σύστημα:

- Πυρανόμετρο για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας
- Ανεμόμετρο για τη μέτρηση της ταχύτητας του αέρα
- Αισθητήρας τάσης στη σειρά μπαταριών
- Αισθητήρες ρεύματος στην έξοδο της ανεμογεννήτριας των φωτοβολταϊκών και της σειράς μπαταριών
- Αισθητήρες ισχύος στην έξοδο των οι δύο αντλιών

Όλα τα δεδομένα καταγράφονται στο ανεπτυγμένο λογισμικό. Το σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης έχει αναπτυχθεί σε Visual Basic με σκοπό να καταγράψει τις μετρήσεις από τα αναλογικά όργανα, να επεξεργαστεί τα δεδομένα και να αποφασίσει σχετικά με τη λειτουργία της μονάδας αντίστροφης όσμωσης με βάση τη διαθεσιμότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας. Το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να παρέχει στιγμιαία δεδομένα περιόδου 1 λεπτού από τα αναλογικά όργανα και να παρουσιάσει τα αποτελέσματα αρκετών αλγορίθμων με βάση τα 13 σήματα που λαμβάνονται (Εικόνα 6.2).

Οι κύριες λειτουργικές παράμετροι του υβριδικού συστήματος αντίστροφης όσμωσης εμφανίζονται σε μια οθόνη υπολογιστή για σκοπούς επίδειξης (Εικόνες 6.3 και 6.4).

Οι εικόνες 6.5 και 6.6 παρουσιάζουν μετρήσεις που λήφθηκαν τον Ιανουάριο του 2007. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι διαδοχικές τιμές της ταχύτητας του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας ανά τακτά χρονικά διαστήματα καθώς και οι διαδοχικές τιμές της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πηγές ανανεώσιμης ενέργειας και η κατανάλωση ενέργειας της αντίστροφης όσμωσης ανά τακτά χρονικά διαστήματα, αντίστοιχα.

PCDAS - [Μετρήσεις]

