

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ: “ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ  
ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ  
ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ  
ΣΕ ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΠΕ”**

Φοιτητής : ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ ΧΡΗΣΤΟΣ  
ΑΜ : 43265

Επιβλέπων : ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΖΑΦΕΙΡΑΚΗΣ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2019

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ: “ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ  
ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ  
ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ  
ΣΕ ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΠΕ”**

Φοιτητής : ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ-ΧΡΗΣΤΟΣ  
ΑΜ : 43265

Επιβλέπων : ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΖΑΦΕΙΡΑΚΗΣ


ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2019

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάζει μια εισαγωγή στη χρήση και στις τεχνολογίες της αφαλάτωσης, ως μια ενδεδειγμένη λύση στην υδατική κρίση που διανύει ο πλανήτης μας, επικεντρώνοντας στην αφαλάτωση υδάτων με συστήματα αντίστροφης όσμωσης.

Παρουσιάζοντας στοιχεία για τους υδάτινους πόρους της γης και την κατανομή αυτών, καθώς και των διευρυμένων προβλημάτων λειψυδρίας που υπάρχουν σε πολλά μέρη του κόσμου αλλά και της Ελλάδας, αναδεικνύεται η σημασία της αφαλάτωσης και η ανάπτυξη των τεχνολογιών της για την παροχή αξιοποιήσιμων υδάτων σε περιοχές είτε στερούντων αυτών, είτε με μεγάλη δυσκολία στην τροφοδοσία τους με αυτό.

Στο πλαίσιο αυτό, μελετάται σε βάθος η ενεργειακή συμπεριφορά ολοκληρωμένης πειραματικής μονάδας αφαλάτωσης η οποία αποτελεί βασικό τμήμα του πιλοτικού υβριδικού σταθμού ΑΠΕ-συσσωρευτών του Εργαστηρίου Ήπιων Μορφών & Προστασίας του Περιβάλλοντος, του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Πιο συγκεκριμένα, καθορίζονται πειραματικά τόσο οι επιμέρους βαθμοί απόδοσης όσο και ο συνολικός συντελεστής απόδοσης της εγκατάστασης αφαλάτωσης, εκφρασμένος σε kWh/m<sup>3</sup> (απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για παραγωγή ενός m<sup>3</sup> πόσιμου νερού), με ιδιαίτερη έμφαση στην επίδραση των χαρακτηριστικών του προς επεξεργασία νερού (κυρίως αλατότητα) καθώς και της επιθυμητής διακινούμενης παροχής.

Στόχος της πειραματικής διαδικασίας είναι η κάλυψη πλήθους περιπτώσεων οι οποίες αντιστοιχούν σε εφαρμογές παρόμοιων μονάδων αφαλάτωσης σε παραθαλάσσιες και νησιωτικές περιοχές του ελλαδικού χώρου, καθώς και η τροφοδότηση θεωρητικών μοντέλων προσομοίωσης με πειραματικά επικυρωμένα αποτελέσματα για τη μελέτη ολοκληρωμένων υβριδικών σταθμών με συμμετοχή μονάδων αφαλάτωσης.

### ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ :

Υδάτινοι πόροι, λειψυδρία, αφαλάτωση, αντίστροφη όσμωση, αλατότητα, απόδοση, κατανάλωση, υβριδικός σταθμός, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

## **ABSTRACT**

This thesis presents an introduction to desalination and desalination technologies as an ideal solution to our water crisis, focusing on the desalination of water with reverse osmosis systems.

Presenting data of the water resources of the earth and their distribution, as well as the widespread problems of water scarcity that exist in many parts of the world and in Greece, the importance of desalination and the development of its technologies for the provision of exploitable and/or drinkable waters in areas lacking them, or with great difficulty in reaching them, is designated.

In this context, the energy behavior of an integrated Desalination Experimental Unit, which is a key part of the pilot Hybrid Station of the Laboratory of Soft Energy Applications and Environmental Protection of the University of West Attica, is studied in depth. In particular, the individual efficiency rates and the total efficiency coefficient of the desalination plant, expressed in kWh/m<sup>3</sup> (required electricity to produce one m<sup>3</sup> of potable water), are determined experimentally, with particular emphasis on the effect of water characteristics (mainly salinity) as well as the desired flowrate.

The objective of the experimental process is to cover a number of cases that correspond to applications of similar desalination units in Greek seas and islands, as well as to inform theoretical models for the study of integrated hybrid stations with the participation of desalination units with experimentally validated results.

**KEY WORDS:** Water resources, water scarcity, desalination, reverse osmosis, salinity, efficiency, consumption, hybrid station, renewable energy.

---

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΟΙ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΙ ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ</b>	7
1.1 Ο υδρολογικός κύκλος	7
1.2 Η κατανομή του νερού στον πλανήτη	8
1.3 Η χρήση του νερού	10
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Η ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΥΔΑΤΙΚΗ ΚΡΙΣΗ</b>	12
2.1 Η κρίση σε παγκόσμιο επίπεδο	12
2.2 Η κρίση του νερού στην Ελλάδα	13
2.3 Η ανεπάρκεια των λύσεων έως σήμερα	14
2.4 Εγχώρια αντιμετώπιση της κρίσης	15
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Η ΙΔΕΑ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ</b>	16
3.1 Εισαγωγή στην αφαλάτωση	16
3.2 Ιστορική αναδρομή της αφαλάτωσης	16
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ</b>	17
4.1 Θερμικές κατεργασίες αφαλάτωσης (αλλαγής φάσης)	18
4.1.1 Πολυβάθμια εκτόνωση (MSF)	18
4.1.2 Εξάτμιση πολλαπλών βαθμίδων (MED)	19
4.1.3 Εξάτμιση με συμπίεση ατμών (MVC, TVC)	20
4.1.4 Ηλιακή απόσταξη (Solar Distillation)	21
4.2 Κατεργασίες αφαλάτωσης με χρήση μεμβρανών (μιας φάσης)	23
4.2.1 Αντίστροφη Όσμωση (Reverse Osmosis – RO)	23
4.2.2 Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis - ED)	24
4.2.3 Αντίστροφη Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis Reversal - EDR)	25
4.3 Λοιπές μέθοδοι αφαλάτωσης	26
4.3.1 Ιοντοανταλλαγή	27
4.3.2 Νανόφιλτρα (carbon-nanotube membrane)	27
4.3.3 Κρυστάλλωση	28
4.3.4 Η γεωθερμική αφαλάτωση	29
4.4 Τα κόστη και η επιλογή μεθόδους αφαλάτωσης	29
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΣΕ ΑΡΙΘΜΟΥΣ</b>	32
5.1 Τα δεδομένα σε παγκόσμιο επίπεδο	32
5.2 Τα δεδομένα στην Ελλάδα	37
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Η ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΟΣΜΩΣΗ</b>	41
6.1 Τα στάδια της αντίστροφης όσμωσης	42
6.1.1 Στάδιο προεπεξεργασίας	42
6.1.2 Στάδιο αντίστροφης όσμωσης	43
6.1.3 Στάδιο τελικής επεξεργασίας	43

---

6.2 Τύποι μεμβρανών στην αντίστροφη όσμωση	45
6.2.1 Επίπεδος τύπος	46
6.2.2 Σπειροειδής τύπος μεμβράνης	46
6.2.3 Σωληνωτός τύπος μεμβράνης	47
6.2.4 Τύπος κοίλων (τριχοειδών) ινών	48
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ &amp; ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b>	<b>48</b>
7.1 Δυνατότητες κάλυψης της αφαλάτωσης	49
7.1.1 Αφαλάτωση και αιολική ενέργεια	51
7.1.2 Αφαλάτωση και ηλιακή ενέργεια	51
7.1.3 Αφαλάτωση και Γεωθερμία	52
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΗΜΕ &amp; ΠΡΟΠΕ</b>	<b>53</b>
8.1 Υβριδικός σταθμός παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	53
8.2 Βασικά στοιχεία μονάδας αφαλάτωσης	54
8.3 Λειτουργία πειραματικής εγκατάστασης αφαλάτωσης	55
8.4 Λήψη και επεξεργασία μετρήσεων	56
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>57</b>
9.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων πειραματικής διάταξης	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
9.2 Συμπεράσματα-σχολιασμός	63
9.3 Πεδία εφαρμογής	64
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>69</b>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΟΙ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΙ ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ

### 1.1 Ο υδρολογικός κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος, αλλιώς και «κύκλος του νερού», αποτελεί το φυσικό σύστημα με το οποίο ανακυκλώνεται το νερό στον πλανήτη. Αρχικά υπάρχει η εξάτμιση του νερού εξαιτίας της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται. Η εξάτμιση λαμβάνει χώρα κυρίως στη θάλασσα, αλλά και στις λίμνες και όπου αλλού υπάρχει εκτεθειμένη στην ακτινοβολία ποσότητα νερού. Εξάτμιση παρατηρείται επίσης από τα φύλλα των φυτών (διαπνοή). Οι υδρατμοί που δημιουργούνται ανεβαίνουν στην ατμόσφαιρα όπου ψύχονται, με αποτέλεσμα τη συμπύκνωση τους και την επιστροφή στη στεριά και τη θάλασσα ως ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, δηλ. με τη μορφή βροχής, χιονιού, χαλάζι, κ.λπ.

Οι κατακρημνίσεις συγκεντρώνονται και δημιουργούν απορροές στην επιφάνεια του εδάφους και έτσι δημιουργούνται ρυάκια τα οποία καταλήγουν σε λίμνες, ποταμούς κ.ά. Ένα μέρος των κατακρημνίσεων αυτών απορροφάται από το έδαφος και κινούμενο καθοδικά σχηματίζει τους υδροφορείς. Τέλος, τόσο τμήμα του επιφανειακού αλλά και του υπόγειου νερού επιστρέφει στη θάλασσα. Κατά τη διάρκεια του υδρολογικού κύκλου, το νερό μετατρέπεται και περνάει από όλες τις φυσικές καταστάσεις και φάσεις του, δηλαδή την αέρια, υγρή και στερεή.

Ο κύκλος αυτός παραμένει και εξακολουθεί και υφίσταται, μπορεί να διαταραχθεί όμως είτε από φυσικά φαινόμενα, είτε από την παρέμβαση της ανθρώπινης δραστηριότητας. Σημαντικότεροι παράγοντες ανθρώπινης επιρροής είναι :

- **Η ρύπανση** : Κατά την εξάτμιση του νερού, τα διαλυμένα σε αυτό συστατικά παραμένουν και έτσι οι υδρατμοί αποτελούνται από καθαρό νερό. Κατά την συμπύκνωση όμως αυτών και επιστροφή τους στη γη, αλληλεπιδρούν με ρύπους που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα από την καύση ορυκτών καυσίμων για την βιομηχανική κυρίως δραστηριότητα του ανθρώπου, δημιουργώντας το φαινόμενο της όξινης βροχής. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί καταστροφές στο φυσικό περιβάλλον, αλλά και στο ανθρώπινο (μάρμαρα, μνημεία κ.ά.).
- **Η Γεωργία** : Η συνεχής άντληση υπογείων νερών με σκοπό την άρδευση με ρυθμό μεγαλύτερο από αυτόν που μπορεί να αναπληρώσει η φύση με τον κύκλο του νερού οδηγεί στην εξάντληση αυτών. Η σταδιακή υποχώρηση του υδροφόρου εδάφους έχει σαν αποτέλεσμα την εισχώρηση θαλασσινού νερού, το οποίο αναμειγνύεται με το γλυκό νερό του εδάφους αλλάζοντας την αλατότητά του και διαταράσσοντας την φυσική ισορροπία. Επίσης, η ασύδοτη εκχέρσωση για τη δημιουργία και επέκταση των ανθρώπινων δομών και καλλιεργήσιμων εκτάσεων επηρεάζει άμεσα την ποιότητα του εδάφους και την ικανότητά του να συγκρατεί την υγρασία και τις κατακρημνίσεις.

- **Η συνεχής αστικοποίηση :** Η ολοένα αυξανόμενη συγκέντρωση ανθρώπων στα αστικά κέντρα, δημιουργεί τοπικά μεγάλες ποσότητες ρύπων και ρυπαινόμενου νερού, η μη ορθή αποβολή του οποίου επηρεάζει επίσης το οικοσύστημα και τον κύκλο του νερού.
- **Το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής :** Φαινόμενο το οποίο λαμβάνει ολοένα και μεγαλύτερες διαστάσεις, είναι αυτό της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής. Η αλλαγή αυτή προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις και στον φυσικό κύκλο του νερού, αφού επηρεάζει και μεταβάλλει όλα τα στάδια του κύκλου. Αποτέλεσμα αυτών των αλλαγών γίνονται αισθητά με έντονες κατακρημνίσεις, αλλαγές στα θαλάσσια ρεύματα, αλλαγές στην κατανομή του νερού, λιώσιμο πάγων κ.ά.

(Πηγή : διαδίκτυο)



Εικόνα 1.1 Ο υδρολογικός κύκλος, (πηγή : <http://www.medies.net>)

## 1.2 Η κατανομή του νερού στον πλανήτη

Το νερό αποτελεί ένα από τα πιο βασικά συστατικά στοιχεία των ζωντανών οργανισμών και κατ' επέκταση της ζωής στον πλανήτη όπως την γνωρίζουμε σήμερα. Χαρακτηριστικά, το νερό αντιπροσωπεύει περίπου το 55%~80% του σωματικού βάρους των ανθρώπων και ζώων, με τα κύτταρα αυτών να αποτελούνται από νερό έως και σε ποσοστό 90%.

Πέρα από την συστατική του σημασία για την ίδια την ύπαρξη ζωής όμως, η πρόσβαση σε νερό και η χρήση αυτού είναι άμεσα συνυφασμένη με την εξέλιξη της ανθρωπότητας στο σύνολό της. Αποτελώντας μια πιο σταθερές ανανεώσιμες φυσικές πηγές, γρήγορα έγινε



Βασικός παράγοντας της διαβίωσης του ανθρώπου και της εξέλιξης αυτού, τροφοδοτώντας την γεωργική παραγωγή μέσω της άρδευσης για την καλλιέργεια χέρσας γης, την κτηνοτροφία στην οποία καθίσταται αναγκαίο στοιχείο για την συντήρησή κοπαδιών και στην ανάπτυξη της οικονομίας πολιτισμών και κρατών από την αρχαιότητα έως σήμερα, με τη χάραξη εμπορικών δρόμων και αλυσίδων μεταφοράς χρησιμοποιώντας υφιστάμενα υδάτινα δίκτυα. Ως αποτέλεσμα, η πρόσβαση σε νερό υπήρξε από αρχαιοτάτων χρόνων κομβικής σημασίας για κάθε άνθρωπο, κοινότητα, πόλη και κράτος, δημιουργώντας αντικρουόμενα οικονομικά συμφέροντα και συγκρούσεις με σκοπό την αξιοποίηση υδατικών πόρων.

Ιδιαίτερη δε σημασία έχει η γεωγραφική κατανομή του νερού, το οποίο συναντάται υπό διάφορες μορφές στον πλανήτη και κατανέμεται σε τρεις μεγάλες περιοχές : στους ωκεανούς, στην ξηρά και στην ατμόσφαιρα.

Στους ωκεανούς συναντάμε την μεγαλύτερη ποσότητα του παγκόσμιου νερού, σε ποσοστό περίπου 97%, στην ξηρά βρίσκεται ποσότητα νερού αντίστοιχη του 3% παγκοσμίως και ένα μικρό ποσοστό της τάξης του 0.02% εμπεριέχεται στην ατμόσφαιρα της γης υπό μορφή υδρατμών. Περεταίρω κατηγοριοποίηση γίνεται και στο γλυκό νερό του πλανήτη, το οποίο μπορούμε να συναντήσουμε στην ξηρά ως ποτάμια, λίμνες, πάγους και υπόγεια ρεύματα στο έδαφος (υδροφόρους). Μια γενική εκτίμηση για την παγκόσμια κατανομή του νερού φαίνεται στην εικόνα 1.2 και στον πίνακα 1.1.



Εικόνα 1.2 Η παγκόσμια κατανομή του νερού

ΜΟΡΦΗ ΝΕΡΟΥ	ΟΓΚΟΣ ΝΕΡΟΥ ΣΕ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΓΛΥΚΟΥ	ΠΟΣΟΣΤΟ
-------------	----------------	----------------	---------

	<b>ΚΥΒ. ΧΙΛΙΟΜΕΤΡΑ</b>	<b>ΝΕΡΟΥ</b>	<b>ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ</b>
Ωκεανοί, θάλασσες, κόλποι	1.338.000.000	--	96.5
Παγόβουνα, παγετόνες, χιόνι	24.064.000	68.7	1.74
Υπόγειο νερό	23.400.000	--	1.7
- Γλυκό	10.530.000	30.1	0.76
- Αλμυρό	12.870.000	--	0.94
Εδαφική Υγρασία	16.500	0.05	0.001
Εδαφικός πάγος	300.000	0.86	0.022
Λίμνες	176.400	--	0.013
- Γλυκές	91.000	0.26	0.007
- Αλμυρές	85.400	--	0.006
Ατμόσφαιρα	12.900	0.04	0.001
Έλη	11.470	0.03	0.0008
Ποταμοί	2.120	0.006	0.0002
Βιολογικό νερό	1.120	0.003	0.0001
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>1.386.000.000</b>	<b>--</b>	<b>100</b>

Πίνακας 1.1 Εκτίμηση παγκόσμιας κατανομής νερού (Πηγή : USGS science for a changing world)

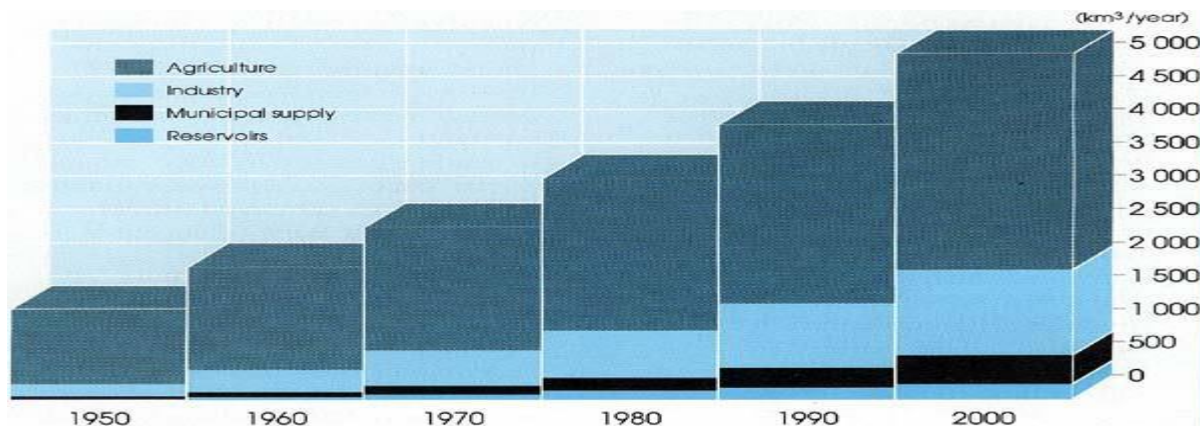
Συμπεραίνουμε λοιπόν πως το γλυκό νερό το οποίο είναι και το άμεσα αξιοποιήσιμο από τον άνθρωπο για να καλύψει τις απαιτήσεις του σε κατανάλωση και χρήση, αποτελεί μόλις ένα πολύ μικρό ποσοστό από το συνολικό παγκόσμιο υδατικό απόθεμα. Επίσης, λόγω των διαφορετικών μορφών που αυτό συναντάται, δεν είναι εφικτό να αξιοποιηθεί εξ' ολοκλήρου.

### 1.3 Η χρήση του νερού

Σε διεθνές ζήτημα έχει αναδειχθεί πλέον η εύρεση τρόπων για την ορθότερη χρήση/αξιοποίηση του νερού, καθώς η φυσική του κατανομή έχει ανισότητα τόσο στο χώρο, στη ποσότητα αλλά και στο χρόνο. Πέρα από την υπάρχουσα όμως έλλειψη σταθερότητας στην κατανομή του, επιπρόσθετη αποσταθεροποίηση επιφέρουν και οι δραστηριότητες του ανθρώπου, με σκοπό τη χρήση ή κατανάλωση νερού. Από αυτές, οι κυριότερες σήμερα είναι η βιομηχανική χρήση, η τροφοδότηση των αστικών κέντρων και η γεωργία. Ενδεικτικά, από τη παγκόσμια κατανάλωση νερού, το 23% καταναλώνεται από τη βιομηχανία, το 8% καταναλώνεται στα αστικά κέντρα και το υπόλοιπο 69% τροφοδοτεί τις γεωργικές απαιτήσεις. (Πηγή : Livernash and Seligman, 1992).

Μέχρι και τα μισά του περασμένου αιώνα, οι βασικές δραστηριότητες του ανθρώπου δεν ήταν σε θέση να αποτελέσουν σοβαρή απειλή για τους υδάτινους πόρους και ο φυσικός κύκλος και η διάθεση αυτών αρκούσε για να υπερκαλύψει στις περισσότερες των περιπτώσεων τις υπάρχουσες ανάγκες. Με την ξαφνική έκρηξη της βιομηχανικής επανάστασης και έπειτα όμως, έχουν προκληθεί σοβαρές διαταραχές στους φυσικούς κύκλους, καθώς η ζήτηση και εκμετάλλευση υδάτων, αλλά και η σταδιακή υποβάθμιση πολλών φυσικών αποθεμάτων λόγω της εκθετικά αυξανόμενης ρύπανσης, έχουν δημιουργήσει σοβαρές διαταραχές στους φυσικούς ρυθμούς ροής και ανατροφοδοσίας των υδάτινων πόρων. Επίσης, η δημογραφική έκρηξη, η οικονομική ανάπτυξη και οι συνεχείς τεχνολογικές πρόοδοι σε συνδυασμό με την αλόγιστη ασυδοσία όσον αφορά τη χρήση του νερού, έχουν οδηγήσει σε αρκετές δυσανάλογες καταστάσεις την παγκόσμια κατάσταση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, είναι πως ενώ κατά τον 20ο αιώνα τριπλασιάστηκε ο πληθυσμός της γης, η γενική απαίτηση και χρήση του νερού εξαπλασιάστηκε.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, υπολογίζεται ότι το 70% περίπου του γλυκού νερού που καταναλώνει ο άνθρωπος για τις καθημερινές του ανάγκες χρησιμοποιείται για την άρδευση των καλλιεργειών. Ωστόσο, η κατανομή του νερού στις τρεις δραστηριότητες εξαρτάται από το βαθμό και το είδος της ανάπτυξης της χώρας. Παράλληλα όμως επηρεάζεται τόσο από τις κλιματολογικές συνθήκες όσο και από το είδος των καλλιεργειών (επιλογή νερού και ανάγκες σε νερό, τρόπος άρδευσης, εντατική ή μη γεωργία), οι οποίες προσδιορίζουν τις αρδευτικές απαιτήσεις της χώρας. Στις ανεπτυγμένες βιομηχανικά χώρες, όπως η Αγγλία και η Γερμανία, το μεγαλύτερο ποσοστό του διαθέσιμου νερού διοχετεύεται στη βιομηχανία. Αντίθετα, στις χώρες που η ανεπτυγμένη γεωργία τους στηρίζεται στις αρδευόμενες καλλιέργειες, το περισσότερο νερό διοχετεύεται στη γεωργία. Γενικά η κατανάλωση του νερού για οικιακή χρήση, είναι ανάλογη με το βιοτικό επίπεδο μιας χώρας. Υψηλότερο βιοτικό επίπεδο και μεγαλύτερο κατά άτομο εισόδημα, συνεπάγονται και μεγαλύτερη κατανάλωση νερού (μεγαλύτερα σπίτια, καλύτερες συνθήκες καθαριότητας και υγιεινής, αλλαγή τρόπου ζωής κ.λπ.). Αυτό όμως δεν ισχύει πάντα. Στα σύγχρονα κράτη όπου η Πολιτεία και οι κοινωνίες έχουν συνειδητοποιήσει τη σημασία εξοικονόμησης αυτού του φυσικού πόρου, γίνονται σοβαρές προσπάθειες περιορισμού της χρήσης του ακόμα και σε επίπεδο οικιακής χρήσης. Αυτό προκύπτει και από τους σχετικούς υπολογισμούς του FAO. Οι ΗΠΑ καταναλώνουν μακράν το περισσότερο νερό σε οικιακές χρήσεις (210 κυβ. μέτρα ανά άτομο το χρόνο). Όμως το Ηνωμένο Βασίλειο αποτελεί εξαίρεση και καταναλώνει 35 κυβ. μέτρα ανά άτομο το χρόνο. Ο μέσος Έλληνας αποτελεί έναν από τους πιο σπάταλους πολίτες του κόσμου σε νερό οικιακής χρήσης, χρησιμοποιώντας περίπου 115 κυβ. μέτρα το χρόνο. (Πηγή : Δημήτριος Ηλίας - Η περίπτωση του Νείλου)



Εικόνα 1.3 Κατανομή της χρήσης νερού την περίοδο 1950-2000 (Πηγή : Διαδίκτυο)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Η ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΥΔΑΤΙΚΗ ΚΡΙΣΗ

Εκ πρώτης όψεως θα μπορούσε να συμπεράνει κανείς πως το νερό φαίνεται να είναι ο πλέον ανανεώσιμος πόρος της γης. Με τους ωκεανούς να καλύπτουν περί τα τρία τέταρτα της επιφάνειας της γης περιβάλλοντάς μας και αποτελώντας το 97% του συνολικού αποθέματος νερού, με επίσης αξιοσημείωτη ποσότητα να βρίσκεται στους πάγους και στη χέρσα γη, δεν είναι ίσως τόσο εύκολο να αντιληφθούμε την έννοια της υδατικής κρίσης για την οποία γίνεται ολοένα και περισσότερος λόγος σήμερα.