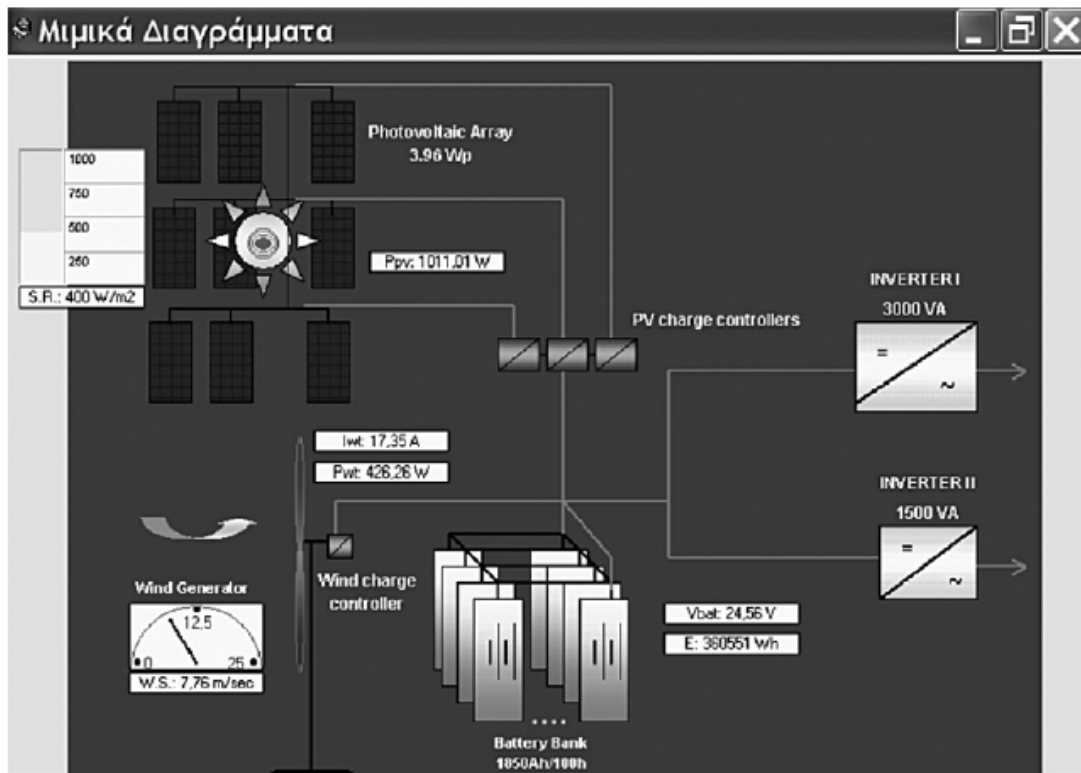
Λογισμικό Βοήθεια Παράθυρο

Παράμετροι Μετρήσεις Μιμικά Διαγράμματα Ψηφιακά Κανάλια

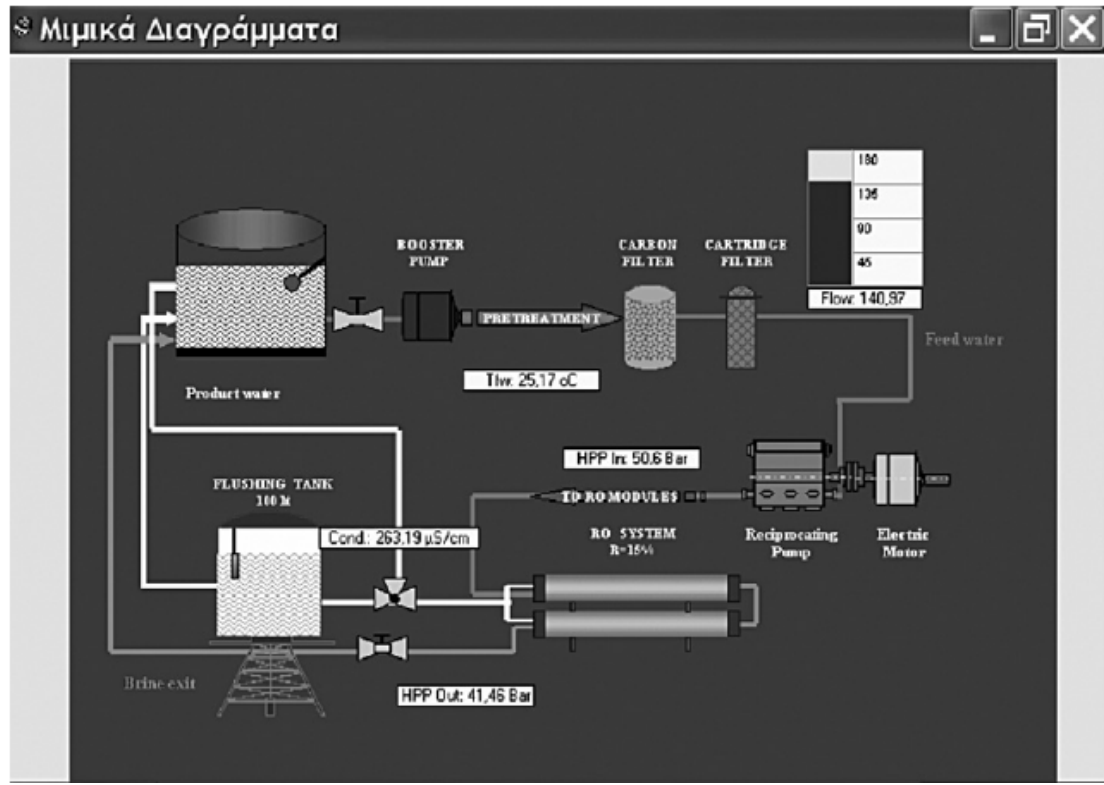
Σε Λειτουργία Βοήθεια Έξοδος

Κανάλια	Μετρήσεις	Μονάδα Μέτρησης	Κανάλια	Μετρήσεις	Μον.	Κανάλια	Μετρήσεις	Μονάδα	Κανάλια	Μετρήσεις	Μονάδα
W.S.	5,89176	m/sec	Ppv	289,64412	W	Pmean pv	245,76020	W	E	378.375,03370	Wh
S.R.	147,41379	W/m2	Pvt	45,35675	W	Pmean vt	100,95510	W			
Ibat	115,56352	A	Pbp	379,25800	W	Pmean booster	48,54440	W			
HPP Power	1,81034	kW	Phpp	1.810,34000	W	Pmean HP	127,14060	W			
BP Power	379,25800	W									
Vbat	23,84687	V									
Ivt	1,90200	A									
Ipv	12,14600	A									
Tiw	24,47588	oC									
HPP Out	41,08626	Bar									
HPP In	50,89475	Bar									
Flow	138,37900	Li/h									
Cond.	245,19000	μS/cm									

Εικόνα 6.2: Οθόνη δεδομένων [17]

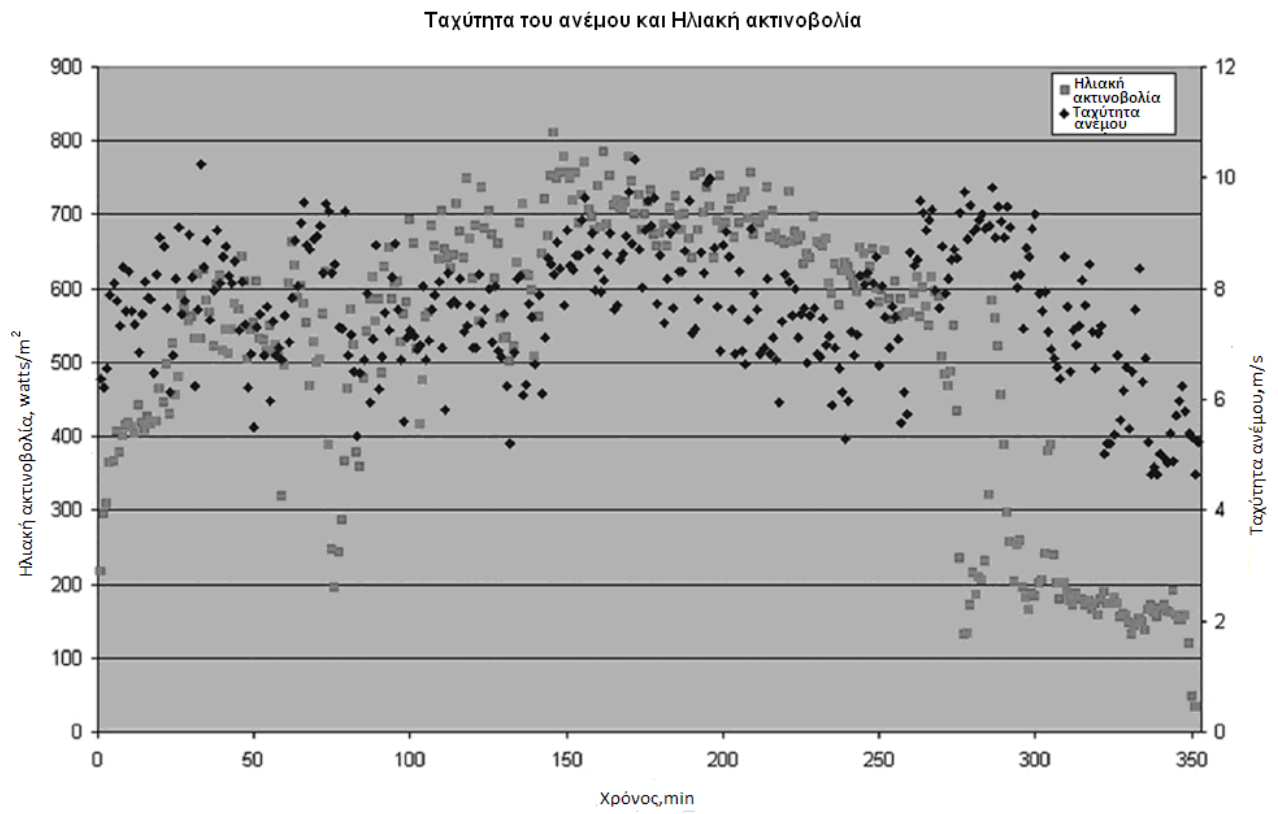


*Εικόνα 6.3: Οθόνη απεικόνισης του συστήματος που τροφοδοτεί τη μονάδα RO [17]*



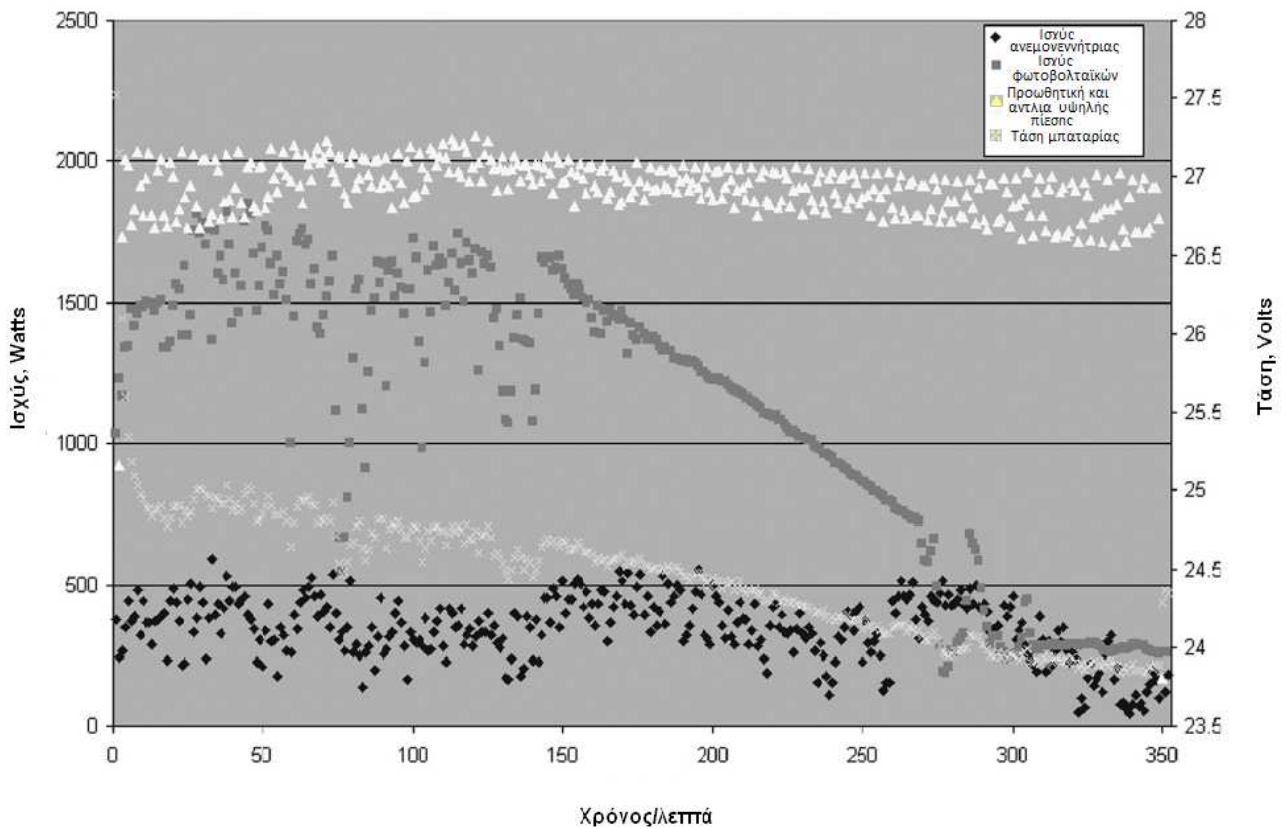