Το πρόβλημα όμως είναι υπαρκτό και αρκετά πιο σοβαρό απ' ό,τι θα μπορούσε να αντιληφθεί κανείς με μια πρόχειρη ματιά. Για τη σωστή ανάγνωση της υδατικής πραγματικότητας, πρέπει να λάβουμε υπόψιν πως το μεγαλύτερο κομμάτι των υδάτινων πόρων της γης οι οποίοι μπορούν να αξιοποιηθούν, είναι σχεδόν απρόσιτοι και άνισα κατανομημένοι. Σήμερα, όπου όλες οι ανάγκες για νερό, είτε για την βιομηχανία και γεωργία, είτε για αστικές χρήσεις (πόση, τροφοδότηση, πλύσιμο) αυξάνονται και με τη μεταφορά πόσιμου νερού να μην αποτελεί ουσιαστική λύση του προβλήματος, έχει αρχίσει η αναζήτηση νέων προτάσεων και λύσεων. Με 7.5 δισεκατομμύρια ανθρώπους σήμερα στον πλανήτη, την εκτίμηση ο παγκόσμιος πληθυσμός να φτάσει τα 10 δισεκατομμύρια έως το 2050 και τις ανάγκες της ραγδαία αναπτυσσόμενης βιομηχανικής εποχής να αυξάνονται συνεχώς, η μελέτη και πρόληψη για την ορθή διαχείριση του νερού καθίσταται μείζον ζήτημα στο σήμερα.

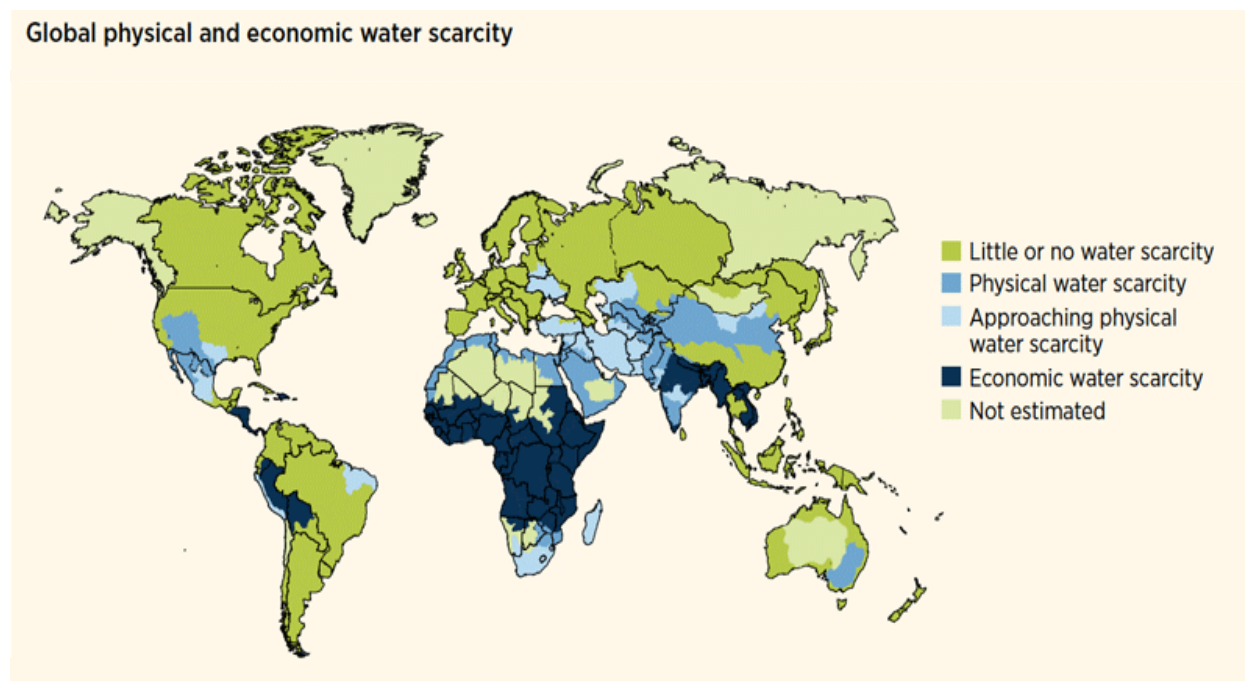
### 2.1 Η κρίση σε παγκόσμιο επίπεδο

Η ποσότητα του πόσιμου-δηλαδή γλυκού-νερού στον πλανήτη δεν είναι απεριόριστη. Το νερό συνολικά να μεν αποτελεί έναν φυσικά ανανεώσιμο πόρο, αλλά το υποσύνολο του καθαρού πόσιμου νερού μειώνεται σταθερά τον τελευταίο αιώνα. Αυτό οφείλεται σε πολλά φαινόμενα και παράγοντες που αλληλεπιδρώντας μειώνουν τα παγκόσμια αποθέματα και στη βάση τους είναι όλα υποπροϊόντα της ανθρώπινης δραστηριότητας. Η εξαντλητική χρήση των φυσικών πόρων για τις ανάγκες της βιομηχανίας, η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και η ολοένα μεγαλύτερη συγκέντρωση αυτού στα αστικά τοπία, καθώς και η συστηματική ρύπανση και αλλοίωση της φυσικής κατάστασης που ακολουθεί σαν συνέπεια των προαναφερθέντων, καθιστούν τους φυσικούς πόρους γλυκού νερού ανεπαρκείς για την κάλυψη των σύγχρονων αναγκών της ανθρωπότητας.

Πολύ σημαντικός παράγοντας που αυξάνει τη ζήτηση νερού είναι η δημογραφική αύξηση που έχει σημειωθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Για να καταλάβουμε το φαινόμενο αυτό, αρκεί να αναλογιστούμε πως ενώ τη δεκαετία του 1950 υπήρχαν 2 δισεκατομμύρια άνθρωποι, πλέον ο παγκόσμιος πληθυσμός ανέρχεται στα 7.5 δισεκατομμύρια και εκτιμάται πως θα φτάσει τα 8 μέχρι το 2020 και τα 10 μέχρι το 2050. Ταυτόχρονα, μέχρι το 2025 περισσότεροι από 1.8 δισεκατομμύρια άνθρωποι εκτιμάται πως δεν θα έχουν πρόσβαση στο αναγκαίο για αυτούς καθαρό νερό, ενώ 2,3 δισεκατομμύρια άνθρωποι θα ζουν σε περιοχές με έλλειψη και ανεπάρκεια καθαρού νερού (Πηγή : Yves Lacoste, 2007).

Όπως όμως έχει ήδη αναφερθεί, πέρα από την ραγδαία αύξηση του πληθυσμού, η επάρκεια των υδατικών πόρων απειλείται και από την κλιματική αλλαγή που διανύουμε. Η αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, η οποία αποκαλείται και φαινόμενο του

θερμοκηπίου, λόγω της αύξησης στην καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας, προκαλεί τρομερές διακυμάνσεις και κυρίως αυξήσεις στις μέσες τοπικές και εποχιακές θερμοκρασίες. Κατά συνέπεια επηρεάζονται και όλοι οι φυσικοί κύκλοι και ισορροπίες, μεταξύ αυτών και ο υδατικός κύκλος. Ενδεικτικά αναφέρουμε τη δημιουργία και επέκταση άνυδρων περιοχών σε περιοχές με μεγάλη συσσώρευση πληθυσμού (αστικά τοπία).



Εικόνα 2.1 Απεικόνιση έλλειψης νερού για φυσικούς ή οικονομικούς λόγους (Πηγή : <https://ncwrs.weebly.com>)

## 2.2 Η κρίση του νερού στην Ελλάδα

Τα δεδομένα στην Ελλάδα, θα μπορούσαν με μια πρώτη ματιά να δημιουργήσουν την εντύπωση πως υπάρχει αφθονία διαθέσιμου νερού. Εμβαθύνοντας όμως και εξετάζοντας τα εγχώρια δεδομένα τοπικά και κατά περίπτωση και όχι συνολικά, προκύπτουν εντελώς διαφορετικά συμπεράσματα. Ενώ η Ελλάδα έχει την υψηλότερη κατά κεφαλήν παροχή νερού στην Μεσόγειο, 6.663 κυβικά μέτρα ανά κάτοικο (πηγή : World Resources Institute, 2007) η υδατική κρίση είναι υπαρκτή και διαφαίνεται εάν ληφθούν υπόψη εγχώρια δεδομένα και εξεταστούν παράλληλα με αρκετούς τοπικούς παράγοντες. Για παράδειγμα, η ζήτηση και η παροχή του νερού σε πολλούς τόπους κυμαίνεται ανάλογα τη χρονική περίοδο και εποχή σε μεγάλο εύρος. Ως χώρα με έντονη τουριστική δραστηριότητα, η ζήτηση πολλών νησιών σε παροχή νερού χαρακτηρίζεται από εποχικότητα ανάλογη αυτού του κλάδου. Επίσης, μπορεί να απαντώνται περιοχές με μεγάλο απόθεμα σε νερό και άλλες με σχεδόν ολική έλλειψη, κάτι το οποίο δεν συμβαδίζει σε πολλές περιπτώσεις με την κατανομή του εγχώριου πληθυσμού.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περιοχή της Αττικής, η οποία ενώ συγκεντρώνει σχεδόν το ήμισυ του ελληνικού πληθυσμού, χαρακτηρίζεται ταυτόχρονα ως φτωχή σε διαθέσιμότητα νερού περιοχή. Εξίσου ενδεικτική περίπτωση αποτελούν τα νησιά του Αιγαίου πελάγους, τα οποία ενώ αποτελούν δημοφιλή προορισμό τόσο εγχώριου όσο και διεθνή τουρισμού, μαστίζονται από έλλειψη πόσιμου νερού κατά τις περιόδους ξηρασίας και

ταυτοχρόνως παρουσιάζουν αύξηση των τουριστικών υποδομών τους, οι οποίες αυξάνουν και τη ζήτηση του νερού. (Πηγή : Δημήτριος Ηλίας - Η περίπτωση του Νείλου)

Ένας δεύτερος παράγοντας που πρέπει να εξεταστεί, είναι αυτός της αγροτικής παραγωγής, η οποία -ενώ η Ελλάδα υπήρξε ανέκαθεν χώρα με αγροτική παραγωγή- έχει αυξηθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες. Αυτό έχει ως άμεση συνέπεια την αύξηση της ποσότητας απαιτούμενου νερού για άρδευση, σε περιοχές οι οποίες δεν μπορούν να ανταποκριθούν σε αυτή με τα φυσικά τους αποθέματα. Φυσικά αποθέματα τα οποία δεν αναπληρώνονται επαρκώς, αφού τελευταία παρατηρείται μείωση των βροχοπτώσεων, η οποία σε συνδυασμό με την αποψίλωση πολλών δασικών εκτάσεων, είτε λόγω πυρκαγιών είτε λόγω άναρχης δόμησης, μειώνει το υδατικό δυναμικό και δημιουργεί προβλήματα λειψυδρίας κατά τόπους. Τέλος, αύξηση έχει σημειωθεί στην ιδιωτική παράνομη άντληση υδάτων, γεγονός το οποίο δυσχεραίνει περαιτέρω την κατάσταση σε πολλές περιοχές.

Με βάση την υπηρεσία AQUASTAT, το 2000 η ετήσια κατανάλωση νερού ήταν 7.760 εκατ. κυβικά μέτρα νερού, από τα οποία το 80.5% διατέθηκε για την άρδευση καλλιεργειών, 16.4% για οικιακή χρήση και μόλις 3.2% στη βιομηχανία. Τα αντίστοιχα στοιχεία για το 2008 όμως, με βάση το Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Υδάτων (ΥΠΕΧΩΔΕ), υπολογίστηκαν στα 8.243 εκατ. κυβικά μέτρα για το έτος εκείνο, με διάθεση 84%, 13% και 3% στην άρδευση, οικιακή χρήση και βιομηχανία αντιστοίχως. Βασική πηγή νερού για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών ήταν οι εκτροπές των ποταμών Αξιού και Αλιάκμονα, λίμνες ή ταμιευτήρες όπως του Πηνειού. (Πηγή: Κουβέλης Σπ. κ.ά., 1994 (προσαρμογή), Κουτσογιάννης Δ. 2007)

### 2.3 Η ανεπάρκεια των λύσεων έως σήμερα

Από τις μέχρι στιγμής προτεινόμενες και χρησιμοποιούμενες λύσεις, όπως η κατασκευή φραγμάτων/δεξαμενών ή η μεταφορά νερού σε περιοχές με έλλειψη, καμία δε φαίνεται να επαρκεί για την ουσιαστική αντιμετώπιση ενός προβλήματος το οποίο διογκώνεται. Για την μεταφορά σε άνυδρες περιοχές απαιτείται μεγάλο κόστος για την τροφοδοσία (η μεταφορά νερού μπορεί να ξεπεράσει και τα 12 ευρώ το κυβικό), ενώ η κατασκευή φραγμάτων/δεξαμενών, πέρα από το κόστος της ίδιας της εγκατάστασης, προϋποθέτει την ύπαρξη φυσικών υδατικών αποθεμάτων, όπως ποτάμια ή χείμαρρους τα οποία τις τελευταίες δεκαετίες αποξηραίνονται ή χάνουν τη δυναμική τους.

Για το λόγο αυτό, υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στις μεθόδους ανακύκλωσης νερού και αφαλάτωσης υδάτων. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται άμεση εξοικονόμηση του διαθέσιμου νερού και μέγιστη απόδοση από τη χρήση του, αλλά και άμεση τροφοδότηση περιοχών στις οποίες υπάρχει η ζήτηση καθαρού νερού αλλά ανεπαρκής κάλυψη στην παροχή.

Η άρδευση, οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής με την ανάγκη τους σε νερό για ψύξη, η χρήση σε βιομηχανικές διεργασίες είναι κάποιες από τις βασικές περιπτώσεις όπου η επαναχρησιμοποίηση νερού κρίνεται αναγκαία και ωφέλιμη λύση. Για την παραγωγή πόσιμου νερού, η αφαλάτωση έχει καταστεί όλο και πιο δημοφιλής λύση, ειδικά σε πολλά από τα νησιά του Αιγαίου, όπου χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση τουριστικών μονάδων ή ακόμα και οικισμών με πόσιμο νερό. (Πηγή : Μιχαλόπουλος Βασίλης, “Θερμοδυναμική ανάλυση συστημάτων Αντίστροφης Όσμωσης για αφαλάτωση θαλασσινού νερού”, 2013)

## 2.4 Εγγώρια αντιμετώπιση της κρίσης

Η διοχέτευση υγρών αποβλήτων των βιομηχανιών καλούνται βιομηχανικά λύματα, ενώ η διοχέτευση των ακάθαρτων νερών σε αποχετεύσεις σπιτιών, καλούνται οικιακά λύματα. στις αποχετεύσεις των σπιτιών, αποκαλούνται οικιακά λύματα. Τόσο τα οικιακά, όσο και τα βιομηχανικά λύματα, έχουν συνήθως σαν τελικό αποδέκτη της διοχέτευσης τους την θάλασσα ή λίμνες και ποτάμια, επιβαρύνοντας την κατάσταση και μολύνοντας το ευρύτερο περιβάλλον. Για το λόγο αυτό υπόκεινται σε επεξεργασία η οποία τα καθιστά αβλαβή και αποτρέπει τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Στην Ελλάδα, η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων σε κατάλληλες μονάδες είναι πλέον υποχρεωτική σε κάθε Δήμο και περιφέρεια και έχει θεσπιστεί και το νομοθετικό πλαίσιο το οποίο υποχρεώνει βιομηχανίες και μονάδες να επεξεργάζονται τα λύματα τους πριν την διοχέτευση αυτών στο περιβάλλον. Αξίζει να σημειωθεί, πως σε πολλές περιπτώσεις πλέον, το προϊόν της επεξεργασίας αυτής επαναχρησιμοποιείται για να καλύψει μικρότερες ανάγκες της εκάστοτε μονάδας, όπως π.χ. πότισμα, αφού μετά την επεξεργασία έχει επαρκή για χρήση ποιοτικά χαρακτηριστικά.

Δύο μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων λειτουργούν στην Αττική. Η μια βρίσκεται στην περιοχή της Μεταμόρφωσης, όπου επεξεργάζονται τα λύματα των βορείων προαστίων. Η δεύτερη βρίσκεται στο νησί Ψυττάλεια, στην οποία οδηγούνται τα λύματα της υπόλοιπης Αττικής και έπειτα από ένα στάδιο αρχικής επεξεργασίας καταλήγουν στη μονάδα του νησιού για την τελική τους επεξεργασία προτού καταλήξουν καθαρά πλέον στη θάλασσα. (Πηγές : <http://www.env-edu.gr>, <https://www.eydap.gr/>).

Τα νησιά της ελληνικής περιφέρειας, αντιμετωπίζουν μεγάλο πρόβλημα στην τροφοδοσία τους με πόσιμο νερό, τόσο λόγω της έλλειψης αυτών σε φυσικούς υδάτινους πόρους, όσο και λόγω της έλλειψης υδρευτικών υποδομών σε πολλά από αυτά. Αυτό προκαλεί προβλήματα τόσο στην αναπτυξιακή δυνατότητα αυτών, καθώς και δυσχεραίνει τη διαβίωση των κατοίκων σε αυτά, οι οποίοι συχνά αντιμετωπίζουν περιορισμούς και περιοδικές ελλείψεις σε πόσιμο νερό ή νερό για ύδρευση. Οι μονάδες αφαλάτωσης στις περιπτώσεις αυτές έχουν αναδειχθεί ως η μόνη θεμιτή λύση για την επεξεργασία και παραγωγή πόσιμου ή εκμεταλλεύσιμου νερού στα ελληνικά νησιά.

Όπως έχει αναφερθεί, κομβικής σημασίας παράγοντας είναι η εποχικότητα στη ζήτηση που χαρακτηρίζει πολλά νησιά, λόγω της έντονης τουριστικής προσέλευσης και δραστηριοποίησης κατά τους μήνες της τουριστικής περιόδου. Η εποχική αυτή κίνηση, αυξάνει απότομα την ζήτηση σε νερό και δίχως τις κατάλληλες υποδομές αποσταθεροποιεί την παροχή νερού, τόσο σε μονάδες και επιχειρήσεις τουριστικού ενδιαφέροντος, αλλά μπορεί να δημιουργήσει και κρίσιμης σημασίας ελλείψεις σε βασικές κοινοτικές δομές, όπως νοσοκομεία κ.ά. Τις τελευταίες δεκαετίες, παρατηρούμε αύξηση στη χρήση της αφαλάτωσης στα νησιά του Αιγαίου κυρίως, τα οποία αντιμετωπίζουν τις μεγαλύτερες δυσκολίες και ελλείψεις. Η στροφή στην αφαλάτωση αντί των προγενέστερων τρόπων αντιμετώπισης, φέρει αρκετά “πράσινα” χαρακτηριστικά, καθώς απεμπλέκει την τροφοδοσία των νησιών από ενεργοβόρα δρομολόγια πλοίων για τη μεταφορά πόσιμου νερού. Ολοκληρωμένες μονάδες αφαλάτωσης υφίστανται ήδη στα νησιά Πάτμο, Λέρο, Καστελόριζο, Δονούσα, στην Αιγιάλη Αμοργού, Τέλενδο, Ψέριμο και Αρκιούς, όπου έχουν αντικαταστήσει το μεγαλύτερο ποσοστό τροφοδότησης με υδροφόρα πλοία. Σε εξέλιξη βρίσκεται επίσης η διαδικασία για τη δημιουργία εγκαταστάσεων αφαλάτωσης σε πολλά άλλα άνυδρα νησιά, όπως Ηρακλειά, Λειψοί, Κατάπολα Αμοργού, Αγαθονήσι και Κίμωλο. Για τη δημιουργία υποδομών στα νησιά αυτά, αξιοποιούνται πόροι

του ΕΣΠΑ 2014-2020 καθώς και του προγράμματος Δημοσίων Επενδύσεων (Πηγή : <http://greenagenda.gr/>)

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Η ΙΔΕΑ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ**

Όπως παρουσιάστηκε στο πρώτο κεφάλαιο, η παγκόσμια ποσότητα γλυκού νερού είναι περιορισμένη και χαρακτηρίζεται από άνιση και χρονικά μεταβλητή κατανομή. Ένα από τα μεγαλύτερα ανερχόμενα προβλήματα σε παγκόσμιο επίπεδο, είναι η επερχόμενη “κρίση του νερού”, όπως παρουσιάστηκε στο δεύτερο κεφάλαιο, η οποία εκτιμάται πως θα λάβει τεράστιες διαστάσεις εάν δεν υπάρξει η απαιτούμενη μέριμνα και ο ανάλογος σχεδιασμός. Για τον λόγο αυτό, αναζητούνται διαρκώς λύσεις, τόσο σε τεχνολογικό επίπεδο για την παραγωγή γλυκού νερού, όσο και σε κοινωνικό για τη σωστή διαχείριση του υπάρχοντος.

Ανάμεσα σε αρκετές προτάσεις και εφαρμογές, η τεχνολογία της αφαλάτωσης φαίνεται να είναι η επικρατέστερη και με τη συμβολή της τεχνολογικής ανάπτυξης των τελευταίων δεκαετιών και την παράλληλη άνθιση των τεχνολογιών αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την τροφοδότηση μονάδων αφαλάτωσης, η εν λόγω τεχνολογία έχει εδραιωθεί ως μια αρκετά ελπιδοφόρα προσέγγιση για την επίλυση της αναμενόμενης υδατικής κρίσης.

### **3.1 Εισαγωγή στην αφαλάτωση**

Ο όρος αφαλάτωση αναφέρεται στην διαδικασία επεξεργασίας αλμυρού ή υφάλμυρου νερού, με σκοπό την απομάκρυνση των αλάτων από αυτό ώστε να καθίσταται αξιοποιήσιμο για οικιακές ή δημοτικές ανάγκες.

Η τεχνολογία της αφαλάτωσης περιλαμβάνει αρκετές διαφορετικές μεθόδους, ώστε να επιτευχθεί είτε η απομάκρυνση των αλάτων από το νερό, είτε σε κάποιες περιπτώσεις το αντίστροφο. Σημειώνεται, πως πόσιμο νερό ορίζεται αυτό με περιεκτικότητα έως 500 ppm σε ολικά διαλυτά στερεά, από 500 έως 10.000 ppm ορίζεται ως υφάλμυρο, ενώ για περιεκτικότητα μεγαλύτερη των 10.000 ppm αποτελεί πλέον θαλασσίνο νερό. Προφανές είναι πως το αφαλατωμένο νερό έχει μεγαλύτερο κόστος από την τροφοδοσία με φυσικό νερό.

Το θαλασσίνο νερό, με την υψηλή περιεκτικότητά του σε διαλυμένες ουσίες, δεν είναι ποιοτικά κατάλληλο για τη συντήρηση καλλιεργειών, πόσο μάλλον της ανθρώπινης ζωής. Για την τροφοδότηση νερού μιας κοινωνίας, κατάλληλο θεωρούνταν μόνο νερό με περιεκτικότητα μικρότερη των 1000 mg/L, το οποίο αποτελούσε σοβαρό περιορισμό για την ανάπτυξη μιας κοινότητας παγκοσμίως. Σήμερα όμως, κυρίως χάρη στην ύπαρξη των τεχνολογιών της αφαλάτωσης θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού, τα δεδομένα έχουν αλλάξει. Η αφαλάτωση έχει καταστήσει εφικτή τη δημιουργία κοινοτήτων ή ακόμα και βιομηχανικών μονάδων μεγάλης έκτασης ακόμα και σε άνυδρες περιοχές, προσφέροντας ουσιαστική και βιώσιμη λύση για την τροφοδότηση αυτών με αξιοποιήσιμο νερό.