Εικόνα 6.4: Οθόνη απεικόνισης της μονάδας αντίστροφης όσμωσης [17]





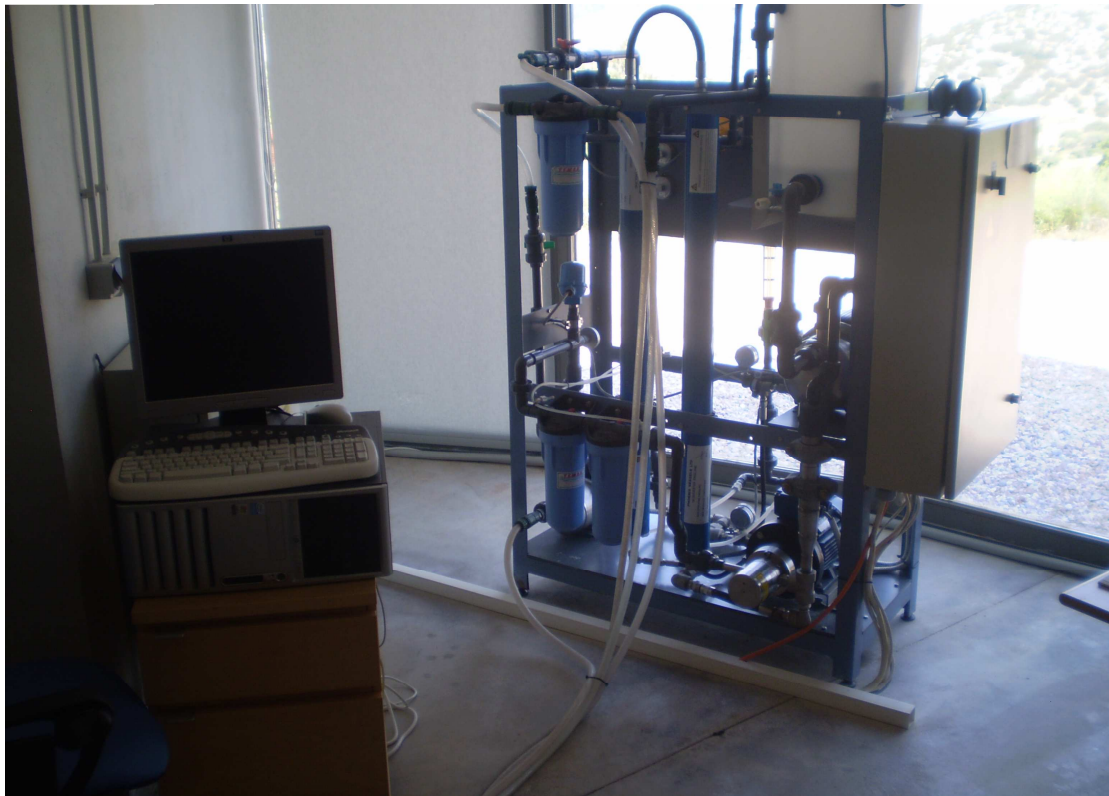
*Εικόνα 6.5: Ταχύτητα ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με το χρόνο [17]*

### Αφαλάτωση, αιολική και ηλιακή ενέργεια



Εικόνα 6.6 : Ισχύς σε σχέση με το χρόνο [17]

Οι εικόνες 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11 και 6.12 είναι φωτογραφίες από την επίσκεψη μου στο ΚΑΠΕ και πιο συγκεκριμένα έχουν φωτογραφηθεί τα πιο σημαντικά μέρη του συστήματος που περιγράφεται παραπάνω. Η κ. Τζεν Ελευθερία με ξενάγησε και μου έδειξε τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος.



Εικόνα 6.7: Μονάδα αντίστροφης όσμωσης και υπολογιστής για επεξεργασία μετρήσεων



Εικόνα 6.8: Ανεμογεννήτριες





Εικόνα 6.9: Δεξαμενή νερού



Εικόνα 6.10: Φωτοβολταϊκές συστοιχίες





*Εικόνα 6.11: Μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης*



*Εικόνα 6.12: Σειρά μπαταριών*

### 6.3 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Το κόστος του νερού ανά μονάδα της αυτόνομης μονάδας ΚΑΠΕ πλησιάζει τα 23 ευρώ/m<sup>3</sup>, θεωρώντας ως έμμεσα κόστη την αντικατάσταση των εξής: μεμβράνες κάθε 3 χρόνια, αντλίες κάθε 10 χρόνια, σειρά μπαταριών κάθε 5 χρόνια, μετατροπείς κάθε 10 χρόνια, το εργατικό δυναμικό και τα αναλώσιμα. Ο Πίνακας 6.1 παρουσιάζει τα άμεσα κόστη της μονάδας. Επιπλέον, το κόστος του νερού ανά μονάδα μιας πρότυπης πειραματικής μονάδας Έρευνας και Ανάπτυξης δεν είναι ενδεικτική αξία δεδομένου ότι στις περισσότερες περιπτώσεις επιπλέον όργανα περιλαμβάνονται για σκοπούς Έρευνας και Ανάπτυξης και πολύ μικρές μονάδες αντίστροφης όσμωσης χρησιμοποιούνται όσον αφορά τις δυνατότητες του συστήματος τροφοδοσίας. Για παράδειγμα, για την περίπτωση του ΚΑΠΕ (με την προϋπόθεση διαθεσιμότητας θαλασσινού νερού) με την προσθήκη δύο μεμβρανών στη σειρά (που οδηγεί σε ικανότητα διαπερατότητας 260L/h) το ίδιο σύστημα τροφοδοσίας, λίγο ψηλότερο κόστος κεφαλαίου της μονάδας αντίστροφης όσμωσης, το μοναδιαίο κόστος του νερού θα μπορούσε να μειωθεί στο ήμισυ αυτού που αναφέρθηκε παραπάνω. Τέτοιοι παράγοντες όπως οι περιορισμοί στη χρήση συστήματος ανάκτησης ενέργειας περιορίζουν τη βελτιστοποίηση του συστήματος και τη μείωση του κόστους του νερού ανά μονάδα.

<b>Εξοπλισμός</b>	<b>Κόστος (ευρώ)</b>
Μονάδα αντίστροφης όσμωσης (3.1 m <sup>3</sup> /day)	17
Φωτοβολταϊκές γεννήτριες (3.96 kWp)	28,185
Ανεμογεννήτρια (900 W)	2934
Σειρά μπαταριών (1800 A*h/100 h)	2347
Μετατροπείς I,II (1.5, 4 kW)	4500
Άλλα (όργανα, σύστημα ελέγχου)	6200
Σύνολο	61,166