### **3.2 Ιστορική αναδρομή της αφαλάτωσης**

Η αφαλάτωση σαν ιδέα δεν αποτελεί σύγχρονη καινοτομία, καθώς οι πρώτες μέθοδοι για τον διαχωρισμό των αλάτων από το νερό έχουν αναπτυχθεί και παρατηρηθεί από τα αρχαία χρόνια.



Παρακάτω παρουσιάζεται μια σύντομη ανασκόπηση της ιστορικής εξέλιξης της αφαλάτωσης, από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα.

- Το 350 π.χ. : πειραματισμοί για τον διαχωρισμό του αλατιού από το νερό από τον Αριστοτέλη.
- Το 200 μ.χ. : ιστορικά ντοκουμέντα αναφέρουν μικρές μονάδες αφαλάτωσης σε πλοία της εποχής.
- Τον 16ο αιώνα : μονάδες αφαλάτωσης για έκτακτη ανάγκη μεταφέρονται σε πλοία εξερευνητών της εποχής.
- Το 1850 μ.χ. : κατοχυρώνονται πατέντες για την απόσταξη της ζάχαρης με σκοπό τη μείωση της απαιτούμενης ενέργειας από τον Αμερικανό μηχανικό Norbert Rillieux.
- Το 1890 μ.χ. : κατασκευές μεγάλων μονάδων αφαλάτωσης στη δυτική Αυστραλία για την αντιμετώπιση του ξηρού κλίματος της περιοχής.
- Τέλος 19ου αιώνα : η μέθοδος του Rillieux για την απόσταξη ζάχαρης βρίσκει εφαρμογή στην αφαλάτωση νερού.
- Το 1950 μ.χ. : ιδρύεται για την υποστήριξη της έρευνας των τεχνολογιών αφαλάτωσης το τμήμα αλμυρού νερού της Αμερικανικής κυβέρνησης.
- Το 1950 μ.χ. : σε χώρες της Μέσης Ανατολής παρουσιάζεται και αρχίζει τη λειτουργία της μια πρόσφατη μέθοδος αφαλάτωσης με θερμικές μεθόδους.
- Το 1960 μ.χ. : κατασκευάζονται οι πρώτες μεμβράνες με σκοπό τη μελέτη της αντίστροφης όσμωσης στο πανεπιστήμιο UCLA της Καλιφόρνιας.
- Το 1965 μ.χ. : παρουσιάζεται η πρώτη πειραματική μονάδα αντίστροφης όσμωσης για την αφαλάτωση υφάλμυρου νερού.
- Το 1970 μ.χ. : ο John Cadotte παρουσιάζει σημαντικά βελτιστοποιημένα μοντέλα μεμβρανών για αντίστροφη όσμωση.
- Το 1980 μ.χ. : ξεκινάει την λειτουργία της η πρώτη παγκοσμίως μονάδα αφαλάτωσης στο Jeda, με σκοπό τη δημόσια τροφοδότηση της περιοχής.
- Την περίοδο 1990-2003 μ.χ. : σημειώνονται σημαντικές μειώσεις στο κόστος των μονάδων αφαλάτωσης, στο ένα τρίτο του μέχρι τότε κόστους.
- Το 2006 μ.χ. : διεξαγωγή μελέτης για τη χρήση ναοσωλήνων άνθρακα για παραγωγή καθαρού νερού από το περιοδικό Science. Ταυτόχρονα διερευνάται από το Pacific Institute η αφαλάτωση και οι ενδεχόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτής.
- Το 2007 μ.χ. : δημιουργείται η πρώτη παγκοσμίως πλωτή μονάδα αφαλάτωσης στην Ηρακλεία.
- Το 2008 μ.χ. : η Siemens Water Technologies R&D (RWD) αναλαμβάνει από τη κυβέρνηση Σιγκαπούρης την διεξαγωγή έρευνας για την παραγωγή πόσιμου νερού με την τεχνολογία της ηλεκτροδιάλυσης, ώστε να επιτευχθεί ενεργειακή κατανάλωση κατά 65% μικρότερη των τότε μονάδων.
- Το 2009 μ.χ. : ανακοινώνεται η χρήση ηλιακής ή άλλων μορφών ενέργειας για την αφαλάτωση με κατευθυνόμενο ρεύμα ιόντων, από την канаδική Saltworks Technologies.
- Το 2010 μ.χ. : απονέμεται το βραβείο καινοτομίας στην εταιρεία nanH2O για την κατασκευή μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης οι οποίες υπολογίζεται να μειώσουν κατά 25% τα κόστη λειτουργίας των υφιστάμενων μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση.

(Πηγή : Φιλελεύθερο Ζάντε, Αφαλάτωση: 'Μάννα' εκ θαλάσσης)

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3, η ιστορία της αφαλάτωσης είναι πλούσια στην μελέτη και ανάπτυξη διαφορετικών μεθόδων για την παραγωγή καθαρού νερού. Κάθε μέθοδος χαρακτηρίζεται από μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα και δεν είναι εύκολο να δοθεί μια απάντηση στο ποιά αποτελεί την πιο αξιόπιστη ή την πιο αποδοτική. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία στις τεχνολογίες αφαλάτωσης, μπορούμε όμως να κατηγοριοποιήσουμε τις περισσότερες από αυτές σε δύο μεγάλες κατηγορίες, αυτές των μεθόδων αλλαγής φάσης, ή αλλιώς θερμικές κατεργασίες, και στις μεθόδους μιας φάσης, δηλαδή τις μεθόδους αφαλάτωσης με χρήση μεμβρανών. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι κύριες μέθοδοι αφαλάτωσης που έχουν αναπτυχθεί και βρίσκονται σε χρήση σήμερα, καθώς και μια σύγκριση μεταξύ αυτών.

### 4.1 Θερμικές κατεργασίες αφαλάτωσης (αλλαγής φάσης)

Στις θερμικές κατεργασίες αφαλάτωσης, ατμοποιείται το αλμυρό ή υφάλμυρο νερό για τον διαχωρισμό του από τα άλατα και έπειτα υγροποιείται για την συλλογή καθαρού πλέον νερού. Πηγή θερμικής ενέργειας για τις κατεργασίες αυτές αποτελούν συνήθως η ηλιακή ενέργεια, διάφορα ορυκτά καύσιμα ή ακόμα και η πυρηνική ενέργεια. Οι θερμικές κατεργασίες χωρίζονται στις εξής βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την αλλαγή της φάσης του αλμυρού/υφάλμυρου νερού.

- Πολυβάθμια εκτόνωση (Multi-Stage flash distillation - MSF)
- Εξάτμιση πολλαπλών βαθμίδων (Multi-Effect evaporation ή Distillation - ME ή MED)
- Εξάτμιση με συμπίεση ατμών (Mechanical vapor compression - MVC ή VC)
- Ηλιακή απόσταξη (Solar Distillation)

#### 4.1.1 Πολυβάθμια εκτόνωση (MSF)

Η πολυβάθμια εκτόνωση είναι διαδικασία αφαλάτωσης η οποία μπορεί να παράγει γλυκό νερό σε χαμηλές συγκεντρώσεις άλατος, ποιότητας ακόμα και έως 10 ppm ή σε κάποιες περιπτώσεις μικρότερη. Αποτελεί κατάλληλη διαδικασία για παραγωγή καθαρού νερού σε μεγάλες ποσότητες, έως και 60.000 κυβ. μέτρα και χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό για το ρεύμα τροφοδοσίας της.

Η διαδικασία αποτελείται από μια σειρά θαλάμων διαφορετικής πίεσης. Ο πρώτος θάλαμος βρίσκεται σε πίεση χαμηλότερη αυτής του κορεσμού του νερού και το θαλασσινό νερό, το οποίο προηγουμένως έχει θερμανθεί σε θερμοκρασία μικρότερη αυτής του σημείου βρασμού του, με την είσοδό του στον πρώτο θάλαμο ατμοποιείται. Ο υδρατμός, ερχόμενος σε επαφή με τους κρύους σωλήνες τροφοδοσίας θαλασσινού νερού, υγροποιείται πάλι και συλλέγεται. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και στους επόμενους θαλάμους σε μικρότερη συνεχώς πίεση, για τον πλήρη σχεδόν διαχωρισμό καθαρού νερού από την άλμη.

Συνήθως εγκαταστάσεις πολυβάθμιας εκτόνωσης βρίσκονται κοντά σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, ώστε να υπάρξει εξοικονόμηση και καλύτερη αξιοποίηση στο απαιτούμενο καύσιμο για τη θέρμανση του νερού. Έτσι, μπορεί να αξιοποιηθεί ο ατμός υψηλής πίεσης και από τον θερμοηλεκτρικό σταθμό αλλά και από τη μονάδα αφαλάτωσης. Εγκαταστάσεις πολυβάθμιας

εκτόνωσης είναι διαδεδομένες ιδιαίτερα στις περιοχές της Μέσης Ανατολής και αποτελούν σχεδόν το 40% της παγκόσμιας αφαλάτωσης.



Εικόνα 4.1.1 Εγκατάσταση πολυβάθμιας εκτόνωσης στη Σαουδική Αραβία (Πηγή : Καραγάλιου,2010)

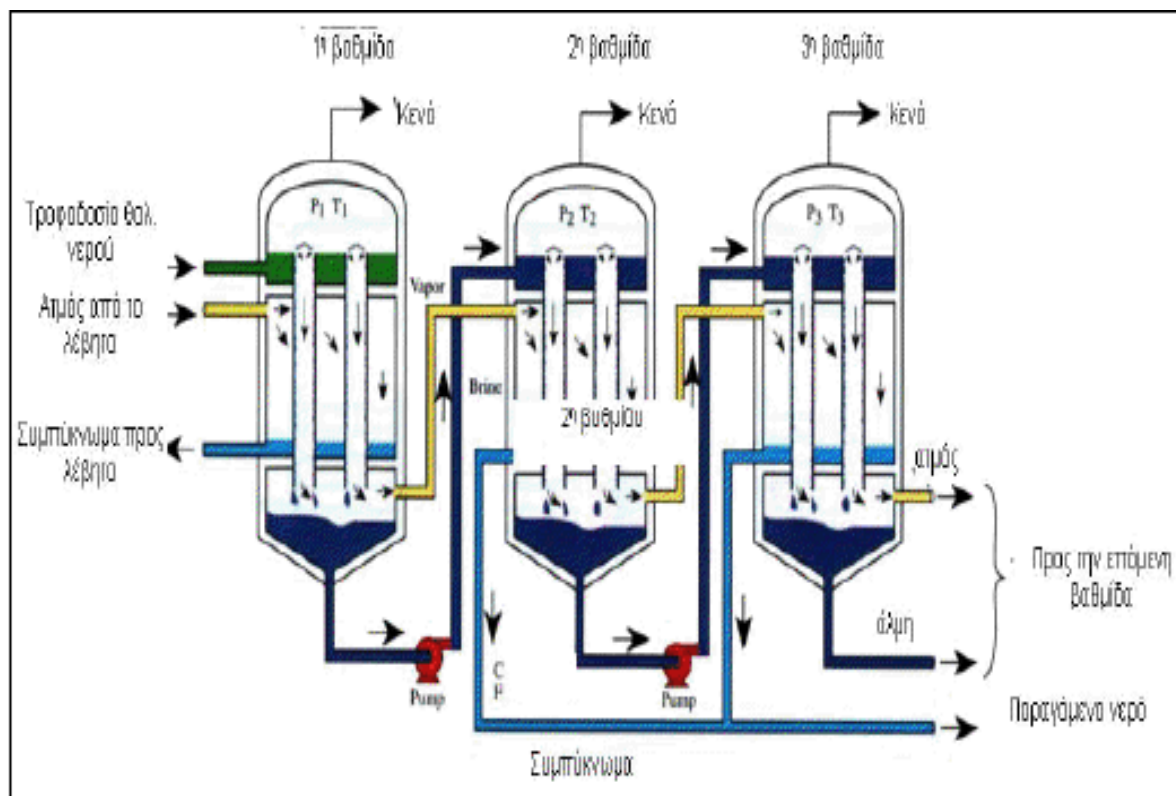
#### 4.1.2 Εξάτμιση πολλαπλών βαθμίδων (MED)

Η αφαλάτωση με εξάτμιση πολλαπλών βαθμίδων χρησιμοποιείται εδώ και 100 χρόνια με μεγάλη επιτυχία. Με την εμφάνιση της μεθόδου πολυβάθμιας εκτόνωσης έχασε έδαφος στην ευρεία χρήση, το οποίο όμως ξανακερδίστηκε αφού εμφανίζει μεγαλύτερο ολικό βαθμό απόδοσης, όπως αναδείχθηκε σε σειρά μελετών και πειραμάτων. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι μια θερμική μέθοδος η οποία έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για περισσότερα από 100 χρόνια και είναι ουσιαστικά προγενέστερη της πολυβάθμιας εκτόνωσης. Είχε σταματήσει να εφαρμόζεται αφού αντικαταστάθηκε από την πολυβάθμια εκτόνωση όμως αρχίζει ξανά να κερδίζει έδαφος καθώς ο βαθμός απόδοσης της είναι καλύτερος από αυτόν της πολυβάθμιας εκτόνωσης.

Η κάθε βαθμίδα και τα συστήματα που την αποτελούν, δηλαδή ο λέβητας θέρμανσης, ο συμπυκνωτής, ο αποστακτήρας και ο διαχωριστής, συγκροτούν ένα αρκετά ενεργοβόρο σύστημα. Με σκοπό τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση και οικονομία της αναγκαίας για την εξάτμιση θερμότητας, τα συστήματα εμπεριέχουν συνήθως πολλές βαθμίδες στη σειρά, με συνεχή παραγωγή καθαρού νερού και προώθηση της άλμης από τη μια βαθμίδα στην επόμενη (Εικόνα 4.1.2).

Η μέθοδος αυτή ξεκινάει με την εισαγωγή του ατμού θέρμανσης στην πρώτη βαθμίδα, με σκοπό να θερμανθεί το αλμυρό νερό μέχρι το σημείο βρασμού του. Οι παραγόμενοι υδρατμοί της πρώτης βαθμίδας χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση της άλμης στην επόμενη βαθμίδα, η οποία βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία και πίεση ώστε να επιτευχθεί ο βρασμός και η ατμοποίηση και σε αυτήν. Βασικά εξαρτήματα των συστημάτων αυτών είναι δέσμες σωλήνων σε κατάλληλη διάταξη, είτε οριζόντια είτε κατακόρυφα, και περιβλήματα διαφόρων προδιαγραφών που περιβάλλουν τους σωλήνες.

Πολύ συχνά συναντάμε και τη χρήση μηχανικών ή θερμικών συμπιεστών οπότε και η ολική απόδοση του συστήματος εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των συνεχόμενων βαθμίδων που αποτελούν τη διάταξη. Παραλλαγές της μεθόδου προκύπτουν επίσης από τον συνδυασμό της οριζόντιας ή κάθετης διάταξης σωλήνων, με τη φορά της ροής του ατμού σχετικά με τη φορά ροής της άλμης μέσα στο σύστημα (Πηγή : Σαμακίδης 2009, Δαγκαλίδης 2009).



Εικόνα 4.1.2 Σχηματική απεικόνιση της πολυβάθμιας εξάτμισης (Πηγή : Καραχάλιου,2010)

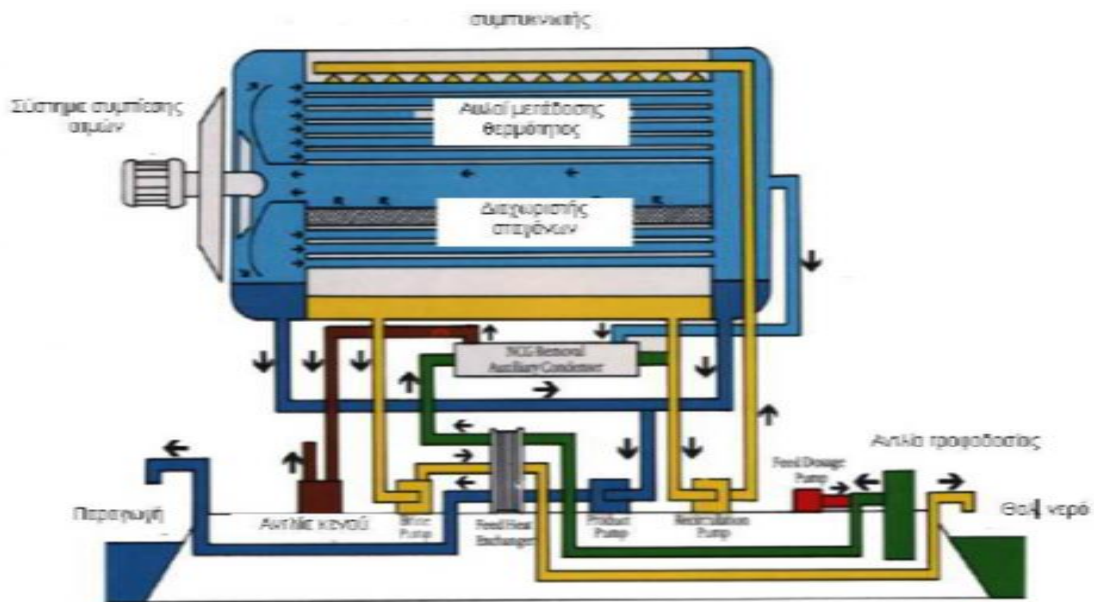
### 4.1.3 Εξάτμιση με συμπίεση ατμών (MVC, TVC)

Η μέθοδος της εξάτμισης με συμπίεση ατμών, αποτελεί απλούστερη μέθοδο από τις προαναφερθείσες. Αποτελεί διαδικασία απόσταξης, όπου όπως και στις άλλες θερμικές μεθόδους, χρησιμοποιείται ο υδρατμός που προκύπτει από την εξάτμιση του αλμυρού νερού. Ο υδρατμός αυτός έπειτα συμπιέζεται, είτε με μηχανική διάταξη συμπίεστή (MVC, εικόνα 4.1.3(α)) είτε με θερμική διάταξη μέσω εκτοξευτήρα ατμού (TVC, εικόνα 4.1.3(β)).

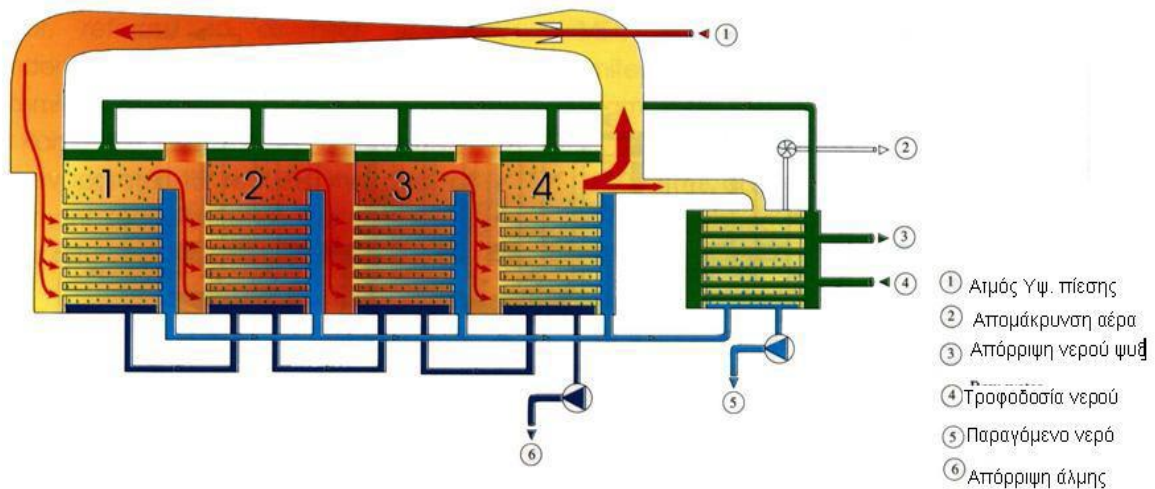
Μετά τη δημιουργία του αρχικού υδρατμού, το θαλασσινό νερό συμπιέζεται ώστε να χρησιμοποιηθεί για την περαιτέρω παραγωγή ατμού, δίχως την ανάγκη ύπαρξης πηγής θερμότητας. Το αλμυρό νερό ψεκάζεται στους σωλήνες όπου ρέει ο συμπιεσμένος ατμός, θερμαίνεται και εξατμίζεται. Την εξάτμιση και συλλογή καθορίζει η ύπαρξη συμπίεστή, ο οποίος δημιουργεί υποπίεση για την διευκόλυνση της εξάτμισης και έπειτα συλλέγει τους υδρατμούς και τους διοχετεύει υπό υψηλότερη πίεση στους σωλήνες ροής, στους οποίους συμπυκνώνονται αφού έρχονται σε επαφή με το ψυχρό νερό τροφοδοσίας. Τα συμπυκνώματα αυτά αποτελούν καθαρό νερό, το οποίο συλλέγεται κατάλληλα και αποτελεί και το τελικό προϊόν της διάταξης.

Βασική διαφορά και πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής, είναι η έλλειψη ανάγκης για αναθέρμανση του διαλύματος, άρα και πηγής θερμότητας. Βασική πηγή ενέργειας για την εξάτμιση και λειτουργία του συστήματος αποτελεί ο συμπίεστής και με σωστή διάταξη ώστε να ανακυκλώνεται σωστά η λανθάνουσα θερμοκρασία του υδρατμού το σύστημα δίνει υψηλή

απόδοση. Η απόδοση ωστόσο μεταβάλλεται με το μέγεθος της μονάδας και της διάταξης, καθιστώντας τη μέθοδο αυτή αποτελεσματική για μονάδες μικρού ή μεσαίου μεγέθους.



Εικόνα 4.1.3(α) Σχηματική απεικόνιση της εξάτμισης με μηχανική συμπίεση ατμών (Πηγή: Μανολάκος, 2008)



Εικόνα 4.1.3(β) Σχηματική απεικόνιση της εξάτμισης με θερμική συμπίεση ατμών (Πηγή: Μανολάκος, 2008)

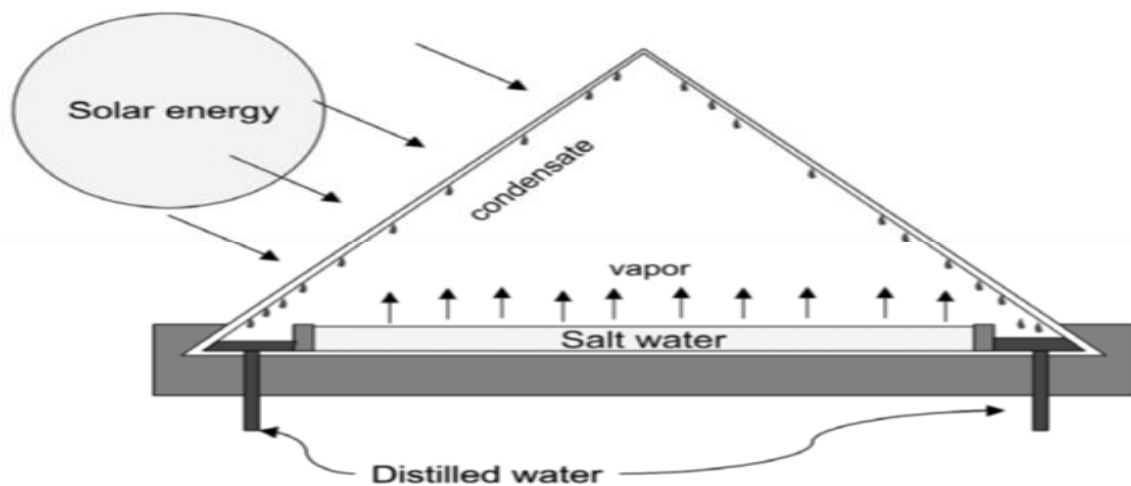
#### 4.1.4 Ηλιακή απόσταξη (Solar Distillation)

Η μέθοδος της ηλιακής απόσταξης, χρησιμοποιεί για την ατμοποίηση του διαλύματος την ηλιακή ενέργεια και βασίζεται στην αρχή του θερμοκηπίου. Δεν απαιτεί δηλαδή κάποια εξωτερική πηγή θερμικής ενέργειας, αλλά κάνει αποκλειστική χρήση της ακτινοβολίας του ήλιου. Αυτό έχει σαν άμεσο αποτέλεσμα την δραματική μείωση του κόστους λειτουργίας των

μονάδων που πραγματοποιούν ηλιακή απόσταξη, καθώς και το μηδενισμό των ρύπων που παράγονται από αυτές.