*Πίνακας 6.1: Ανάλυση κόστους [17]*

## 6.4 ΔΙΑΠΙΣΤΩΣΕΙΣ

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του υβριδικού συστήματος αντίστροφης όσμωσης αρκετά, αλλά όχι σοβαρά, τεχνικά προβλήματα έχουν ληφθεί υπόψη. Καθ' όλη την αντιστοίχιση της μονάδας αντίστροφης όσμωσης με το σύστημα παροχής ρεύματος, ήταν απαραίτητη η αντικατάσταση του μονοφασικού κινητήρα της αντλίας υψηλής πίεσης με έναν τριφασικό κινητήρα λόγω της υψηλής εισροής ρευμάτων στην εκκίνηση του μονοφασικού κινητήρα. Ένας μεταλλακτήρας συμπεριλαμβανομένου ενός ομαλού εκκινήτη προστέθηκε. Μετά από αυτή την αντικατάσταση ο δεύτερος μετατροπέας λειτουργεί και οδηγεί με επιτυχία την αντλία υψηλής πίεσης. Το καλοκαίρι του 2006 προέκυψε ένα πρόβλημα υπερθέρμανσης του μετατροπέα οδηγώντας σε συχνές διακοπές της μονάδας αντίστροφης όσμωσης. Ο δεύτερος μετατροπέας μόλις αντικαταστάθηκε από το μετατροπέα των 4kW όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Ο νέος μετατροπέας ημιτονοειδούς κύματος βελτιώνει τη λειτουργία της αντλίας υψηλής πίεσης. Επιπλέον, προβλήματα που αντιμετωπίζονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος έχουν να κάνουν με βραχυκυκλώματα πολλών αισθητήρων, βλάβες καλωδίων λόγω της μεγάλης ταχύτητας του ανέμου και επιθέσεων τρωκτικών. Όσον αφορά το σύστημα τροφοδοσίας, μέσα στα 5 χρόνια λειτουργίας του, δεν έχει χρειαστεί συντήρηση για τα φωτοβολταϊκά, την ανεμογεννήτρια και τη σειρά μπαταριών. Κλείνοντας, το σύστημα είναι σε θέση να λειτουργεί κατά μέσο όρο 5 ώρες κατά τη διάρκεια του χειμώνα και περισσότερο από 8 ώρες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού παράγοντας επαρκή ποσότητα και καλή ποιότητα πόσιμου νερού.

## 6.5 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ

Παρακάτω ακολουθεί μια σύντομη επισκόπηση των συστημάτων μικρής κλίμακας (έως 50 m<sup>3</sup>/day) που χρησιμοποιούν τεχνολογίες αφαλάτωσης καθοδηγούμενες από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και δίνεται έμφαση στο συνδυασμό της αντίστροφης όσμωσης με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Τα μεγέθη των εγκατεστημένων μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κατά μέσο όρο είναι μικρά δεδομένου ότι τα περισσότερα από αυτά έχουν εγκατασταθεί για έρευνα και επίδειξη. Υπάρχει ένας αριθμός πιθανών συνδυασμών διεργασιών

αφαλάτωσης με διαφορετικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ο πιο δημοφιλής συνδυασμός είναι φωτοβολταϊκά με αντίστροφη όσμωση οδηγούμενα από τον άνεμο. Πολλοί από αυτούς τους πιθανούς συνδυασμούς δεν μπορεί να είναι βιώσιμοι υπό ορισμένες συνθήκες, αλλά συμπεριλαμβάνονται στην αξιολόγηση των ερευνητών. Όσον αφορά το συνδυασμό φωτοβολταϊκών, ανέμου και αντίστροφης όσμωσης αρκετές μονάδες έχουν αναπτυχθεί και δοκιμαστεί σε όλο τον κόσμο ως επί το πλείστον από πανεπιστήμια και οργανισμούς Έρευνας και Ανάπτυξης.

Πιο αναλυτικά, μια μονάδα αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού 500 L/h οδηγούμενη από φωτοβολταϊκά 1,54 kWp έχει αναπτυχθεί και δοκιμαστεί από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Ηνωμένου Βασιλείου, CREST. Το σύστημα λειτουργούσε με μεταβλητή ροή, χωρίς να χρειάζεται μπαταρίες. Η πίεση λειτουργίας κυμαινόταν μεταξύ 38 και 51 bar. Το τροφοδοτικό νερό ήταν διάλυμα NaCl περίπου 32.800 mg/L ενώ η αλατότητα του νερού που διαπερνούσε κυμαινόταν μεταξύ 470 και 800 ppm. Η ανάκτηση ενέργειας παρέχεται από μια αντλία Clark, και η χρήση ενός μεταβλητού ποσοστού ανάκαμψης επεκτείνει την ενεργειακή απόδοση σε ένα αρκετά ευρύ φάσμα λειτουργίας, επιτρέποντας στο σύστημα να κάνει αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας χωρίς να χρειάζεται μπαταρίες. Υποθέτοντας 20 χρόνια ζωής του συστήματος στο σύνολό του, με την αντικατάσταση της αντλίας κάθε 5 χρόνια και αντικατάσταση μεμβράνης κάθε χρόνο, το κόστος λειτουργίας εκτιμήθηκε σε £2000/έτος και το συνολικό κόστος του νερού ήταν περίπου £2/m<sup>3</sup>. Η Clark αντλία και το μεταβλητό ποσοστό ανάκτησης συνδυάζονται για την παροχή επαρκούς ενεργειακής απόδοσης στο ευρύ φάσμα της λειτουργίας, απαλλάσσοντας έτσι την ανάγκη μπαταριών. Όμως αυτή η διακοπτόμενη λειτουργία των μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης μπορεί να επιταχύνει τη φθορά τους. Περισσότερες μελέτες απαιτούνται για την αξιοπιστία του συστήματος. Η ίδια μονάδα αντίστροφης όσμωσης έχει συνδυαστεί και δοκιμαστεί με μια ανεμογεννήτρια χωρίς σειρά μπαταριών. Η ανεμογεννήτρια είναι κατασκευασμένη στη Σκωτία και έχει ονομαστική ενέργεια 2,5 kW.

Μια πολύ ενδιαφέρουσα μονάδα αναπτύχθηκε στα Κανάρια νησιά, στο Pozo Izquierdo. Το σύστημα αποτελείται από μια μονάδα αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού 400 L/h, το οποίο είναι οδηγείται από φωτοβολταϊκό σύστημα 4,8 kWp και ένα εφεδρικό σύστημα μπαταριών 19 kWh. Η αλατότητα του νερού που διαπερνά είναι λιγότερη από 1000 ppm TDS, ενώ η αλατότητα του θαλασσινού νερού είναι 35.500 ppm TDS. Η μονάδα αντίστροφης όσμωσης λειτουργεί σε πίεση 55 bar



και με ποσοστό ανάκτησης 45%. Η μονάδα αποτελείται από δύο δοχεία πίεσης σε παραλληλία με έξι μεμβράνες το κάθε ένα. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς της μονάδας είναι 3 kW και η ειδική κατανάλωση ενέργειας είναι 5,5 kWh/m<sup>3</sup>. Η μονάδα λειτουργεί αυτόματα κατά μέσο όρο 9 ώρες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και 7 ώρες κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Η μονάδα είναι υπό μελέτη για την απόδοση της κάτω από διαφορετικές θερμοκρασίες του τροφοδοτικού νερού, αλλά και για τη συμπεριφορά των μεμβρανών λόγω της μη συνεχόμενης λειτουργίας της μονάδας καθώς και τη συμπεριφορά του εξοπλισμού στις “δύσκολες” συνθήκες εργασίας. Μια εκτίμηση του κόστους του συστήματος είναι από 9 ευρώ/m<sup>3</sup>.

Επιπλέον, μια μονάδα αντίστροφης όσμωσης υφάλμυρου νερού οδηγούμενη από φωτοβολταϊκά εγκαταστάθηκε το 2000 στην κοινότητα της Coite-Pedreiras στη Βραζιλία για την υδροδότηση 150 οικογενειών. Η κύρια πηγή νερού του χωριού είναι ένα πηγάδι που παρέχει νερό με αλατότητα γύρω στα 1200 ppm TDS. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει μονάδα αντίστροφης όσμωσης με παροχή νερού 250 L/h που οδηγείται από φωτοβολταϊκά 1,1 kWp και μια σειρά μπαταριών. Η μονάδα λειτουργούσε με πίεση λειτουργίας 8 bar και ποσοστό ανάκτησης 27%. Η μονάδα περιλαμβάνει κινητήρα συνεχούς ρεύματος για την αντλία υψηλής πίεσης. Η ειδική ηλεκτρική κατανάλωση ήταν 4,7 kWh/m<sup>3</sup>. Μετά από τρεις μήνες λειτουργίας η ιδέα του κινητήρα απέτυχε λόγω φθοράς των συστημάτων καθαρισμού που είχε ο κινητήρας και της έλλειψης των κατάλληλων συστημάτων καθαρισμού στην τοπική αγορά. Ο κινητήρας αυτός αντικαταστάθηκε με έναν τριφασικό επαγωγικό κινητήρα, προσθέτοντας επίσης στο σύστημα ένα μετατροπέα για να μετατρέψει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο. Μετά από αυτή την αντικατάσταση το σύστημα παρείχε μια σταθερότερη λειτουργία και η ειδική ηλεκτρική κατανάλωση μειώθηκε σε 3 kW\*h/m<sup>3</sup>. Το μοναδιαίο κόστος του νερού υπολογίζεται γύρω στα 10 ευρώ/m<sup>3</sup>.