Η αρχή του θερμοκηπίου, βασίζεται στην διέλευση των ακτίνων του ήλιου μέσω διαφανούς στρώματος της διάταξης, με σκοπό τη θέρμανση του θαλασσινού νερού που βρίσκεται στο κάτω στρώμα αυτής. Το νερό εξατμίζεται εξαιτίας της απότομης αλλαγής στη θερμοκρασία και ο υδρατμός ανεβαίνει μέχρι την οροφή της διάταξης όπου και συμπυκνώνεται και λόγω της κλίσης της οροφής και με τη χρήση πάντα κατάλληλης συλλεκτικής διάταξης, παράγει το τελικό προϊόν το οποίο δεν είναι τίποτε άλλο από καθαρό νερό. Μονάδες ηλιακής απόσταξης, έχουν κυμαινόμενες θερμοκρασίες λειτουργίας, με τη μέγιστη αυτών κατά τους θερινούς μήνες να αγγίζει τους 55 βαθμούς κελσίου.

Σημειώνεται, πως ενώ το λειτουργικό κόστος των μονάδων αυτών είναι σχεδόν μηδαμινό, απαιτείται ωστόσο το αρχικό κεφάλαιο για την εγκατάστασή τους, το οποίο ακόμα και με την επιλογή φθηνών υλικών, εξαιτίας της μεγάλης έκτασης που απαιτείται για να υπάρχει μεγάλη παραγωγή ποσότητας καθαρού νερού (3.5 λίτρα ανά τετραγωνικό πυθμένα), πρέπει να ληφθεί υπόψη. Επίσης, το παραγόμενο νερό χρήζει και περαιτέρω επεξεργασίας, με σκοπό την απομάκρυνση μικροοργανισμών ώστε να λάβει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά πόσιμου νερού.



Εικόνα 4.1.4 Σχηματική απεικόνιση της ηλιακής απόσταξης (Πηγή : Κωνστανίνα Δ. Τζιβάρα, 2011)

## 4.2 Κατεργασίες αφαλάτωσης με χρήση μεμβρανών (μιας φάσης)

Οι μέθοδοι κατά τις οποίες το αλμυρό νερό παραμένει στην υγρή του φάση, καλούνται μιας φάσης και χρησιμοποιούν μεμβράνες για να ξεχωρίσουν τα άλατα από το υδατικό διάλυμα. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι κυριότερες μέθοδοι αυτής κατηγορίας, οι οποίες είναι :

- Η Αντίστροφη Όσμωση (Reverse Osmosis - RO)
- Η Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis - ED)
- Η Αντίστροφη Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis Reversal - EDR).

### 4.2.1 Αντίστροφη Όσμωση (Reverse Osmosis – RO)

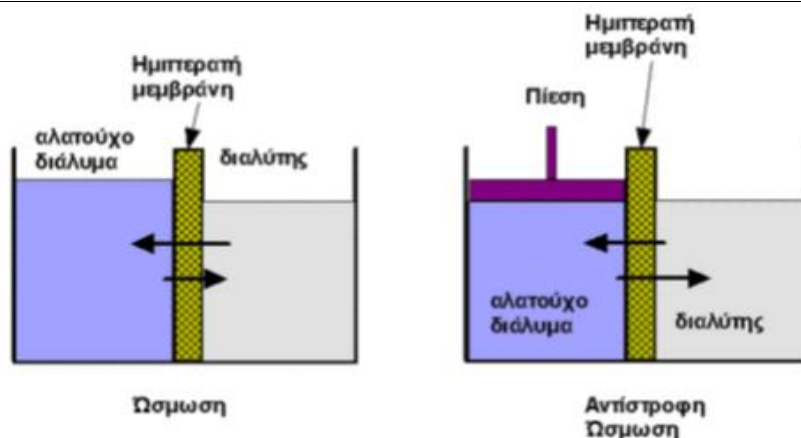
Όπως προδίδει και το όνομα της μεθόδου, η διεργασία αυτή βασίζεται στο φυσικό φαινόμενο της όσμωσης. Κατά το φαινόμενο αυτό, ένα αραιό διάλυμα (διαλύτης) κινείται φυσικά προς ένα πυκνότερο (διαλυμένη ουσία) μέχρι την επίτευξη ισορροπίας. Η κίνηση αυτή του διαλύτη πραγματοποιείται μέσω ημιπερατής μεμβράνης η οποία επιτρέπει την διέλευση μόνο των μορίων του διαλύτη και όχι της διαλυμένης ουσίας. Κατά το φαινόμενο αυτό, η απαιτούμενη πίεση για την ύπαρξη του φαινομένου καλείται οσμωτική πίεση. Δίχως αυτή ή την ύπαρξη μεμβράνης, τα διαφορετικής περιεκτικότητας διαλύματα απλώς θα αναμιγνύονταν.

Εάν όμως ασκηθεί πίεση μεγαλύτερη της οσμωτικής στην πλευρά του πυκνότερου διαλύματος, τότε η ροή της όσμωσης αντιστρέφεται με αποτέλεσμα την ροή διαλύτη από το πυκνότερο διάλυμα στο αραιότερο. Το φαινόμενο αυτό καλείται αντίστροφη όσμωση και στην περίπτωση που το πυκνό διάλυμα αποτελεί υδατικό διάλυμα αλάτων (θαλασσινό νερό), τότε η ροή προς το αραιό μας δίνει διάλυμα νερού ολοένα και μικρότερης περιεκτικότητας σε άλατα. (Εικόνα 4.2.1)

Στις διατάξεις αντίστροφης όσμωσης, μια αντλία υψηλής πίεσης διοχετεύει αλμυρό ή υφάλμυρο νερό σε ένα δοχείο υψηλής πίεσης. Εκεί, το νερό προωθείται μέσω των ημιπερατών μεμβρανών, οι οποίες συγκρατούν τα άλατα και επιτρέπουν την διέλευση καθαρού νερού. Έτσι επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός της τροφοδοσίας σε άλμη, δηλαδή το παραμένον διάλυμα υψηλής περιεκτικότητας, και στο επιθυμητό προϊόν, δηλαδή καθαρό νερό.

Η άλμη κατά την λειτουργία της διάταξης αυξάνει συνεχώς την περιεκτικότητά της, το οποίο αυξάνει και την οσμωτική πίεση του συστήματος. Για τον λόγο αυτό χρήζει απομάκρυνσης από την διάταξη, διαφορετικά αυξάνονται οι απαιτήσεις σε ενέργεια ώστε να μπορέσει να ασκηθεί μεγαλύτερη πίεση στην πλευρά της άλμης για την ροή του καθαρού νερού. Αυτό θα αύξανε τις ενεργειακές απαιτήσεις της διάταξης και για τον λόγο αυτό η άλμη σε κατάλληλα σημεία και χρόνους της διάταξης απομακρύνεται.

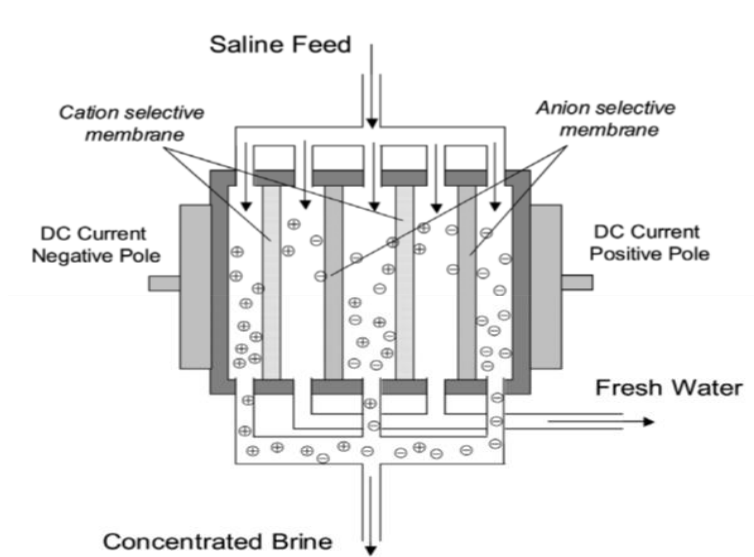
Η αρχική περιεκτικότητα του νερού τροφοδοσίας, η επιθυμητή ποιότητα του προϊόντος καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της διάταξης καθορίζουν την απόδοση αυτής. Με βάση αυτές τις παραμέτρους, οι διατάξεις αυτές μπορούν να αποδώσουν από 30% έως και 85% καθαρό νερό κατ' όγκο νερού τροφοδοσίας.



Εικόνα 4.2.1 Το φαινόμενο της όσμωσης (Πηγή : Mark Wilf, (2007), *The guidebook to Membrane Desalination Technology. Reverse Osmosis*)

#### 4.2.2 Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis - ED)

Η μέθοδος αυτή κάνει χρήση της ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή καθαρού νερού και χρησιμοποιείται στην βιομηχανία από το 1960. Το αλμυρό νερό τροφοδοσίας διέρχεται μέσα από αρκετές διατάξεις μεμβρανών κατάλληλα φορτισμένων, με σκοπό την συγκράτηση των ιόντων της διαλυμένης ουσίας. Τα ιόντα αυτά, δεν είναι τίποτα παραπάνω από θετικά ή αρνητικά ηλεκτρικά φορτισμένα ιόντα μετάλλων, τα οποία με την κατάλληλη φόρτιση των μεμβρανών διαχωρίζονται από το διάλυμα επιτυγχάνοντας την αραιώση αυτού. Ένα υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου παραδείγματος χάριν, αποτελείται από μια υδατική μάζα ιόντων χλωρίου και νατρίου. Με την εφαρμογή μιας ηλεκτρικής τάσης δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο έλκει τα ιόντα του διαλύματος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την εισαγωγή δύο ηλεκτροδίων στο διάλυμα, τα οποία δημιουργούν την τάση. Τα ηλεκτρικά φορτισμένα ιόντα έλκονται από το ηλεκτρόδιο με αντίθεση από αυτά φόρτιση. Στην εφαρμογή της αφαλάτωσης, η διάταξη περιλαμβάνει δύο διαχωριστικές μεμβράνες, και στα πλευρικά τοιχώματα τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια. Αυτά συνδέονται με μια πηγή συνεχούς ρεύματος για τη δημιουργία του αναγκαίου πεδίου και η διάταξη τροφοδοτείται με το αλμυρό/υφάλμυρο νερό.





*Εικόνα 4.2.2 Σχηματική απεικόνιση της ηλεκτροδιάλυσης (Πηγή : Μουτάφης Παναγιώτης, «Κάλυψη ζήτησης ενέργειας και νερού με αιολική ενέργεια και αφαλάτωση στη νήσο Σίκινο»*

Κατά την ροή που δημιουργείται, τα ιόντα του νερού διαπερνούν τις μεμβράνες και προωθούνται στη διάταξη, ενώ τα ιόντα της διαλυμένης ουσίας προσκολλώνται στις διαχωριστικές μεμβράνες. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται το επιθυμητό προϊόν, δηλαδή νερό χαμηλότερης περιεκτικότητας σε άλατα. Για τη σωστή λειτουργία της διάταξης, αντιστρέφονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα οι πόλοι του πεδίου, ώστε να επιτυγχάνεται με αυτόν τον τρόπο ο καθαρισμός των πεδίων από τα άλατα μέσω της ροής του καθαρού νερού. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου, είναι προφανώς πως δεν μπορεί να έχει εφαρμογή σε μη ιοντικά διαλύματα. Επίσης, επειδή η απαιτούμενη ενέργεια για την ικανοποιητική ροή των ιόντων είναι ευθέως ανάλογη της συγκέντρωσης αλάτων στο διάλυμα, δηλαδή της αλατότητας αυτού, συνήθως επιλέγεται για την αφαλάτωση υφάλμυρων νερών όπου και αυξάνεται η ολική απόδοση της μονάδας.

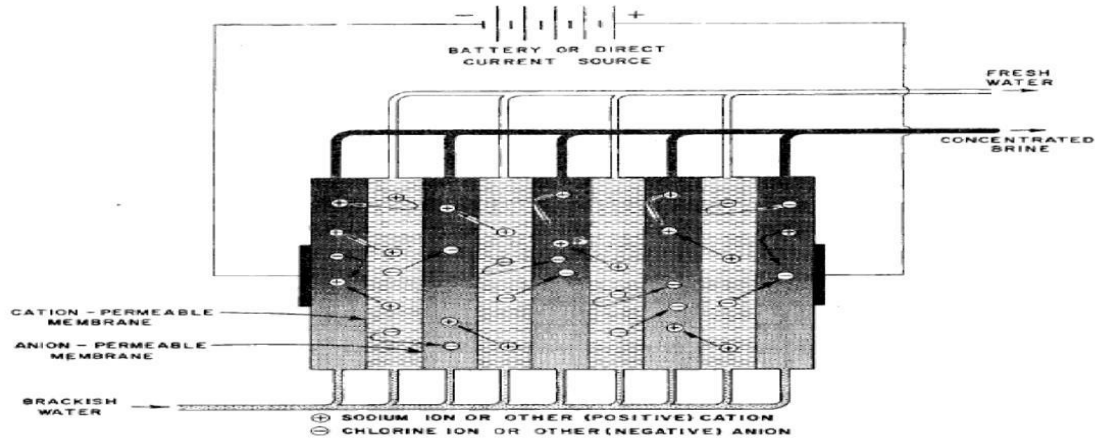
### **4.2.3 Αντίστροφη Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis Reversal - EDR)**

Μια πρότυπη μονάδα αντίστροφης ηλεκτροδιάλυσης βασίζεται στην ίδια αρχή με αυτή μιας μονάδας ηλεκτροδιάλυσης για την παραγωγή αφαλατωμένου νερού, δηλαδή στην αρχή της ηλεκτρόλυσης. Βασική διαφορά, είναι ότι τόσο τα κανάλια του προϊόντος όσο και τα κανάλια άλμης είναι όμοια σε κατασκευή. Και στη μέθοδο αυτή, δημιουργείται στη διάταξη ηλεκτρικό πεδίο με χρήση ηλεκτροδίων, το οποίο έλκει τα ηλεκτρικά φορτισμένα ιόντα του διαλύματος. Το πεδίο αυτό δημιουργείται μέσα στο λεγόμενο κελί ηλεκτρόλυσης, όπου τα ιόντα του νερού τροφοδοσίας έλκονται από το αντίθετα φορτισμένο ηλεκτρόδιο.

Σε συχνά χρονικά διαστήματα, αντιστρέφεται η πολικότητα του πεδίου, ώστε να ενεργοποιούνται το κανάλι της άλμης και αυτό της ροής παραγόμενου νερού, επιτρέποντας την έκλυση της άλμης. Με την αντιστροφή της ροής, αλλάζει και η ροή των ιόντων μέσα στο πεδίο μέσω των μεμβρανών, με αποτέλεσμα των καθαρισμό της στοίβας, των γραμμών και των μεμβρανών.

Η μονάδα αφού λειτουργήσει για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα αντίστροφα, αντιστρέφει πάλι την πολικότητα των ηλεκτροδίων, με αποτέλεσμα την επαναφορά της ροής και τη συνέχιση της παραγωγής καθαρού νερού. Με αυτό τον τρόπο, μειώνονται τόσο η φθορά των μεμβρανών, όσο και η χρήση χημικών προεπεξεργασίας.

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής, είναι η δυνατότητα χρήσης επιλεκτικών μεμβρανών, οι οποίες επιτρέπουν την διέλευση ωφέλιμων και επιθυμητών ιόντων στο τελικό προϊόν, όπως είναι τα ιόντα του ασβεστίου, του θείου και του χλωρίου. Αυτό απαλλάσσει την μονάδα από την ανάγκη πρόσθετης επεξεργασίας με σκοπό τον εμπλουτισμό του τελικού προϊόντος στα ιόντα αυτά, τα οποία σε κατάλληλες συγκεντρώσεις αποτελούν βασικό συστατικό του “καθαρού νερού”. Χαρακτηριστικό των μονάδων αυτών, είναι η δυνατότητα επεξεργασίας νερού αρκετά υψηλής θολότητας και το αρκετά μικρό ποσοστό βιορύπανσης που επιφέρουν. Τέλος, σημειώνεται πως σήμερα οι υπαρκτές μονάδες αφαλάτωσης με ηλεκτροδιάλυση ή αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση αντιστοιχούν σε ένα ελάχιστο ποσοστό της παγκόσμιας παραγωγής αφαλατωμένου νερού, λιγότερο του 1%.



Εικόνα 4.2.3 Σχηματική απεικόνιση της αντίστροφης ηλεκτροδιάλυσης (EDR) (Πηγή : Δαλιούρης Παναγιώτης, Αφαλάτωση-Σύγχρονες Μονάδες Αφαλάτωσης-Εφαρμογές και Μεθόδους)

### 4.3 Λοιπές μέθοδοι αφαλάτωσης

Πέρα από τις μεθόδους αλλαγής φάσης και μιας φάσης, έχουν αναπτυχθεί και μέθοδοι που εμπίπτουν σε άλλες κατηγορίες. Αυτές συνήθως όμως, είτε κρίνονται μη βιώσιμες οικονομικά, είτε βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο. Παρακάτω αναφέρονται οι βασικές από αυτές :

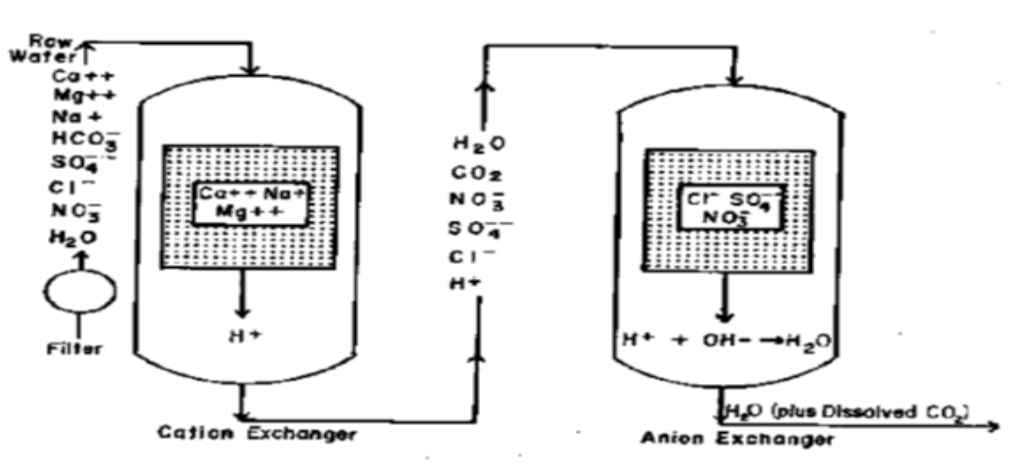
- Η Ιοντοανταλλαγή.
- Αφαλάτωση με νανοφίλτρα (carbon-nanotube membrane).
- Η Κρυστάλλωση.
- Η Γεωθερμική αφαλάτωση (Geothermal desalination).

### 4.3.1 Ιοντοανταλλαγή

Η μέθοδος αφαλάτωσης μέσω ανταλλαγής ιόντων, κάνει χρήση ειδικών ρητινών για την απομάκρυνση ακατάλληλων ιόντων από το υδατικό διάλυμα. Για παράδειγμα, αρκετά συνήθης είναι η χρήση ρητινών σε δημοτικές εγκαταστάσεις για την απαλλαγή ιόντων μαγνησίου και ασβεστίου, σε περιπτώσεις όπου το νερό τροφοδοσίας κρίνεται υπερβολικά περιεκτικό σε αυτά.

Η συνεχόμενη χρήση ρητινών όμως στην παραγωγή καθαρού νερού και κυρίως σε περιπτώσεις υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα, απαιτεί την συνεχή αντικατάσταση αυτών λόγω φθοράς. Το σχετικά αυξημένο τους κόστος καθιστά τη μέθοδο αυτή αρκετά ασύμφορη, ειδικά εάν συγκριθεί με άλλες μεθόδους αφαλάτωσης.

Σε μικρότερης περιεκτικότητας αλάτων διαλύματα όμως, η μέθοδος αυτή καθίσταται αρκετά αποτελεσματική. Για τον λόγο αυτό, η μέθοδος ανταλλαγής ιόντων με ρητίνες, χρησιμοποιείται αρκετές φορές σε συνδυασμό με κάποια άλλη διαδικασία αφαλάτωσης όπως η αντίστροφη όσμωση, όπου αποτελεί ένα πρόσθετο στάδιο επεξεργασίας του καθαρού νερού προτού αποτελέσει το τελικό προϊόν της μονάδας.



Εικόνα 4.3.1 Η μέθοδος της ανταλλαγής ιόντων (Ion exchange) (Πηγή : Δαλιούρης Παναγιώτης, Αφαλάτωση-Σύγχρονες Μονάδες Αφαλάτωσης-Εφαρμογές και Μεθόδοι)

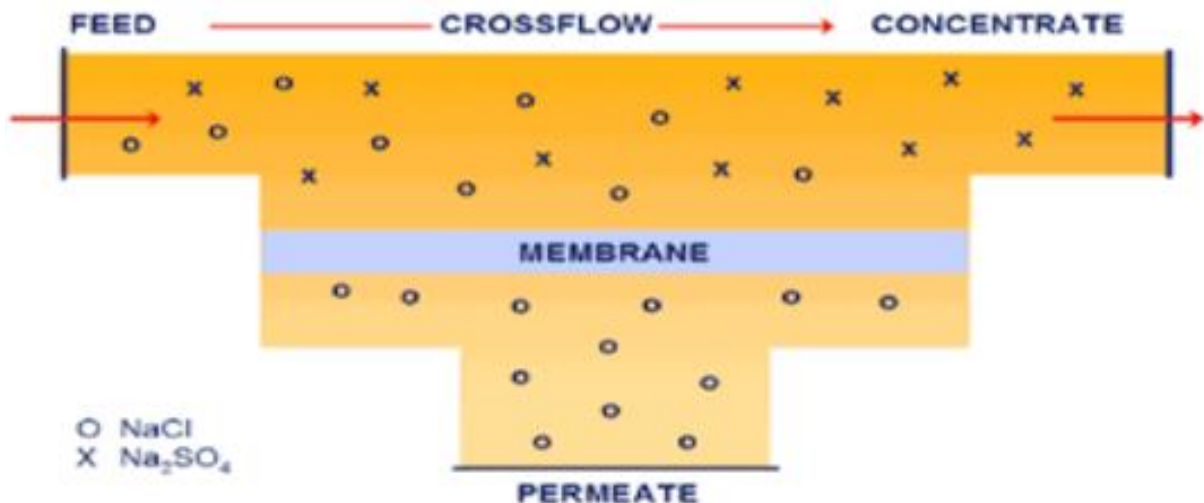
### 4.3.2 Νανόφιλτρα (carbon-nanotube membrane)

Η μέθοδος αφαλάτωσης με χρήση νανοφίλτρων αποτελεί μια αρκετά νέα μέθοδο η οποία δεν έχει ακόμα ευρεία χρήση. Ουσιαστικά πρόκειται για μέθοδο μιας φάσης με χρήση μεμβράνης, τα δεδομένα και οι προδιαγραφές της οποίας όμως βρίσκονται ακόμα σε αρκετά πρώιμο στάδιο. Προς το παρόν βρίσκει εφαρμογή σε περιπτώσεις υδατικών διαλυμάτων μικρής περιεκτικότητας, κυρίως σε επιφανειακά ή υπόγεια ύδατα.

Με τη χρήση νανοφίλτρων επιτυγχάνεται η απομάκρυνση ανεπιθύμητων οργανικών στοιχείων στο υπό επεξεργασία νερό. Μέχρι σήμερα, χρησιμοποιείται επιπροσθέτως σε μονάδες αντίστροφης όσμωσης, πειραματικές μετρήσεις όμως έχουν δείξει πως και από μόνη της επιτυγχάνει την μείωση της αλατότητας σε επιθυμητά επίπεδα. Δυστυχώς όμως, οι ίδιες μετρήσεις έδειξαν πως μειώνει τη συγκέντρωση απαραίτητων ποιοτικών συστατικών, όπως

ίοντα του ασβεστίου και μαγνησίου, με αποτέλεσμα το παραγόμενο νερό να χρήζει περαιτέρω επεξεργασίας για τον εμπλουτισμό του σε αυτά ώστε να πληρεί τις διεθνείς προϋποθέσεις.

Ακόμα και έτσι όμως, το χαμηλό κόστος της μεθόδου το καθιστά συμφέρουσα λύση για παραγωγή φθηνού νερού σε αρκετά μεγάλες ποσότητες. Όπως αναφέρθηκε όμως, η τεχνολογία που υποστηρίζει την μέθοδο αυτή βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο και δεν είναι προς το παρόν εύκολα διαθέσιμη για μαζική εμπορική χρήση σε πολλές περιπτώσεις.



Εικόνα 4.3.2 Η μέθοδος του νανοφιλτραρίσματος (carbon-nanotube membrane) (Πηγή : Δαλιούρης Παναγιώτης, Αφαλάτωση-Σύγχρονες Μονάδες Αφαλάτωσης-Εφαρμογές και Μεθόδους)

### 4.3.3 Κρυστάλλωση

Κατά την ψύξη ενός υδατικού διαλύματος, υπό προϋποθέσεις και σε συγκεκριμένες περιπτώσεις μπορούν να δημιουργηθούν κρύσταλλοι που αποτελούνται είτε από καθαρό νερό, είτε από την διαλυμένη ουσία. Την φυσικοχημική αυτή ιδιότητα εκμεταλλεύεται η μέθοδος της αφαλάτωσης μέσω κρυστάλλωσης.

Η μέθοδος αυτή, προσφέρει μερικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους αφαλάτωσης, ειδικά τις μεθόδους αλλαγής φάσης. Συγκεκριμένα, η ενέργεια που απαιτείται για την πήξη του υδατικού διαλύματος είναι κατά πολύ μικρότερη αυτής που απαιτείται για την ατμοποίησή του. Επίσης, λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών της διάταξης, παρουσιάζεται και μειωμένη διάβρωση από τα άλατα του διαλύματος στα στοιχεία της διάταξης.

Η αφαλάτωση νερού με τη μέθοδο της κρυστάλλωσης, χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες, με βάση τον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται η πήξη του νερού. Η πρώτη ονομάζεται παγοποίηση υπό κενό και κάνει χρήση κατάλληλης διάταξης για την απαγωγή θερμότητας, ενώ η δεύτερη καλείται παγοποίηση με χημικά πρόσθετα και όπως προδίδει η ονομασία κάνει χρήση κάποιου πρόσθετου ψυκτικού.

Όποιος τρόπος και να χρησιμοποιηθεί για την πήξη του νερού, η μέθοδος βασίζεται στην ίδια ιδιότητα του νερού. Κατά την παγοποίηση αυτού, δημιουργούνται κρύσταλλοι καθαρού και μόνο νερού, με τη διαλυμένη ουσία να αποβάλλεται από τον πάγο. Κατά την διεργασία αυτή,

το νερό συνήθως προψύχεται με τη βοήθεια εναλλάκτη θερμότητας και έπειτα ψύχεται ένα μέρος αυτού έως την πήξη του. Τα άλατα και οι λοιπές διαλυμένες ουσίες αποβάλλονται από τον πάγο και οδηγούνται στην ποσότητα του διαλύματος που παραμένει υγρή, αυξάνοντας και την αλατότητα αυτού. Η ποσότητα αυτή ουσιαστικά αποτελεί την άλμη της διάταξης, ενώ ο πάγος το προϊόν, ο οποίος μπορεί εύκολα να διαχωριστεί και συλλεχθεί από την άλμη.

Παρά τα οποιαδήποτε πλεονεκτήματα, η μέθοδος αυτή ωστόσο μέχρι στιγμής δεν έχει βρει ευρεία εφαρμογή και παραμένει ακόμα σε επίπεδο μελέτης. Αυτό οφείλεται στην δυσκολία παγοποίησης μεγάλης ποσότητας νερού ώστε να καταστεί η διάταξη παραγωγική και στην απαιτούμενη ενέργεια για τον τελικό καθαρισμό και τήξη του πάγου, ώστε να αποδώσει τελικά καθαρό νερό ως τελικό προϊόν.

#### 4.3.4 Η γεωθερμική αφαλάτωση

Γεωθερμία ή γεωθερμική ενέργεια ονομάζεται η θερμική ενέργεια που πηγάζει από το εσωτερικό της γης και διαρρέει προς τα επιφανειακά στρώματα. Αποτελεί μια πηγή ενέργειας η οποία βρίσκει εφαρμογή σε διάφορα τεχνολογικά πεδία. Μια χρήση αυτής, εάν και ακόμα υπό μελέτη κυρίως, είναι η γεωθερμική αφαλάτωση (Geothermal Desalination). Μελέτες έχουν δείξει πως σε συνδυασμό με μια πηγή ψύξης, η γεωθερμία μπορεί να αποτελέσει πηγή ενέργειας για την τήξη του νερού, δημιουργώντας ένα σύστημα ατμοποίησης-συμπύκνωσης. Βασικό πλεονέκτημα αυτής, το οποίο την καθιστά και ελκυστική προς μελέτη και έρευνα, είναι πως η χρήση της φυσικά εκλυόμενης από τη γη θερμότητας ως πηγή ενέργειας, πέρα από το ότι αποτελεί φιλική προς το περιβάλλον πηγή, μειώνει σημαντικά και το κόστος ενεργειακής προμήθειας μιας μονάδας.

#### 4.4 Τα κόστη και η επιλογή μεθόδους αφαλάτωσης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν οι βασικές μέθοδοι αφαλάτωσης που υπάρχουν σήμερα, καθώς και έγινε μια αναφορά σε μεθόδους με λιγότερο ευρεία χρήση ή μεθόδων που βρίσκονται υπό το στάδιο ακόμα μελέτης και έρευνας. Για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για την εγκατάσταση μιας μονάδας αφαλάτωσης, πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφοροι παράγοντες ώστε να καταστεί αποδοτική και ωφέλιμη η λειτουργία της, όπως :

- Η ποιότητα του νερού τροφοδοσίας στην περιοχή εγκατάστασης.
- Οι απαιτήσεις σε ποιότητα και ποσότητα της παραγωγής.
- Το διαθέσιμο κεφάλαιο για την εγκατάσταση.
- Η γεωμορφολογία του τόπου εγκατάστασης.
- Η ενεργειακή κάλυψη των αναγκών της μονάδας και η πηγή ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί.

Πολύ βασικό μειονέκτημα των μονάδων αφαλάτωσης είναι οι αναλογικά τεράστιες απαιτήσεις για ενεργειακή κάλυψη της λειτουργίας του. Πέρα από την ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την λειτουργία ολόκληρης της μονάδας και των συστημάτων που την απαρτίζουν, υπάρχει και η ανάγκη χρήσης θερμικής ενέργειας για την θέρμανση του νερού τροφοδοσίας, στις μονάδες αλλαγής φάσης. Η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική χαρακτηρίζεται από αρκετά χαμηλούς συντελεστές, πράγμα που αυξάνει ακόμα περισσότερο την ολική ενεργειακή κατανάλωση. Χαρακτηριστικά αναφέρεται πως μέσος όρος κατανάλωσης για τις

---

μονάδες VC αγγίζει τις 15 kWh/m<sup>3</sup>, ενώ στην περίπτωση των μονάδων MSF η κατανάλωση μπορεί να ξεπεράσει και τις 20 kWh/m<sup>3</sup> καθαρού νερού.

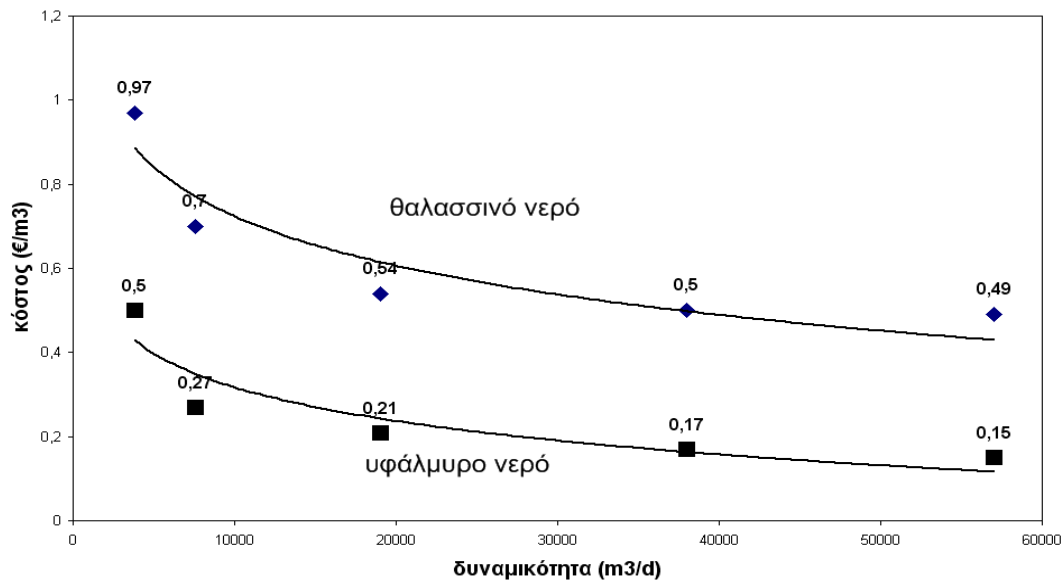
Σε πολύ χαμηλότερα μεγέθη όμως κυμαίνεται η κατανάλωση των μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση. Μια συμβατική απλή μονάδα έχει μέση κατανάλωση από 5 έως 10 kWh/m<sup>3</sup>, ενώ με την επιπρόσθετη χρήση συστημάτων ανάκτησης ενέργειας η κατανάλωση του συστήματος μπορεί να μειωθεί δραστικά μέχρι και στις 2.5 kWh/m<sup>3</sup> πόσιμου νερού, ειδικά σε μεγάλες σύγχρονες μονάδες. Η αισθητή διαφορά αυτή στην ενεργειακή απαίτηση για τη μέθοδο της αντίστροφης όσμωσης, αποτελεί και βασικό κριτήριο το οποίο έχει οδηγήσει στην επικράτηση της μεθόδου και στην παγκόσμια στροφή και προτίμηση σε τέτοιας τεχνολογίας μονάδες.

Μεγάλο πλεονέκτημα των μονάδων αντίστροφης όσμωσης επίσης, είναι το μεγάλο εύρος δυνατοτήτων το οποίο δύνανται να καλύψουν, τόσο όσον αφορά στην επιθυμητή τάξη παραγωγής, όσο και στην ποιότητα του νερού τροφοδοσίας. Αυτό, σε συνδυασμό με την ευκολότερη εγκατάσταση και το μικρότερο επενδυτικό κόστος που απαιτείται, καθιστά τις μονάδες αντίστροφης όσμωσης ελκυστικές λύσεις για την κάλυψη πολλών περιπτώσεων έλλειψης αξιοποιήσιμου νερού. Ενδεικτικά, το λειτουργικό κόστος μια μονάδας από το 1995 και έπειτα κυμαίνεται από 500 έως 1000 \$/ημέρα, με το κόστος του παραγόμενου νερού να βρίσκεται σε μια μέση τιμή των 0.5 \$/κυβικό. Ταυτόχρονα, συνεχείς τεχνολογικές εξελίξεις και καινοτομίες βελτιώνουν ακόμα περισσότερο τις υπάρχουσες διατάξεις, με αντλίες, μεμβράνες και συστήματα ανάκτησης ολοένα και μεγαλύτερης απόδοσης.

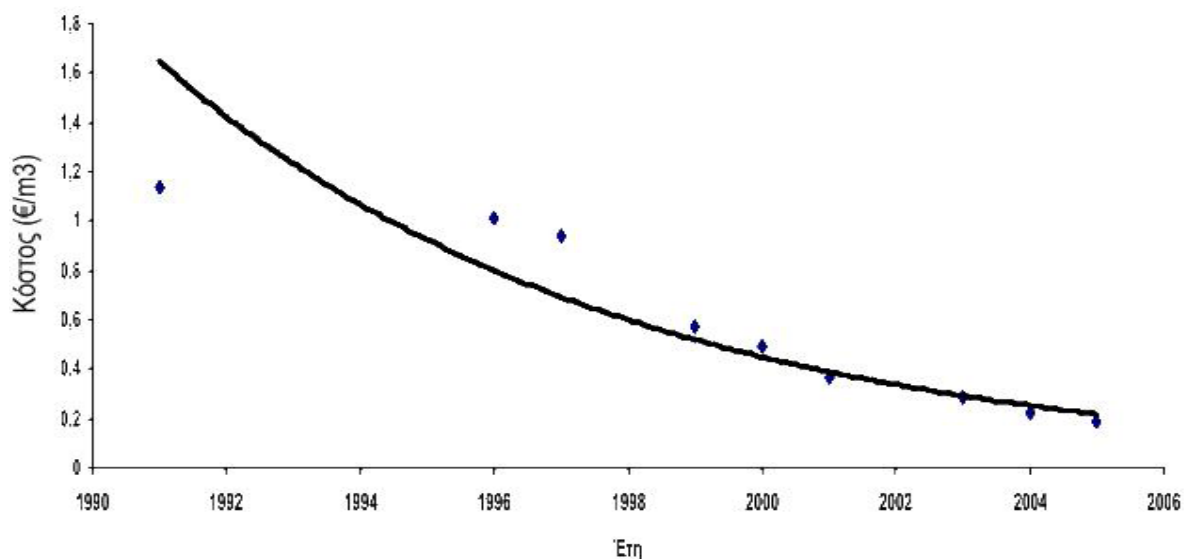
Τέλος, σημαντικός και συχνά υποτιμημένος παράγοντας του επενδυτικού κόστους μια μονάδας αφαλάτωσης, είναι το κόστος της επεξεργασίας της παραγόμενης άλμης της μονάδας. Η μη σωστή διάθεση των αποβλήτων αυτών μπορεί να προκαλέσει σοβαρές επιπτώσεις στην περιοχή εγκατάστασης. Για το λόγο αυτό, έχει θεσπιστεί και νομικά η αναγκαιότητα συστημάτων διαχείρισης και επεξεργασίας της αποβαλλόμενης άλμης στις μονάδες αφαλάτωσης, με τα αναγκαία συστήματα να αυξάνουν το αρχικό κόστος επένδυσης αλλά και το κόστος λειτουργίας. Σωστή μελέτη του τόπου εγκατάστασης κρίνεται απαραίτητη, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το ολικό κόστος της μονάδας. (Πηγή: Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π./Σχολή Μηχανολόγων Μηχ/κών, «Κάλυψη ζήτησης ενέργειας και νερού με αιολική ενέργεια και αφαλάτωση στη νήσο Σίκινο», Μουτάφης Παναγιώτης)

Σύγκριση των μεθόδων αφαλάτωσης						
Μέθοδος	Νερό τροφοδοσίας	Μορφή Ενέργειας	Παραγωγή Προϊόντος (m <sup>3</sup> /ημ.)	Τύπος Ενέργειας	Κατανάλωση Ενέργειας	Κόστος Εγκατάστασης \$(m <sup>3</sup> /ημ.)
MSF	Θαλασσινό	Θερμική	1.000-60.000	Θερμική/Ηλεκτρική	290 kJ/kg 4-6 KWh/m <sup>3</sup>	1000-2000
MED	Θαλασσινό	Θερμική	500-20.000	Θερμική/Ηλεκτρική	270 kJ/kg 2,5-3 Wh/m <sup>3</sup>	850-1750
VC	Θαλασσινό	Ηλεκτρική	25-2.500	Ηλεκτρική	8-15 KWh/m <sup>3</sup>	1000-2350
SWRO	Θαλασσινό	Ηλεκτρική	0.4-70.000	Ηλεκτρική	< 5 KWh/ m <sup>3</sup> < 3 KWh/ m <sup>3</sup> (με ανάκτηση ενέργειας)	650-4400
BWRO	Υφάλμυρο	Ηλεκτρική	2.5-50.000	Ηλεκτρική	0,5-3 KWh/m <sup>3</sup>	300-2000
ED	Υφάλμυρο	Ηλεκτρική	15-50.000	Ηλεκτρική	1,5-4 KWh/m <sup>3</sup>	1000-5000

Πίνακας 4.4 Ενδεικτικές τιμές μονάδας αφαλάτωσης (Πηγή : Συσκάκη Καλλιόπη, Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την εγκατάσταση και λειτουργία μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, 2013)



Εικόνα 4.4.1 Κόστος παραγωγής αφαλατωμένου νερού (Πηγή : Μουτάφης Παναγιώτης, Διπλωματική εργασία)



Εικόνα 4.4.2 Κόστος έργων αφαλάτωσης βασιζόμενο σε σειρά έργων που έχουν κατασκευαστεί τα τελευταία 15 χρόνια (Πηγή : Μουτάφης Παναγιώτης, Διπλωματική εργασία)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΣΕ ΑΡΙΘΜΟΥΣ

Σήμερα, η αφαλάτωση αποτελεί μια συνήθη διαδικασία αντιμετώπισης περιπτώσεων λειψυδρίας, και εγκατεστημένες μονάδες υπάρχουν σε πολλές παραθαλάσσιες περιοχές ή αποικίες, αλλά και σε μεγάλα αστικά κέντρα ανά τον κόσμο. Η σχετική ευκολία στην εγκατάσταση αυτών, το διαχειρίσιμο επενδυτικό τους κόστος, αλλά και η ολοένα και μεγαλύτερη αποδοτικότητα των συστημάτων αφαλάτωσης εξαιτίας συνεχών τεχνολογικών εξελίξεων ή της βελτιστοποίησης υπαρχουσών τεχνολογιών, καθιστά την ιδέα της αφαλάτωσης εξαιρετικά ελπιδοφόρα λύση για την αντιμετώπιση της παγκόσμιας υδατικής κρίσης. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά στατιστικά στοιχεία για την κατάσταση της αφαλάτωσης σήμερα, τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο, αλλά και στον ελλαδικό χώρο. Παρουσιάζεται επίσης η αναμενόμενη αύξηση του πλήθους αυτών, καθώς μεγάλα επενδυτικά σχέδια τίθενται ήδη σε ισχύ και έχει προγραμματιστεί η μελλοντική εγκατάσταση μονάδων σε πολλές περιοχές ανά τον κόσμο.

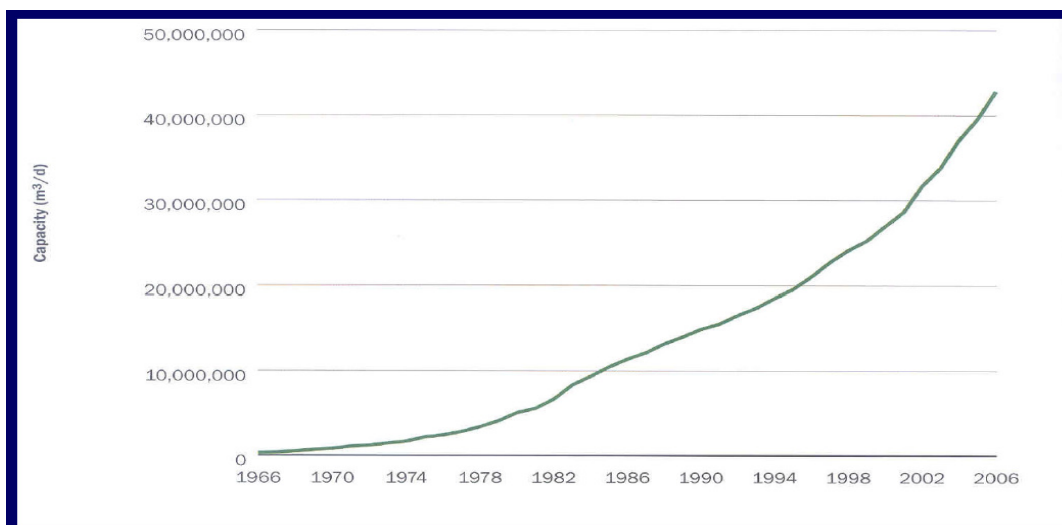
### 5.1 Τα δεδομένα σε παγκόσμιο επίπεδο

Σήμερα, υπάρχουν παραπάνω από 15.000 εγκατεστημένες και λειτουργικές μονάδες αφαλάτωσης στον πλανήτη, με 155 χώρες μέχρι στιγμής να εκμεταλλεύονται την παραγωγή περίπου 47 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων καθαρού πόσιμου νερού ημερησίως. Τα νούμερα αυτά συνεχώς αυξάνονται, καθώς έχει ήδη δρομολογηθεί ή και ξεκινήσει η εγκατάσταση επιπλέον μονάδων για την κάλυψη της παροχής νερού σε πολλές περιοχές του πλανήτη. (Εικόνα 5.1.1, 5.1.2)

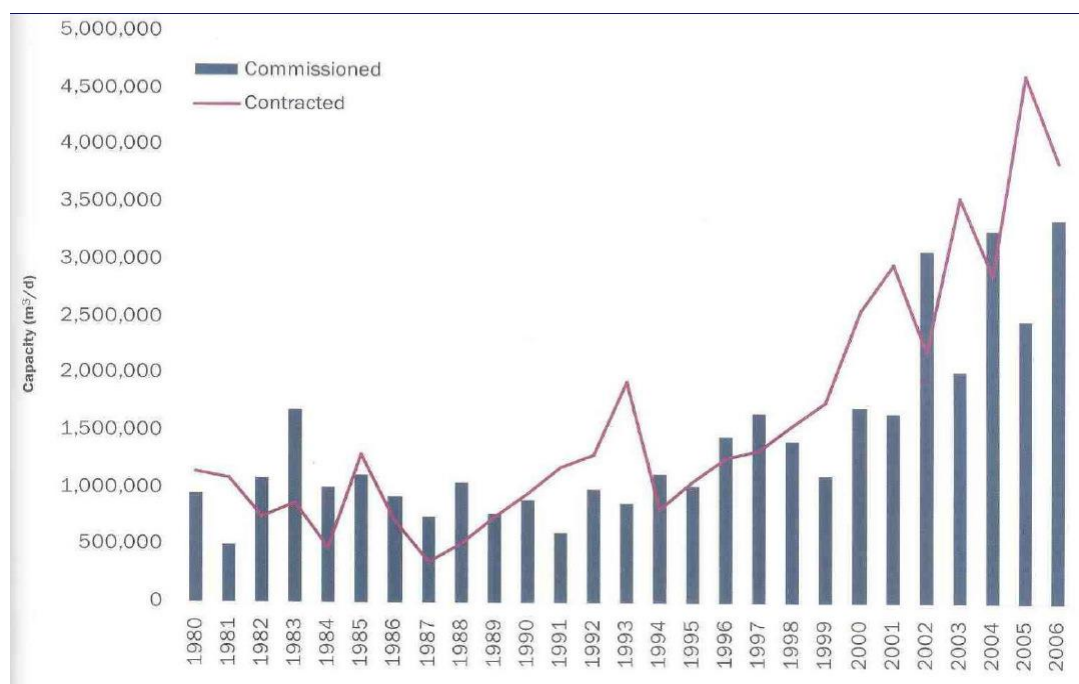
Και στην περίπτωση της ελληνικής επικράτειας, η οποία όπως και παρουσιάστηκε αντιμετωπίζει μεγάλα προβλήματα υδροδότησης ιδιαίτερα στα νησιά του Αιγαίου και Κρητικού πελάγους, έχουν τεθεί σε λειτουργία κρατικά ή ευρωπαϊκά επενδυτικά προγράμματα



για τη δημιουργία υποδομών οι οποίες στα επόμενα χρόνια θα μπορέσουν να υποβοηθήσουν ή και υποστηρίξουν πλήρως τις διάφορες τοπικές ανάγκες υδροδότησης σε ικανοποιητικό βαθμό.



Εικόνα 5.1.1 Εγκατεστημένη δυναμικότητα παγκοσμίως (m<sup>3</sup>/d) (Πηγή : Δρ. Δ. Μανωλάκος, Συστήματα αφαλάτωσης στο νησιωτικό χώρο)



Εικόνα 5.1.2 Δυναμικότητα εγκατεστημένων μονάδων αφαλάτωσης παγκοσμίως 1980-2006 (Πηγή : Δρ. Δ. Μανωλάκος, Συστήματα αφαλάτωσης στο νησιωτικό χώρο)

Μέχρι σήμερα, το μισό σχεδόν της παγκόσμιας δυναμικότητας συναντάται στις περιοχές της Μέσης Ανατολής και κυρίως στην περιοχή του Κόλπου. Στις περιοχές αυτές το πρόβλημα της λειψυδρίας είναι αρκετά έντονο, με τη δυνατότητα πρόσβασης σε καθαρό νερό εξαιρετικά περιορισμένη. Πρώτη στην παραγωγή καθαρού νερού κατατάσσεται η Σαουδική Αραβία και η Αμερική ακολουθεί δεύτερη με περισσότερες από 800 μονάδες αφαλάτωσης σε λειτουργία, οι οποίες παράγουν καθαρό νερό της τάξης του 12% της παγκόσμιας παραγωγής.