Σε μια σύγκριση του κόστους νερού με άλλες πηγές νερού, πρέπει να αναφερθεί ότι στην κοινότητα Coite-Pedreiras, στη Βραζιλία το εμφιαλωμένο νερό προσφέρεται σε μπουκάλια 20L σε τιμή περίπου 2,55 ευρώ/L, στη Μαγιόρκα, κατά τη διάρκεια ξηρασιών, το νερό που εισάγεται από πλοία φτάνει τα 2 ευρώ/m<sup>3</sup>, ενώ το κόστος της μεταφοράς νερού στα ελληνικά νησιά κυμαίνεται από 2,2 έως 7 ευρώ/m<sup>3</sup>. Επιπλέον, το νερό από πηγάδια στην Aqaba της Ιορδανίας είναι κατά προσέγγιση 1,7 ευρώ/m<sup>3</sup>

## **7.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Παρά το γεγονός ότι υπάρχει μια εμπειρία στην αφαλάτωση με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και επιτυχείς εφαρμογές, υπάρχει μεγάλο περιθώριο για βελτίωση του συνδυασμού και των δυο τεχνολογιών από τεχνική και οικονομική άποψη. Πολλή δουλειά έχει γίνει σε θεωρητική βάση, αλλά όχι σε μια πραγματική βάση. Ός εκ τούτου είναι επιτακτική ανάγκη να αναλυθούν προσεκτικά οι πολυάριθμες επιλογές και να ληφθούν οι σωστές αποφάσεις σε συγκριτική βάση και σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά κάθε συγκεκριμένης περίπτωσης. Υπάρχουσες εγκαταστάσεις, που λειτουργούν κάτω από σκληρές κλιματολογικές συνθήκες, από μη έμπειρο προσωπικό τοπικά όρια της αγοράς κλπ., αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία αυτών των συστημάτων. Το επόμενο βήμα είναι οι εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας, οι οποίες παρά το γεγονός ότι προμηνύουν ρίσκα είναι υψηλά υποσχόμενες.

## 8.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. *Fundamentals of Salt Water Desalination*, H.T. El-Dessouky and H.M. Ettouney, 2002
2. *A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems*, Mohamed A. Eltawil, Zhao Zhengming, Liqiang Yuan, 2009
3. *Desalination Powered by Renewable Energy Sources*, Καθηγητής ΕΜΠ Ασημακόπουλος Δ. Αθήνα 2001
4. *Industrial Processing with Membranes*, Lacey and Loeb , 1972
5. *Συνδυασμός αιολικής ενέργειας και αντίστροφης όσμωσης: Το σύστημα της Μήλου*, Υφαντής Νίκος (Τεχνικός Διευθυντής, SYCHEM A.E.), Αθήνα 2010
6. *Κάλυψη ζήτησης ενέργειας και νερού με αιολική ενέργεια και αφαλάτωση στη νήσο Σίκινο* Μουτάφης Παναγιώτης, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π. Αθήνα 2008
7. *Μέθοδοι Αφαλάτωσης - Συγκριτική Αξιολόγηση και Εφαρμογές στα Νησιά του Αιγαίου*, Τζεν Ελευθερία, Αθήνα 2001
8. *Συστήματα αφαλάτωσης στο νησιωτικό χώρο*, Καθηγητής Μανωλάκος Δημήτριος, Αθήνα 2008
9. *Exergy analysis of a MSF distillation plant*, Nafiz Kahraman, Yunus A. Cengel 2009
10. *Αφαλάτωση* Αλέξανδρος Σ. Αλεξάκης, Αθήνα 2003
11. *The guidebook to Membrane Desalination Technology. Reverse Osmosis*, Mark Wilf 2007

12. *Review of water resources and desalination technologies*, James E. Miller  
2003
13. *Developments in Water Treatment*, W.M. Lewis, 1990
14. *Αφαλάτωση με χρήση ΑΠΕ*, Τζεν Ελευθερία, Αθήνα 2010
15. *Φωτοβολταϊκά Συστήματα*, Φραγκιαδάκης Ι.Ε. , Θεσσαλονίκη 2006
16. *Wind Energy Handbook*, Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, 2001
17. *Autonomous reverse osmosis units driven by RE sources experiences and lessons learned*, Τζεν Ε. , Θεοφιλογιαννάκος Δ. , Κολογίος Ζ. , 2007
18. *Autonomous Desalination Units Using RES*, INCO Programme 2005
19. *A new approach to solar desalination for small and medium size use in remote areas*, Kunze H. , 2001
20. *Μέθοδοι και Συστήματα Αφαλάτωσης*, Δεληγιάννη Ε., Μπελεσιώτης Β. ,  
Αθήνα 1995
21. *Seawater desalination using renewable energy sources*, Καλογήρου  
Σωτήρης, 2005
22. [www.Filmtec.com](http://www.Filmtec.com)
23. [www.energypoint.gr](http://www.energypoint.gr)
24. [www.cres.com](http://www.cres.com)
25. [www.photovoltaic.gr](http://www.photovoltaic.gr)

26. [www.r2controls.com](http://www.r2controls.com)

27. [www.env-edu.gr](http://www.env-edu.gr)