Στο κράτος του Ισραήλ, έχει ξεκινήσει από το 2000 η δημιουργία και λειτουργία μιας τεράστιας μονάδας αφαλάτωσης στην πόλη Ashkelon, η οποία θα προσφέρει λύση στο μεγάλο πρόβλημα λειψυδρίας της περιοχής και της φυσικής ανυπαρξίας πηγών πόσιμου νερού. Με την ολοκλήρωσή της, η μονάδα υπολογίζεται να παρέχει 330.000 κυβικά μέτρα ημερησίως και μέχρι και 100 εκατομμύρια κυβικά μέτρα πόσιμου νερού ετησίως, καλύπτοντας το 13% των αναγκών της χώρας στην τροφοδοσία.



Εικόνα 5.1.3 Η μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης του Ashkelon, Ισραήλ (Πηγή : Διαδίκτυο)

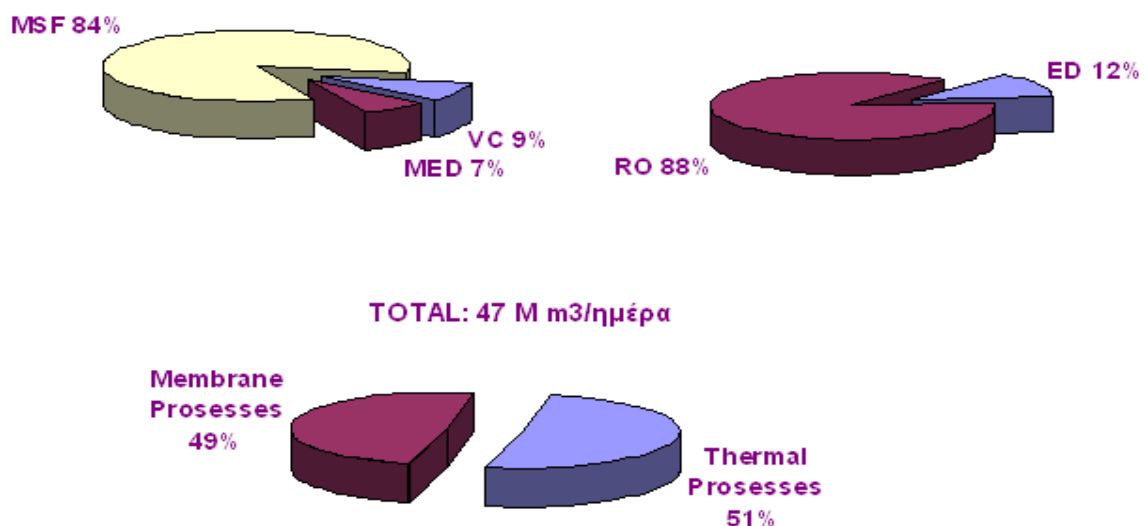
Η μονάδα αφαλάτωσης στο Ashkelon κέρδισε το 2006 τον τίτλο της μεγαλύτερης μονάδας αφαλάτωσης παγκοσμίως και έλαβε σειρά βραβείων καινοτομίας για τον σχεδιασμό της.

Από την πληθώρα των μεθόδων αφαλάτωσης, πιο διαδεδομένες σήμερα είναι η μέθοδος της αφαλάτωσης μέσω πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) και η αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση (RO). Και οι δύο, καλυπτουν ξεχωριστά περίπου 43% της παγκόσμιας δυναμικότητας σε παραγωγή καθαρού νερού. Όμως, οι μονάδες αντίστροφης όσμωσης καλύπτουν το 68% των εγκατεστημένων μονάδων, έναντι μόλις 9% αυτών οι οποίες λειτουργούν με τη μέθοδο της πολυβάθμιας εκτόνωσης. Η αντίφαση της μεγάλης διαφοράς στον αριθμό εγκατεστημένων μονάδων, αλλά της ίδιας σχεδόν παραγωγής προϊόντος, εξηγείται από την παραγωγική ικανότητα της κάθε μεθόδου. Μια τυπική μονάδα αντίστροφης όσμωσης μπορεί να παράξει 1.200 κυβικά μέτρα καθαρού νερού ημερησίως, ενώ μια αντίστοιχη μονάδα πολυβάθμιας εκτόνωσης έχει παραγωγική ικανότητα που αγγίζει τα 8.800 κυβικά την ημέρα.

Παγκόσμια στατιστικά δεδομένα δείχνουν πως η δυναμικότητα των μονάδων αφαλάτωσης κατανέμεται ως εξής : η πολυβάθμια εκτόνωση καλύπτει το 43% της παγκόσμιας παραγωγής, η αντίστροφη όσμωση 43% επίσης, η μέθοδος της ηλεκτροδιάλυσης το 6%, η αφαλάτωση με συμπίεση ατμών το 4% και το υπόλοιπο 4% καλύπτουν μονάδες πολυβάθμιας εξάτμισης (Εικόνα 5.1.4).

Όσον αφορά την κατανομή των εγκατεστημένων μονάδων στον πλανήτη, η μέθοδος της πολυβάθμιας εκτόνωσης έχει διαδοθεί και βρίσκει ευρεία εφαρμογή στις περιοχές του Περσικού Κόλπου, ενώ η αντίστροφη όσμωση έχει επικρατήσει στον υπόλοιπο κόσμο.

Στην Μεσόγειο και στην Ελλάδα, η τεχνολογία της αφαλάτωσης με μονάδες αντίστροφης όσμωσης έχει αρχίσει να προτιμάται τα τελευταία 25 χρόνια. Ειδικά την τελευταία δεκαετία στον ελλαδικό χώρο, σειρά αναπτυξιακών προγραμμάτων έχουν ξεκινήσει την εγκατάσταση μονάδων αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης σε πολλά από τα άνυδρα νησιά της Ελλάδας, ενώ υπάρχει ήδη ο σχεδιασμός για την υλοποίηση εγκαταστάσεων σε πολλά ακόμα νησιά τα οποία έως σήμερα τροφοδοτούνταν με μεταφορά υδάτων.



Εικόνα 5.1.4 Δυναμικότητα παγκοσμίως εγκατεστημένων μονάδων αφαλάτωσης που βασίζονται σε διεργασίες μεμβρανών και σε θερμικές διεργασίες για το έτος 2006 (Πηγή : Μουτάφης Παναγιώτης, Κάλυψη ζήτησης ενέργειας και νερού με αιολική ενέργεια και αφαλάτωση στη νήσο Σίκινο)

Ενδεικτικά, αναφέρονται κάποια χαρακτηριστικά στατιστικά στοιχεία για την σημερινή κατάσταση της αφαλάτωσης αλλά και της έλλειψης υδάτων παγκοσμίως :

- Το 97% του νερού στο πλανήτη είναι θαλασσινό νερό και δεν αποτελεί νερό κατάλληλο για πόση ή για άρδευση
- Περίπου 33-37 γραμμάρια στερεών σωματιδίων εμπεριέχονται σε κάθε λίτρο θαλασσινού νερού (37,000 μέρη στο εκατομμύριο)

- **Περίπου 10-15 γραμμάρια** στερεών σωματιδίων εμπεριέχονται σε κάθε λίτρο υφάλμυρου νερού (brackish water)
- **Το 99%** των στερεών σωματιδίων που περιέχονται στο νερό της θάλασσας είναι αναγκαίο να αφαιρεθεί προκειμένου να καταστεί πόσιμο.
- **Περίπου 1 δις** άνθρωποι βιώνουν πρόβλημα λειψυδρίας στον τόπο κατοικίας τους.
- **Στα 1.8 δις** ανθρώπων αναμένεται να αυξηθεί ο αριθμός αυτός μέχρι το 2025.
- **15.000** ο αριθμός των λειτουργικών μονάδων αφαλάτωσης παγκοσμίως.
- **Στα 300** εκατ δολάρια εκτιμάται ο μέσος όρος του κόστους εγκατάστασης μιας νέας μονάδας.
- **Σχεδόν 200** εκατ. δολάρια το κόστος κατασκευής μονάδας αφαλάτωσης στο San Diego της Καλιφόρνια.
- **2.9 δις** δολάρια το αντίστοιχο κόστος της μονάδας που κατασκευάζεται σήμερα στην Μελβούρνη.
- **55.6 εκατομμύρια κυβικά μέτρα νερού** η ετήσια παραγωγή πόσιμου νερού από αφαλάτωση σήμερα.
- **1.5 \$** ανά κυβικό μέτρο νερού, το κόστος παραγωγής την δεκαετία του 90.
- **0.5\$** ανά κυβικό μέτρο νερού το αντίστοιχο κόστος το 2003.
- **0.75\$** ανά κυβικό μέτρο νερού το κόστος παραγωγής σήμερα, εξαιτίας της διεθνούς αύξησης στην τιμή των πρώτων υλών και των πηγών ενέργειας.
- **Εκτιμάται πως 3000 σπίτια** μπορεί να ηλεκτροδοτήσει η ενέργεια που απαιτεί μια μέση μονάδα αφαλάτωσης.
- **8 kWh** ήταν η ενέργεια που απαιτούσε η αφαλάτωση ενός κυβικού μέτρου νερού στη Σ. Αραβία την δεκαετία του 80.
- **3.7 kWh** η αντίστοιχη απαίτηση ενέργειας σήμερα στην ίδια περιοχή.
- **15%** η εξοικονόμηση στην ενέργεια της αφαλάτωσης που παρέχουν οι τωρινές μέθοδοι.
- **20%** η περαιτέρω εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται με την χρήση των τελευταία αναπτυγμένων μεμβρανών.
- **Το 50%** του νερού τροφοδοσίας που διέρχεται από την μεμβράνη στην αντίστροφη όσμωση, αποτελεί το προϊόν της διάταξης.
- **Το υπόλοιπο 50%** αποτελεί την αποβαλλόμενη άλμη και μπορεί μέσω κατάλληλης διάταξης να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την τροφοδοσία της μονάδας.
- **Έως και 75%** η δυνατότητα για ανάκτηση ενέργειας από το ρεύμα υπολειμμάτων το 1980.
- **Έως και 96%** το αντίστοιχο ποσοστό ανάκτησης ενέργειας σήμερα στις μονάδες αφαλάτωσης.

{Πηγές: 1) «Φιλελεύθερο Ζάντε» Blog Archive Αφαλάτωση 'Μάννα' εκ θαλάσσης, 2) ΘΕΣΕΙΣ ΤΗΣ ΜΕΠΑΑ/ΤΕΕ για την αφαλάτωση}

---

## 5.2 Τα δεδομένα στην Ελλάδα

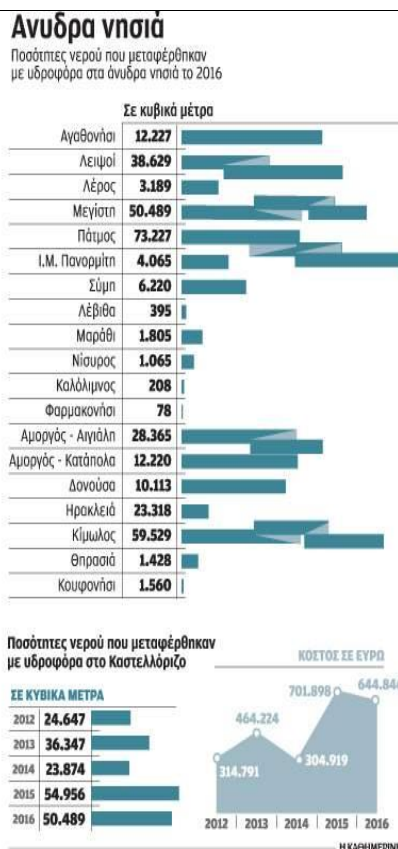
Η χρήση της αφαλάτωσης στην Ελλάδα δεν είναι ακόμα ευρέως διαδεδομένη, σημαντικές προσπάθειες γίνονται όμως για την εγκαθίδρυση της. Η τεχνολογία της αφαλάτωσης έχει αναδειχθεί βιώσιμη λύση για τις περιπτώσεις λειψυδρίας στην Ελλάδα και αποτελεί οικονομικά βιώσιμη λύση, η οποία αποσκοπεί στην αντικατάσταση της μεταφοράς νερού από άλλες περιοχές για την κάλυψη της ζήτησης, ειδικά στις περιπτώσεις των νησιών του Αιγαίου και της Κρήτης.

Με βάση δεδομένα της ΕΛΣΤΑΤ για την περίοδο 2004-2006, ξοδεύτηκαν 25.5 εκατομμύρια ευρώ από τα Δημόσια ταμεία για την μεταφορά και μόνο πόσιμου νερού στο Αιγαίο. Τα ίδια δεδομένα αναφέρουν για την διετία αυτή μεταφορά νερού 1.744.380 κυβικών μέτρων κατ' έτος. Το ποσό που δαπανήθηκε ισοδυναμεί με το κόστος κατασκευής 15 μονάδων αφαλάτωσης, με παραγωγική ικανότητα 30.000 κυβικών ημερησίως και τελικό κόστος παραγωγής 0.4 ευρώ το κάθε κυβικό νερού. Εύκολα γίνεται αντιληπτό λοιπόν πως η τεχνολογία της αφαλάτωσης θα μπορούσε να αντικαταστήσει επαρκώς την μεταφορά νερού, καλύπτοντας τη ζήτηση και ταυτόχρονα εξοικονομώντας λεφτά του Δημοσίου.

Η συνολική ποσότητα νερού που μεταφέρεται στα νησιά κυμαίνεται δυστυχώς ακόμα στις ίδιες ποσότητες, με το συνολικό κόστος να αγγίζει τα 9.400.000 € περίπου. Το έτος 2006, το κόστος της μεταφοράς νερού στο ελληνικό κράτος ανήλθε σε περισσότερα από 9,5 εκατομμυρίων ευρώ, ενώ το 2010 το κόστος μεταφοράς ενός κυβικού μέτρου λόγω ανατιμήσεων έφτασε τα 12.5 ευρώ.

Οι πρώτες μονάδες αφαλάτωσης στην Ελλάδα ξεκίνησαν την λειτουργία τους το 1960, κυρίως όμως σε πειραματικό στάδιο. Σήμερα πλέον βρίσκονται σε κανονική λειτουργία 50 περίπου μονάδες, οι οποίες έχουν τεθεί στη διάθεση τοπικών κοινοτήτων για την εξυπηρέτηση των αναγκών τους σε πόσιμο νερό. Οι μονάδες αυτές διαθέτουν συνολική δυναμικότητα 30.000 κυβικών μέτρων ανά ημέρα, με ένα μέσο κόστος παραγωγής από 0.3 έως 2 ευρώ ανά κυβικό μέτρο. Στις περισσότερες από αυτές πλέον, έχουν τεθεί σε λειτουργία συστήματα ανάκτησης ενέργειας για την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής και λειτουργίας.

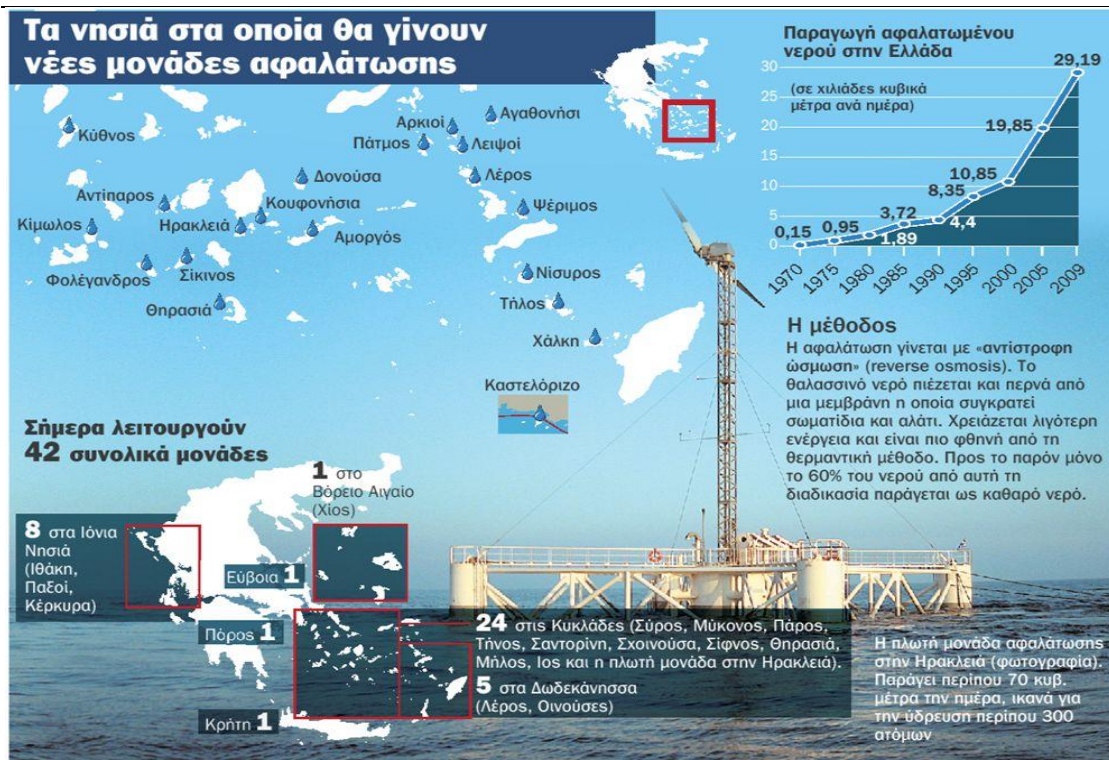
Οι πρώτες μονάδες αφαλάτωσης πραγματοποιήθηκαν στην Ελλάδα γύρω στο 1960, όχι όμως για βιομηχανική ή Δημοτική υποστήριξη, αλλά κυρίως για μελέτη της ηλιακής απόσταξης. Όμως, σήμερα πλέον βρίσκονται σε λειτουργία περισσότερες από 50 ολοκληρωμένες μονάδες αφαλάτωσης (κυρίως αντίστροφης όσμωσης), οι οποίες αποτελούν βασικό δομικό στοιχείο για την εξυπηρέτηση των Δημοτικών αναγκών σε παροχή καθαρού νερού, κυρίως στα άνυδρα νησιά της χώρας μας.



Εικόνα 5.2.1 Ποσότητα μεταφερόμενου νερού σε άνυδρα νησιά το 2016 (Πηγή : Καθημερινή, διαδικτυο)

Ιδιαιτερότητα των νησιών αποτελεί η ανομοιότητα σε φυσικούς πόρους νερού καθώς και η ζήτηση, οι οποία ποικίλει από νησί σε νησί, αλλά χαρακτηρίζεται και από ακραία εποχιακά εύρη. Σε κάθε περίπτωση όμως, η εύκολη πρόσβαση σε θαλασσινό νερό, έχει οδηγήσει στην εγκατάσταση μονάδων αφαλάτωσης σε πολλά από τα νησιά, κυρίως αυτά που έχουν ανεπτυγμένες μεγάλες κοινότητες ή αποτελούν δημοφιλείς τουριστικούς προορισμούς.

Στα νησιά αυτά έχουν πραγματοποιηθεί μεγάλα έργα για την κατασκευή μονάδων αφαλάτωσης, οι οποίες πλέον δύναται να υποστηρίξουν σε ικανοποιητικό βαθμό της τοπικές ανάγκες υδροδότησης. Νησιά με ενεργές μονάδες είναι η Μύκονος, η Τήνος, η Σύρος, η Σέριφος, η Ρόδος, η Κως, η Κάρπαθος και η Σίφνος, όπου η αφαλάτωση παρέχει εξαιρετικής σημασίας υποστήριξη στην τροφοδοσία νερού. Σε πολλές περιπτώσεις όμως, όπως στα νησιά Συμη, Κίμωλο, Ηρακλειά και πολλά ακόμα από τα μικρότερα κυρίως νησιά, τα προβλήματα υδροδότησης δεν έχουν λυθεί ακόμα αποτελεσματικά, αφού στην πλειοψηφία τους υποστηρίζονται ακόμα από μικρότερα έργα ή μικρές μονάδες, ή σε πολλές περιπτώσεις η βασική τροφοδότηση γίνεται με μεταφορά νερού από άλλες περιοχές. Στα νησιά αυτά, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση μονάδων για την κάλυψη των τοπικών αναγκών θα αποτελέσει λύση κομβικής σημασίας για τα υφιστάμενα προβλήματα λειψυδρίας και σε κάποιες περιπτώσεις έχουν κατατεθεί ήδη οι σχεδιασμοί για την εγκατάσταση αυτών.



Εικόνα 5.2.2 Νέες μονάδες αφαλάτωσης σε μελέτη (Πηγή : Typhoon, Διαδίκτυο)

Σήμερα πλέον, οι μονάδες αφαλάτωσης δύνανται να καλύψουν ποσοστά του 4.1% της ζήτησης νερού για υδρευτικούς σκοπούς και 2% του απαιτούμενου νερού άρδευσης. Με τα έργα για την εγκατάσταση μεγάλων και σύγχρονων μονάδων σε πολλά νησιά μας να ολοκληρώνονται σιγά σιγά και με την πρόθεση να αποκτήσουν τις δικές τους μονάδες αφαλάτωσης πολλά νησιά ακόμα, τα ποσοστά αυτά αναμένεται να αυξηθούν θεαματικά στις ερχόμενες δεκαετίες. Χαρακτηριστικά έργα που ολοκληρώθηκαν και βρίσκονται σε λειτουργία, είναι η εγκατάσταση μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση το 2009 στο νησί Θήρα, η οποία μπορεί να εξασφαλίζει έως και 1000 κυβικά μέτρα καθαρού νερού ημερησίως, στο νησί Νίσυρο ήδη από το 1991 λειτουργεί μονάδα αφαλάτωσης με δυναμική 800 κυβικών μέτρων ημερησίως, ενώ στη Σύρο έχουν ξεκινήσει από το 2017 οι μελέτες και οι διαγωνισμοί για την εγκατάσταση μονάδας αφαλάτωσης παραγωγικής ικανότητας 1000 κυβικών την ημέρα.

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα των μονάδων αφαλάτωσης, είναι οι πολύ υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις για τη λειτουργία τους. Οι ενεργοβόρες μονάδες, δεν δύνανται πολλές φορές να ενταχθούν στα αυτόνομα ηλεκτρικά δίκτυα των νησιών, τα οποία σε πολλές περιπτώσεις αντιμετωπίζουν ήδη προβλήματα ηλεκτροδότησης καθώς υποστηρίζονται από μικρούς ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς, οι οποίοι στη πλειοψηφία τους κάνουν χρήση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Για τον λόγο αυτό, μεγάλη σημασία έχει δοθεί στην κάλυψη των αναγκών των μονάδων από παράλληλα έργα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η λύση αυτή κρίνεται αρκετά αποδοτική, αφού στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχει κατάλληλο αιολικό και ηλιακό δυναμικό για την αποδοτική λειτουργία είτε αιολικών πάρκων είτε φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων για την ικανοποιητική παραγωγή “πράσινης” ενέργειας. Με

τον τρόπο αυτό δεν επιβαρύνεται το ήδη προβληματικό δίκτυο πολλών νησιών, ενώ μειώνεται το λειτουργικό κόστος των μονάδων καθώς και η παραγωγή ρύπων από την λειτουργία αυτών.

Μονάδες αφαλάτωσης στην Ελλάδα						
Μονάδα και/ή αριθμός μονάδων	Έτος κατασκ.	Τύπος	Δυναμ. (m <sup>3</sup> /d)	Λειτουργ. κόστος(€)	Κατασκευαστής	Αποδοχή
Γάζι, Ηρακλείου (1)	2014	RO & UF	2400	0,25 <sup>α</sup>	SYCHEM, s.a.	Καλή
Ερμούπολη, Σύρου (9)	1992-2007	RO (PD)	4700	2,00-2,70 <sup>β</sup>	CULLIGAN, GR TEMAK, GR	Καλή
Ποσειδωνίαις, Σύρου (3)	2000-2006	RO	1000	0,70 <sup>βγ</sup>	ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗ CULLIGAN, GR	Καλή
Βάρη, Σύρου (2)	2003-2006	RO	750	0,70 <sup>βγ</sup>	CULLIGAN, GR	Καλή
Γεληήσσαις, Σύρου (2)	2007	RO	1000	0,70 <sup>βγ</sup>	TEMAK, GR	Καλή
Κίτι, Σύρου (2)	2000-2007	RO	750	0,70 <sup>βγ</sup>	TEMAK, GR	Καλή
Νέφος και μικρές Κωκλάδες (4) <sup>δ</sup>	2004-2014	RO	1250	0,70 <sup>γ</sup>	TEMAK, GR CULLIGAN, GR	Καλή
Μύκονος (3)	2001-2014	RO	9.000	2,00	CULLIGAN, GR	Καλή
Πάρος (2)	2001 2015	RO, υφ. PO	1200 2400	0,50 <sup>γ</sup> 0,50	IONICS TABA SYCHEM, s.a.	Καλή Υπό κατα.
Τήνος (2)	2001-2005	RO	1000	0,70 <sup>βγ</sup>	CULLIGAN, GR	Καλή
Σαντορίνη (3)	1994-2002	RO	700	2,00 <sup>β</sup>	CULLIGAN, GR MATRIX, USA	Καλή
Σίφνος	2002	RO, υφ.	500	3,50	HOH, DM	Καλή
Ομηρούπολη, Χίου (6)	2000-2009	RO, υφ.	5200	0,60 <sup>γ</sup>	CULLIGAN, GR TEMAK, GR	Καλή
Νίσυρος (3) <sup>ε</sup>	2002-2012	RO	950	0,70 <sup>γ</sup>	TEMAK, GR	Καλή
Ιθάκη (3)	1990-2007	RO	1320	0,80 <sup>γ</sup>	JUDO, DE CULLIGAN, GR	Καλή
Λέρο	2001	RO	200	0,50 <sup>γ</sup>	CULLIGAN, GR	Καλή
Κέρκυρα (>20)		RO	100	0,50 <sup>βγ</sup>	CULLIGAN, GR	Καλή
Παξοί (2)	2005	RO	500	0,60 <sup>βγ</sup>	CULLIGAN, GR	Καλή
Σύνολο 69 Μονάδες			34.920			

Εικόνα 5.2.3 Δυνατότητες Παραγωγής Πόσιμου Νερού με Τεχνολογίες Αφαλάτωσης στην Ελλάδα (Πηγή : Δρ Ανδρέας Ν. Αγγελάκης, Τεχν. Σύμβουλος Ένωσης ΔΕΥΑ)

Η Ελλάδα και ιδιαίτερα τα νησιά αυτής, αποτελούσαν ανέκαθεν δημοφιλή τουριστικό προορισμό, καθιστώντας την χώρα μας χώρα με κατεξοχήν τουριστική δραστηριότητα. Κατά την περίοδο του καλοκαιριού, τα νησιά υποδέχονται στο σύνολό τους δεκάδες εκατομμύρια επισκέπτες, οι φιλοξενία των οποίων αυξάνει εκθετικά τη ζήτηση σε όλες τις βασικές Δημοτικές παροχές, βασική εκ των οποίων είναι η υδροδότηση. Μέχρι σήμερα τη ζήτηση αυτή προσπαθούσε να καλύψει η μεταφορά πόσιμου νερού από την ενδοχώρα, η οποία όπως παρουσιάστηκε επιβάρυνε τους κρατικούς προϋπολογισμούς με κόστη αρκετών εκατομμυρίων ευρώ ετησίως. Τα κόστη αυτά τείνουν να μειωθούν δραστικά, με τη συνεχή στροφή στην αφαλάτωση για την τροφοδότηση των νησιών μας, αυξάνοντας παράλληλα το βιοτικό επίπεδο των τοπικών κοινοτήτων και βελτιστοποιώντας τις επιχειρηματικές και επενδυτικές δυνατότητες των υποστηριζόμενων νησιών.

Ταυτόχρονα, η παγκόσμια στροφή στη χρήση της αφαλάτωσης, η συνεχής έρευνα για τη βελτιστοποίηση αυτής και οι νέες καινοτόμες τεχνολογίες που συμβάλλουν στην περαιτέρω εξοικονόμηση και αύξηση της αποδοτικότητας καθιστούν τους θαλάσσιους υδατικούς πόρους αξιοποιήσιμη πηγή για τις ανάγκες υδροδότησης σε πολλές περιοχές. Επίσης, η ταυτόχρονη



στροφή σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η συνεχής ανάπτυξη και βελτιστοποίηση των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνει δραστικά το κόστος λειτουργίας των μονάδων αφαλάτωσης και τα έργα παραγωγής πράσινης ενέργειας συνοδεύουν πλέον κάθε νέα εγκατάσταση αφαλάτωσης. Αναμένεται λοιπόν, πως η τεχνολογία των μεθόδων αφαλάτωσης θα παίζει κομβικό ρόλο σε παγκόσμιο επίπεδο, για τη διαχείριση αλλά και ουσιαστική αντιμετώπιση της αναμενόμενης υδατικής κρίσης και θα μπορέσει να καλύψει τις ανάγκες για καθαρό πόσιμο νερό σε εκατομμύρια ανθρώπους ανά την υφήλιο.

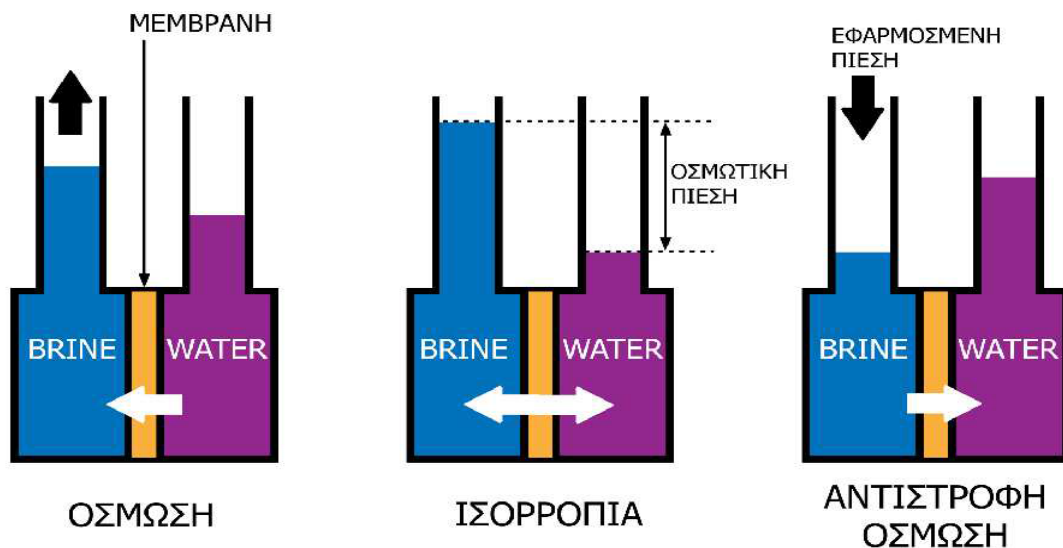
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Η ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΟΣΜΩΣΗ

Όπως συνοπτικά παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4, η μέθοδος της αφαλάτωσης μέσω αντίστροφης όσμωσης βασίζεται στο φυσικό φαινόμενο της όσμωσης, κατά το οποίο στην επαφή δύο διαλυμάτων διαφορετικής περιεκτικότητας σε διαλυμένη ουσία, ποσότητα διαλύτη ρέει προς το πυκνότερο διάλυμα, με σκοπό την επίτευξη ισορροπίας.

Εάν όμως ασκηθεί πίεση στην πλευρά του πυκνότερου διαλύματος, μεγαλύτερη μιας χαρακτηριστικής τιμής του συστήματος (οσμωτική πίεση), τότε το φαινόμενο αυτό αντιστρέφεται αλλάζοντας και τη ροή του διαλύτη, ο οποίος πλέον κινείται από το πυκνότερο προς το αραιότερο διάλυμα (εικόνα 6.1).

Στην περίπτωση όπου το εξεταζόμενο διάλυμα αποτελεί υδατικό διάλυμα αλάτων, αλμυρό ή υφάλμυρο νερό, τότε η ροή νερού προς το διάλυμα μικρότερης περιεκτικότητας θα μας δίνει νερό ολοένα και μικρότερης περιεκτικότητας σε άλατα, φτάνοντας κάποια στιγμή τις προδιαγραφές του καθαρού πόσιμου νερού.

Το φαινόμενο αυτό απαντάται πολύ συχνά και στην ίδια τη φύση, με χαρακτηριστικό παράδειγμα να αποτελούν οι λειτουργίες των κυττάρων π.χ. του δέρματος ή των νεφρών.



Α. Το νερό περνά από το διάλυμα με τη χαμηλή περιεκτικότητα σε άλατα στο διάλυμα με την υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα

Β. Οσμωτική πίεση είναι η πίεση που χρειάζεται για να σταματήσει η ροή του νερού μέσω της μεμβράνης και να δημιουργηθεί ισορροπία

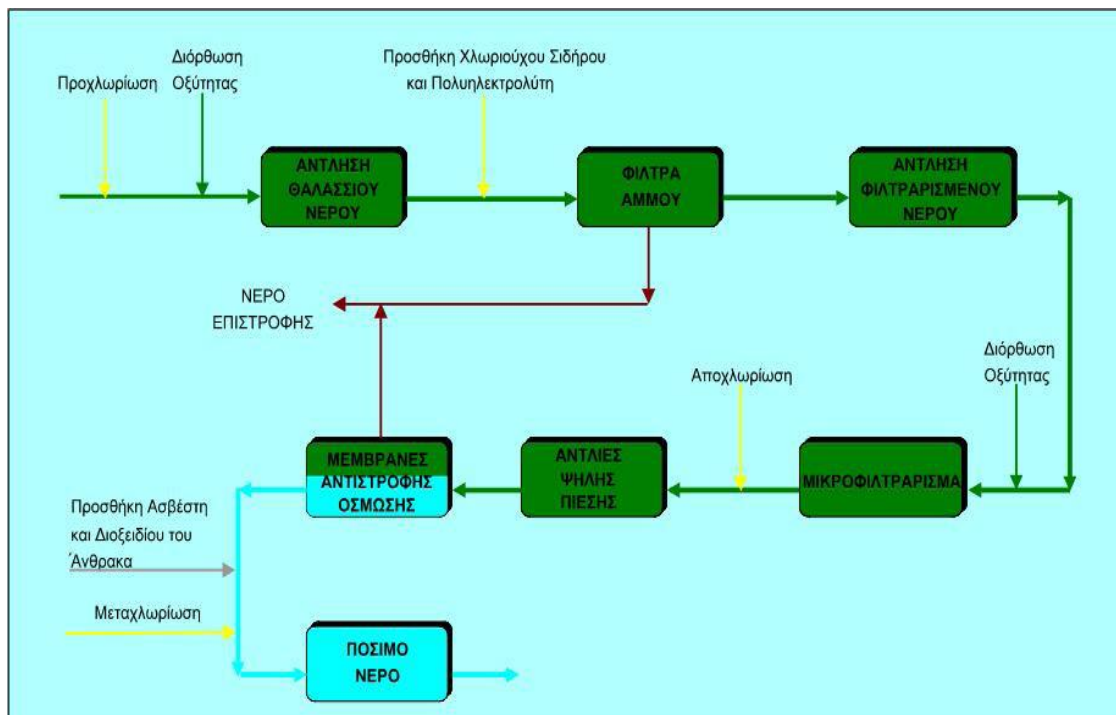
Γ. Εφαρμόζοντας πίεση μεγαλύτερη της οσμωτικής το νερό διαπερνά τη μεμβράνη στην αντίθετη κατεύθυνση, από το διάλυμα με υψηλή συγκέντρωση σε άλατα στο διάλυμα με χαμηλή συγκέντρωση σε άλατα

Εικόνα 6.1 Εικόνα 14: Η διαδικασία της όσμωσης και της αντίστροφης όσμωσης (Πηγή : Συσκάκη Καλλιόπη, Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την εγκατάσταση και λειτουργία μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση, 2013)

## 6.1 Τα στάδια της αντίστροφης όσμωσης

Η διαδικασία της αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού, το οποίο αποτελεί και τη βασική πηγή νερού τροφοδοσίας, απαιτεί μια σειρά σταδίων επεξεργασίας μέχρι την παραγωγή του τελικού προϊόντος καθαρού νερού. Αυτό απαιτείται διότι το θαλασσινό νερό, πέρα από τα ιόντα αλάτων, περιέχει και πολλές άλλες διαλυμένες ουσίες, η απομάκρυνση των οποίων κρίνεται αναγκαία για την παραγωγή πόσιμου νερού και δε δύναται να επιτευχθεί μέσω των μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης. Επίσης, ακόμα και μετά την απομάκρυνση των αλάτων από το νερό, πρέπει το αφαλατωμένο νερό να δεχθεί επιπλέον επεξεργασία, πολλές φορές για τον εμπλουτισμό του σε θρεπτικά συστατικά που αποβάλλονται κατά τη διαδικασία της αφαλάτωσης αλλά η ύπαρξη των οποίων είναι απαραίτητη στο πόσιμο νερό. Τα κυρίως στάδια μια μονάδας αφαλάτωσης είναι τα εξής :

- Στάδιο προεπεξεργασίας
- Στάδιο αντίστροφης όσμωσης
- Τελικό στάδιο επεξεργασίας



Εικόνα 6.1.1 Διάγραμμα ροής αφαλάτωσης με σύστημα αντίστροφης όσμωσης (Πηγή: Διπλωματική Εργασία: Οι μονάδες αφαλάτωσης στην Κύπρο)

### 6.1.1 Στάδιο προεπεξεργασίας

Κατά το στάδιο προεπεξεργασίας, αφαιρούνται στερεά υπολείμματα ή καταστρέφονται οι μικροοργανισμοί του νερού τροφοδοσίας, με σκοπό την προστασία των μεμβρανών κατά τη

λειτουργία τους στο στάδιο της αντίστροφης όσμωσης. Αποτελεί εξαιρετικά σημαντικό στάδιο και συνήθως περιέχει :

- Ένα φίλτρο στην είσοδο της τροφοδοσίας, για την αποφυγή εισροής μεγάλων αντικειμένων όπως σκουπίδια, φύκια ή και ζώα.
- Σύστημα προσθήκης χλωρίου με διάλυμα υποχλωριώδους νατρίου.
- Σύστημα προσθήκης οξέος για τη σωστή ρύθμιση της οξύτητας της τροφοδοσίας.
- Σύστημα προσθήκης χλωριούχου σιδήρου και ηλεκτρολύτη για τον διαχωρισμό οργανικών ουσιών.
- Ειδικά φίλτρα για την απομάκρυνση άμμου, χαλκικών και μικρών σωματιδίων.
- Φίλτρα πολυπροπυλενίου τα οποία μπορούν να απομακρύνουν στερεές ουσίες με μέγεθος μεγαλύτερο του 1μm για περεταίρω προστασία των μεμβρανών.
- Σύστημα αποχλωρίωσης, είτε με φίλτρα ενεργού άνθρακα είτε με θειούχο νάτριο, καθώς η παρουσία ελεύθερου χλωρίου προκαλεί καταστροφές στις μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης.

### 6.1.2 Στάδιο αντίστροφης όσμωσης

Κατά το στάδιο της αντίστροφης όσμωσης, αντλίες υψηλής πίεσης οδηγούν το νερό στις μεμβράνες με πίεση μεγαλύτερη της οσμωτικής, με σκοπό την κατακράτηση των αλάτων στις μεμβράνες και την παραγωγή του αφαλατωμένου νερού. Η πίεση αυτή είναι συνήθως από 54 έως 80 bar.

Όσο τα φίλτρα κατακρατούν τα άλατα, αυξάνεται η αλατότητα στο νερό το οποίο δεν διέρχεται από αυτά. Για την αποφυγή υπερκορεσμού του νερού τροφοδοσίας σε άλατα και αύξηση της απαιτούμενης οσμωτικής πίεσης για τη λειτουργία της διάταξης, μέρος του νερού τροφοδοσίας απορρίπτεται δίχως να οδηγηθεί στα οσμωτικά φίλτρα.

Έτσι προστατεύονται οι μεμβράνες των φίλτρων και δεν αυξάνεται η απαιτούμενη πίεση της αντλίας, το οποίο θα οδηγούσε σε μεγαλύτερες ενεργειακές καταναλώσεις. Το ποσοστό του απορριπτόμενου νερού εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας (αλμυρό/υφάλμυρο) και κυμαίνεται μεταξύ 20% και 70% σε περιπτώσεις αυξημένης αλατότητας.

### 6.1.3 Στάδιο τελικής επεξεργασίας

Μετά το πέρας του σταδίου αφαλάτωσης, το νερό χαμηλής περιεκτικότητας περνάει στο τελικό στάδιο επεξεργασίας, όπου γίνεται η ποιοτική προετοιμασία του για διανομή. Το στάδιο τελικής επεξεργασίας αποτελείται συνήθως από :

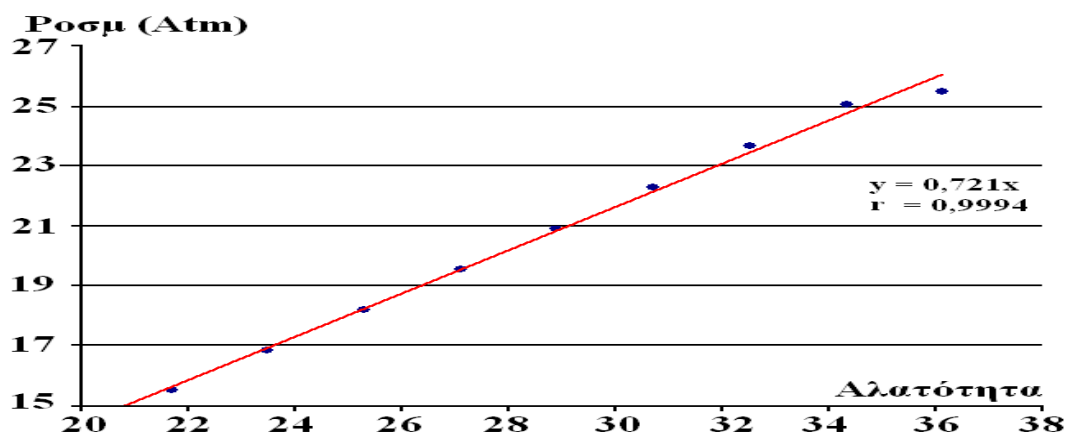
- Απομάκρυνση αερίων, όπως το υδρόθειο

- Κατάλληλη ρύθμιση του pH και αύξηση της σκληρότητας του παραγόμενου νερού με προσθήκη επεξεργασμένου ασβέστη και διοξειδίου του άνθρακα.
- Τελική προσθήκη χλωρίου στις προδιαγραφές του πόσιμου νερού.

Μετά την ολοκλήρωση και των τριών σταδίων, το παραγόμενο νερό ελέγχεται ποιοτικά και μπορεί να αποδοθεί για κατανάλωση.

Κάθε στάδιο της μεθόδου, καταναλώνει επιμέρους ενέργεια για την επεξεργασία του νερού και της διάταξης. Το συντριπτικά μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας ωστόσο, καταναλώνεται από τις αντλίες για την παροχή του νερού τροφοδοσίας υψηλής πίεσης. Η τροφοδοσία για την αποτελεσματική λειτουργία της διάταξης και συγκεκριμένα των μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης, πρέπει κάθε φορά να παρέχεται σε πίεση μεγαλύτερη της οσμωτικής του νερού τροφοδοσίας.

Η οσμωτική πίεση είναι ευθέως ανάλογη της περιεκτικότητας του νερού σε άλατα και για τον λόγο αυτό η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης έχει την μέγιστη απόδοση σε περιπτώσεις υφάλμυρων νερών, όπου η πίεση λειτουργίας της αντλίας είναι μεταξύ 15 και 25 bar. Η αντίστοιχη πίεση για νερά με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε άλατα, όπως είναι το θαλασσινό νερό, είναι 54 έως και 80 bar. Αυτό δεν καθιστά τις μονάδες μη αξιοποιήσιμες για επεξεργασία αλμυρού νερού, αυξάνει όμως σημαντικά το κόστος λειτουργίας αφού απαιτείται συνεχόμενη λειτουργία των ενεργοβόρων αντλιών σε πολύ υψηλές πιέσεις.



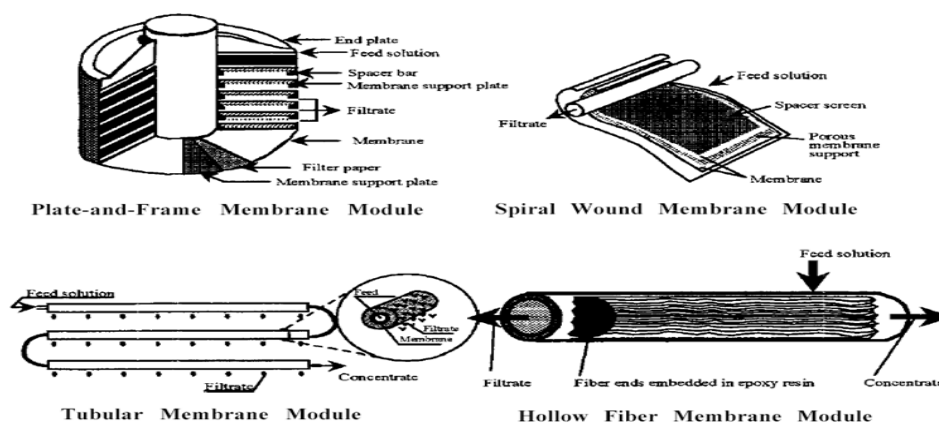
Εικόνα 6.1.2 Η μεταβολή της οσμωτικής πίεσης του θαλασσινού νερού σε συνάρτηση με την αλατότητα (Πηγή : Δασενάκης, Φυσικοχημικά Χαρακτηριστικά Γλυκού και Θαλασσινού νερού. Η Επίδρασή τους στο Θαλάσσιο Σύστημα)

Τέλος, σημειώνεται πως η μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας παρουσιάζεται κατά την αποβολή της άλμης, για τον καθαρισμό των φίλτρων και για τον έλεγχο της αλατότητας του νερού τροφοδοσίας. Επειδή όμως η άλμη αποβάλλεται με μεγάλη πίεση από τη διάταξη, πολύ συχνά αξιοποιείται σε μεγάλες μονάδες αφαλάτωσης με διάφορα συστήματα ανάκτησης ενέργειας, όπως π.χ. υδροστρόβιλοι, με απόδοση σήμερα έως και 95%.

## 6.2 Τύποι μεμβρανών στην αντίστροφη όσμωση

Από τα πιο σημαντικά στοιχεία μιας μονάδας αντίστροφης όσμωσης, είναι οι μεμβράνες των φίλτρων. Αυτές διατίθενται εμπορικά και συναντώνται συνήθως στους εξής τύπους (εικόνα 6.2) :

- Επίπεδος τύπος μεμβράνης.
- Σπειροειδής μεμβράνη.
- Σωληνωτός τύπος μεμβράνης.
- Μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης τριχοειδών ινών.



Εικόνα 6.2 Βασικοί τύποι στοιχείων μεμβρανών (Πηγή : Συσκάκη Καλλιόπη, Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την εγκατάσταση και λειτουργία μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση, 2013)

Τα βασικά συστήματα μεμβρανών χαρακτηρίζονται από κυλινδρικό σχήμα, για την ίση κατανομή των πιεστικών δυνάμεων του νερού υψηλής πίεσης στην εσωτερική επιφάνεια των φίλτρων. Έτσι επιτυγχάνεται ισορροπία δυνάμεων στις μεμβράνες, το οποίο αποτρέπει την φθορά ή αστοχία αυτών. Βασικός παράγοντας για την απόδοση του συστήματος είναι ο αριθμός των μεμβρανών που χρησιμοποιεί η διάταξη, οι οποίες τοποθετούνται σε παράλληλες μεταξύ τους συστοιχίες και αυξάνουν την ολική απόδοση. Οι εμπορικά διαθέσιμες μεμβράνες διαθέτουν συνήθως τα εξής χαρακτηριστικά :

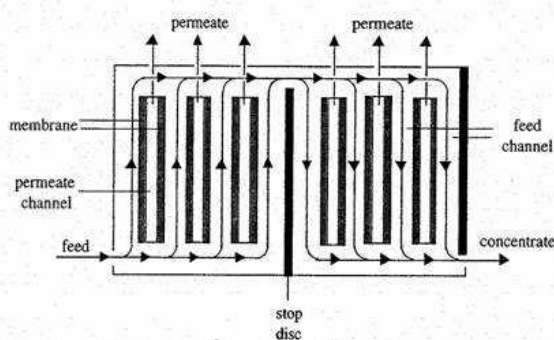
- Αποτελούνται από ένα λεπτό φιλμ πολυμερούς υλικού με πάχος μερικές χιλιάδες Angstroms τοποθετημένο σε πορώδες πολυμερές.
- Οι μεμβράνες του εμπορίου έχουν υψηλή διαπερατότητα στο νερό και υψηλό βαθμό ημιδιαπερατότητας, δηλαδή το κλάσμα της ροής του νερού προς τη ροή των διαλυμένων ιόντων είναι πολύ μεγάλο.
- Χαρακτηρίζονται από καλή μηχανική αντοχή, και η απόδοσή τους δε μεταβάλλεται σε μεγάλο φάσμα θερμοκρασίας και οξύτητας διαλύματος.
- Η διάρκεια ζωής των μεμβρανών του εμπορίου ορίζεται από 3 έως 5 χρόνια, ανάλογα με τον τύπο τους και τις συνθήκες λειτουργίας τους.

- Η πλειοψηφία των εμπορικών μεμβρανών περιλαμβάνει οξικά άλατα κυτταρίνης (cellulose acetate, CA) και πολυαμίδες (polyamide, PA).
- Συνήθως η επιλογή κατάλληλης μεμβράνης χαρακτηρίζεται από τη συμβατότητα με το σύστημα, παρά τις ίδιες τις προδιαγραφές απόδοσης της μεμβράνης.

(Πηγή: Mark Wilf, (2007), *The guidebook to Membrane Desalination Technology. Reverse Osmosis, Nanofiltration and Hybrid Systems*, ΚΑΠΕ : Σχεδιασμός συστημάτων αφαλάτωσης θαλασσινού νερού, 2006)

### 6.2.1 Επίπεδος τύπος

Οι μεμβράνες επίπεδου τύπου (ή δισκοειδή στοιχεία) αποτελούνται από αρκετά φύλλα μεμβρανών τα οποία είναι στοιβαγμένα και τοποθετημένα σε κατάλληλα στηρίγματα. Η τροφοδοσία του νερού κατευθύνεται από ειδικούς διαχωριστές ανάμεσα στις μεμβράνες, οι οποίοι ταυτόχρονα οδηγούν το φιλτραρισμένο νερό εκτός της διάταξης (Εικόνα 6.2.1). Βασικό πλεονέκτημα των μεμβρανών επίπεδου τύπου, είναι η υψηλής αντοχής κατασκευή τους. Αυτό τους επιτρέπει να λειτουργούν σε πιέσεις έως και 120 bar, ενώ ταυτόχρονα έχουν και μεγάλη αντοχή στη ρύπανση. Η υψηλών προδιαγραφών κατασκευή τους αποτελεί όμως ταυτοχρόνως και το μεγάλο μειονέκτημά τους, καθώς το κόστος αγοράς είναι αρκετά αυξημένο συγκριτικά με τους υπόλοιπους τύπους μεμβρανών, καθιστώντας τη χρήση τους αρκετά περιορισμένη.



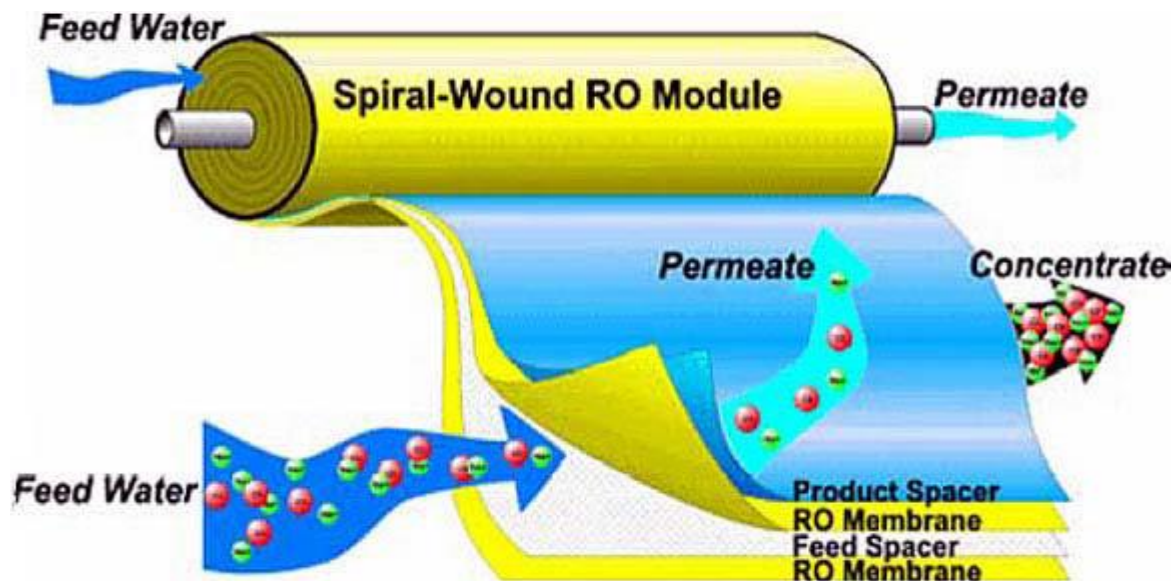
Εικόνα 6.2.1 Σχηματική απεικόνιση δισκοειδούς τύπου μεμβράνης (Πηγή: Mark Wilf, (2007), *The guidebook to Membrane Desalination Technology. Reverse Osmosis, Nanofiltration and Hybrid Systems*)

### 6.2.2 Σπειροειδής τύπος μεμβράνης

Ο τύπος των σπειροειδών μεμβρανών, αποτελείται από δύο επίπεδα φύλλα μεμβρανών συγκολλημένα μεταξύ τους. Ανάμεσα σε αυτά παρεμβάλλεται πορώδες υλικό το οποίο λειτουργεί ως διαχωριστής για τα δύο φύλλα. Το φιλτραρισμένο νερό του συστήματος συλλέγεται από διάτρητο σωλήνα, γύρω από τον οποίο τυλίγονται τα στοιχεία των συγκολλημένων φίλτρων. Η ανατομία των φίλτρων αυτών απεικονίζεται στην εικόνα 6.2.2. Μέσω του συστήματος τροφοδοσίας, το νερό εισέρχεται υπό πίεση στα φύλλα μεμβρανών, φιλτράρεται μέσω της μεμβράνης και οδηγείται στον κεντρικό σωλήνα συλλογής.

Τελευταίας τεχνολογίας φίλτρα με σπειροειδείς μεμβράνες επιτρέπουν την τύλιξη έως και 26 στοιχείων μεμβρανών γύρω από το σωλήνα συλλογής, με πλαστικά πλέγματα να διαχωρίζουν τα στοιχεία μεταξύ τους. Σε μια συνήθη διάταξη όμως χρησιμοποιούνται από 2 έως 6 στοιχεία για κάθε κύλινδρο πίεσης. Αυτά έχουν τυποποιημένες διαστάσεις με μήκος 1 μέτρου και διάμετρο με εύρος 10 έως 60 εκατοστών. Η τοποθέτησή τους γίνεται σε σειρά.

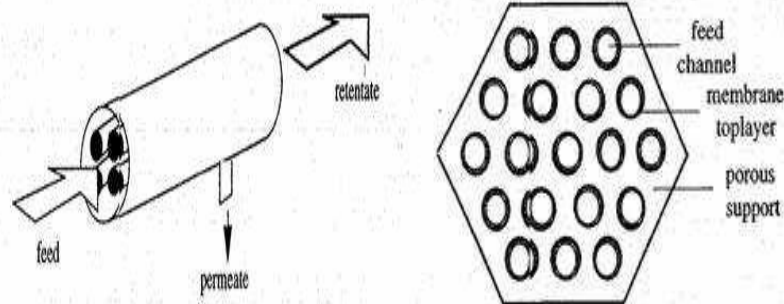
Ο τύπος της σπειροειδούς μεμβράνης παρουσιάζει μικρότερη αντίσταση ρύπανσης και χαμηλότερο όριο πίεσης λειτουργίας. Το χαμηλό κόστος παραγωγής και διάθεσης αυτών όμως τους έχει καταστήσει συνήθη επιλογή για πολλές μονάδες αφαλάτωσης.



Εικόνα 6.2.2 Σχηματική διαδικασία της RO, η οποία χρησιμοποιεί σπειροειδή μεμβράνη (Πηγή: Mark Wilf, (2007), *The guidebook to Membrane Desalination Technology. Reverse Osmosis, Nanofiltration and Hybrid Systems*)

### 6.2.3 Σωληνωτός τύπος μεμβράνης

Οι μεμβράνες σωληνωτού (σωληνοειδούς) τύπου, αποτελούνται από ένα διάτρητο σωλήνα ανοξείδωτου χάλυβα. Μέσω αυτού στηρίζονται οι μεμβράνες, οι οποίες έχουν σχήμα σωλήνα με διάμετρο από 0.7 έως και 2.5 εκατοστά. Το αλμυρό νερό υψηλής πίεσης ρέει μέσα στους σωλήνες και το αφαλατωμένο νερό εξέρχεται μέσω των μεμβρανών (εικόνα 6.2.3). Και αυτός ο τύπος παρουσιάζει αρκετά καλή αντοχή στη ρύπανση και χαρακτηρίζεται από ευκολία στον καθαρισμό των φίλτρων. Το κόστος παραγωγής τους όμως είναι αρκετά αυξημένο και για τον λόγο αυτό δεν χρησιμοποιούνται συνήθως σε τυπικές μονάδες αντίστροφης όσμωσης.



Εικόνα 6.2.3 Σχηματική απεικόνιση σωληνοειδούς στοιχείου (Πηγή : Συσκάκη Καλλιόπη, Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την εγκατάσταση και λειτουργία μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, 2013)

#### 6.2.4 Τύπος κοίλων (τριχοειδών) ινών

Οι μεμβράνες κοίλων ινών, αποτελούνται από μεγάλο αριθμό πολύ λεπτών τριχοειδών ινών σε δεσμίδες, με κάθε δέσμη να μπορεί να περιέχει μέχρι και 3000 ίνες. Αυτές τοποθετούνται σε κυλινδρικό δοχείο υψηλής πίεσης, όπου το νερό τροφοδοσίας εισέρχεται με πίεση στο εξωτερικό των ινών και το φιλτραρισμένο νερό χαμηλής περιεκτικότητας διέρχεται μέσω των ινών στο εσωτερικό του στοιχείου όπου και πραγματοποιείται η συλλογή του. Η παραγόμενη άλμη του συστήματος δεν έρχεται σε επαφή με το αφαλατωμένο νερό και εξέρχεται από άλλο σημείο της διάταξης. Οι μεμβράνες κοίλων ινών δεν είναι τόσο ανθεκτικές στη ρύπανση και παρουσιάζουν δυσκολία στον καθαρισμό τους.



Εικόνα 6.2.4 Εγκάρσια τομή κοίλης ίνας – στοιχείου κοίλων ινών (Πηγή : Συσκάκη Καλλιόπη, Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την εγκατάσταση και λειτουργία μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, 2013)



---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ & ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Όπως παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, η παραγωγή πόσιμου νερού μέσω των τεχνολογιών αφαλάτωσης και συγκεκριμένα της αντίστροφης όσμωσης είναι ίσως μια από τις πιο ελπιδοφόρες μεθόδους με προοπτικές να σταθεί αντιμέτωπη με την υδατική κρίση που χτυπάει την πόρτα του πλανήτη μας.

Μια από τις βασικές προκλήσεις που αντιμετωπίζει η αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση όμως, είναι η μέχρι στιγμής αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις της για την παραγωγή πόσιμου νερού. Αυτό οφείλεται στις μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις των αντλιών υψηλής πίεσης για παροχή νερού τροφοδοσίας με πίεση μεγαλύτερη της οσμωτικής του διαλύματος.

Για το λόγο αυτό, γίνονται συνεχείς προσπάθειες για την ανάπτυξη και συνεχή ενεργειακή βελτιστοποίηση των μεθόδων και τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται, ώστε η αντίστροφη όσμωση να μετατραπεί σε ρεαλιστικό και βιώσιμο μοντέλο στις περιοχές εφαρμογής της.

Επιπλέον, οι περιοχές με άμεσο ενδιαφέρον στην αφαλάτωση, χαρακτηρίζονται συνήθως και από ανεπαρκή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας ή μικρής κάλυψης και δυναμικής και δεν είναι δυνατόν χωρίς ταυτόχρονη επένδυση για την ανάπτυξη και ενίσχυση αυτών να μπορέσουν να καλύψουν τις ενεργειακές απαιτήσεις μιας μονάδας αφαλάτωσης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα ελληνικά νησιά, τα οποία ήδη αντιμετωπίζουν σε πολλές περιπτώσεις προβλήματα με το ηλεκτρικό τους δίκτυο, καθώς δεν συνδέονται με το ηπειρωτικό δίκτυο και στηρίζονται σε δίκτυα μικρής δυναμικής τροφοδοτούμενα πολλές φορές από γεννήτριες καύσης ορυκτών καυσίμων.

Επομένως γίνεται αντιληπτό, πως η επιτυχής εγκαθίδρυση των μονάδων αφαλάτωσης ως κυρίαρχη λύση στα προβλήματα λειψυδρίας, συμβαδίζει με την εύρεση εναλλακτικών πηγών για τη τροφοδότηση των ενεργειακών αναγκών τους. Στην εποχή που διανύουμε, η οποία χαρακτηρίζεται επίσης από το διευρυνόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη πιο “πράσινων” μορφών ενέργειας, η περίπτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον και για την τεχνολογία της αντίστροφης όσμωσης.

### 7.1 Δυνατότητες κάλυψης της αφαλάτωσης

Οι τρεις κυριότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) που διατίθεται σήμερα, είναι η ηλιακή, η αιολική και η γεωθερμική ενέργεια. Για την επιλογή της κατάλληλης πηγής απαιτείται κάθε φορά μελέτη των τοπικών παραμέτρων και συνθηκών της εγκατάστασης, όπως η τοπογραφία του προτεινόμενου χώρου εγκατάστασης, οι γεωγραφικές συνθήκες και φυσικά η κατανομή της διαθεσιμότητας στο χρόνο και το δυναμικό της επιλεγμένης ΑΠΕ.

Παρόλο που η παραγωγή ενέργειας μέσω ΑΠΕ έχει διευρυνθεί τις τελευταίες δεκαετίες, παρουσιάζει ακόμα σημαντικά προβλήματα τα οποία πρέπει κάθε φορά να συνυπολογιστούν, ειδικά στην περίπτωση τροφοδότησης μονάδων συνεχής ενεργειακής ζήτησης. Τα βασικά εξ

αυτών, που δυσχεραίνουν την λειτουργία μικρών κυρίως μονάδων που βασίζονται σχεδόν αποκλειστικά σε αυτές, είναι τα εξής :

- Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται από ασυνέχεια τόσο στο χρόνο όσο και στο δυναμικό τους, έναντι σταθερών και συνεχόμενων απαιτήσεων μιας μονάδας αφαλάτωσης.
- Δεν είναι εύκολη η αποθήκευση της ενέργειας, για την κάλυψη της σωστής λειτουργίας της μονάδας.
- Η τεχνολογία για τον συνδυασμό μιας μονάδας αφαλάτωσης και ενός συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ δεν έχει εξελιχθεί επαρκώς ώστε να παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια σε αποδεκτό κόστος.

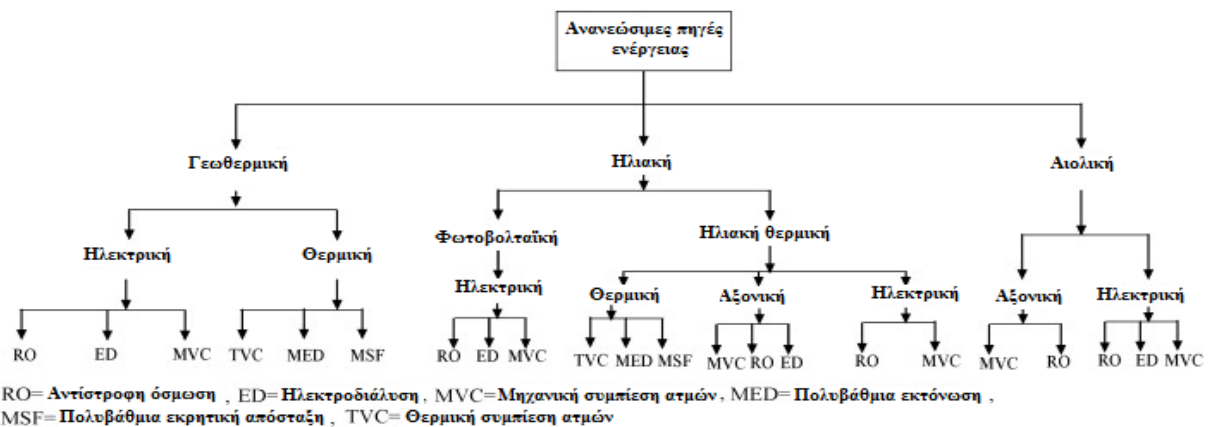
Στις περιπτώσεις συνδυασμού ΑΠΕ-μονάδων αφαλάτωσης, χρησιμοποιείται συνήθως παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών.

(Πηγή: Νικητάκος Νικήτας.: «Ανάπτυξη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο Θαλάσσιο Περιβάλλον», εκδόσεις Σιδέρη, 2008)

Κάθε πηγή ενέργειας βρίσκει καλύτερη εφαρμογή σε διαφορετική μέθοδο αφαλάτωσης. Αυτό καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τον συνδυασμό της μεθόδου αφαλάτωσης (θερμική ή μηχανική) και την μορφή της ανανεώσιμης ενέργειας.

Έτσι, ΑΠΕ θερμικής ενέργειας μπορούν να συνδυαστούν εύκολα με μονάδες απόσταξης, ενώ η μονάδες αντίστροφης όσμωσης συνήθως συνδυάζονται με αιολική ή ηλιακή ενέργεια. Αυτές οι μονάδες χρησιμοποιούν υφάλμυρο συνήθως νερό τροφοδοσίας και δεν είναι μεγάλης δυναμικής εγκαταστάσεις.

Από τις διαθέσιμες πηγές ενέργειας, η ηλιακή κατέχει την πρώτη θέση αφού χρησιμοποιείται στο 70% των περιπτώσεων, ενώ από τις μονάδες αφαλάτωσης τροφοδοτούμενες από παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ η αντίστροφη όσμωση καλύπτει το 62% των περιπτώσεων.



Εικόνα 7.1 Συνδυασμοί τεχνολογιών ΑΠΕ και μεθόδων αφαλάτωσης (Πηγή : Διπλωματική Εργασία, Μιχαλόπουλος Βασίλης)

### 7.1.1 Αφαλάτωση και αιολική ενέργεια

Η ενεργειακή κρίση του 70 σε συνδυασμό με τις πρώτες σοβαρές μελέτες για την αρνητική επίπτωση της βιομηχανικής επανάστασης στο περιβάλλον με την υποβάθμιση αυτού, έδωσαν μια ξαφνική πνοή στην ιδέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση ανεμογεννητριών. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν υποστηρίζοντας κατά περιπτώσεις τοπικά συμβατικά ηλεκτρικά δίκτυα, αξιοποιώντας αιολικά δυναμικά περιοχών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Σήμερα πλέον, η ιδέα της εκμετάλλευσης του αιολικού δυναμικού για τη παραγωγή πράσινης ενέργειας θεωρείται αρκετά διαδεδομένη, με αιολικά πάρκα μικρής, μεσαίας ή και μεγάλης δυναμικής να έχουν εγκατασταθεί σε διάφορες περιοχές του πλανήτη. Οι νέες τεχνολογικές καινοτομίες στην εφαρμογή των ανεμογεννητριών, ειδικά μικρού ή μεσαίου μεγέθους, έχουν μειώσει αισθητά το επενδυτικό κόστος, αυξάνοντας παράλληλα την απόδοση της παραγωγής τους. Σήμερα, οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται στις εξής τέσσερις κατηγορίες :

- Στις ανεμογεννήτριες **πολύ μικρού** μεγέθους, ονομαστικής ισχύος κάτω από 10 KW.
- Στις ανεμογεννήτριες **μικρού** μεγέθους με ονομαστική ισχύ μικρότερη από 100 KW.
- Στις ανεμογεννήτριες **μεσαίου** μεγέθους, ονομαστικής ισχύος μικρότερη από 0,5 MW.
- Στις ανεμογεννήτριες **πολύ μεγάλου** μεγέθους, ονομαστικής ισχύος μεγαλύτερη από 0,5 MW.

Από τις διαθέσιμες μορφές ΑΠΕ, βασικό πλεονέκτημα της αιολικής είναι πως δεν απαιτείται μεγάλος χώρος για την εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας, καθώς επίσης και το συγκριτικά χαμηλότερο επενδυτικό και λειτουργικό κόστος της. Για τον λόγο αυτό και σε συνδυασμό με την μικρή κατανάλωση ενέργειας της αντίστροφης όσμωσης, συγκρινόμενη με τις υπόλοιπες μεθόδους, συνδυασμός των δύο έχει καταστεί δημοφιλής λύση σε παράκτιες περιοχές, οι οποίες παρουσιάζουν ικανοποιητικό αιολικό δυναμικό.

### 7.1.2 Αφαλάτωση και ηλιακή ενέργεια

Η μέση ένταση της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στην ατμόσφαιρα είναι 1367 Watt ανά τετραγωνικό μέτρο. Υπάρχει σε μεγάλη αφθονία και έχει εξελιχθεί ως η πιο αξιοποιήσιμη από των άνθρωπο με πληθώρα εφαρμογών. Συνεχής είναι η εξέλιξη και πρόοδος στις εφαρμογές κάλυψης θερμικών αναγκών και σε πολλές περιπτώσεις τείνει να αντικαταστήσει πρότερες συμβατικές πηγές ενέργειας. Πλέον, φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να συνδυαστούν σε ικανοποιητικό βαθμό με μονάδες αφαλάτωσης ηλεκτροδιάλυσης, ενώ στην περίπτωση των εγκαταστάσεων ηλιακής απόσταξης γίνεται απευθείας χρήση της ηλιακής ενέργειας δίχως μετατροπή αυτής. Δυστυχώς όμως, στην περίπτωση των συστημάτων αντίστροφης όσμωσης δεν υπάρχει ακόμα μεγάλη συμβατότητα, καθώς η μεγάλη ποσότητα ενέργειας που καταναλώνουν απαιτεί δυσανάλογα μεγάλες εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών πεδίων. Η ηλιοκινούμενη αφαλάτωση (solar assisted) εμπεριέχει συστήματα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε θερμική με σκοπό την υποβοήθηση της διεργασίας αφαλάτωσης, όμως δεν έχει ευρεία εφαρμογή μέχρι στιγμής. (Πηγή : Πέππα Φλώρα: «Ηλιακή Αφαλάτωση και Μελέτη Ηλιακού Αποστακτήρα στην Περιοχή της Αθήνας Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα Νοέμβριος 2007)

Πολύ συχνά διάφορες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας συνεργάζονται για την τροφοδοσία μιας μονάδας, λειτουργώντας συμπληρωματικά και με εναλλαγή μεταξύ τους, ώστε να μειώνεται το κόστος και να αυξάνει η απόδοση. Αυτού του τύπου οι συνδυασμοί, με πληθώρα εφαρμογών για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών με μέγιστη σταθερότητα και αξιοπιστία, ονομάζονται υβριδικοί. Στην περίπτωση των υβριδικών συστημάτων, το σύστημα μπορεί να αποτελείται από φωτοβολταϊκά πάνελ σε συνεργασία με ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη ή και ανεμογεννήτριες. Έχει προκύψει πως υπό προϋποθέσεις, ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να έχει και μεγαλύτερα συνολικά κόστη από ένα υβριδικό σύστημα αντίστοιχης δυναμικής.

### 7.1.3 Αφαλάτωση και Γεωθερμία

Γεωθερμική ενέργεια καλούμε την θερμική ενέργεια που εκλύεται από το στέρεο πυρήνα της γης και ρέει προς τα εξωτερικά της στρώματα. Εφαρμογή της γεωθερμίας και μονάδων αφαλάτωσης μπορεί να γίνει στις εξής περιπτώσεις :

- Στην περίπτωση που η γεωθερμική πηγή εκλύει μεγάλο ποσοστό υπό πίεση ατμού, τότε ο ατμός αυτός μπορεί να συμπυκνωθεί παράγοντας άμεσα αφαλατωμένο νερό.
- Στην περίπτωση που η πηγή εκλύει μίγμα νερού και ατμού, το τελευταίο μπορεί να εκτονωθεί με κατάλληλη διάταξη παράγοντας ατμό ο οποίος κατευθύνεται σε ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας και η υπολειπόμενη άλμη διοχετεύεται κατάλληλα.
- Στην περίπτωση που η πηγή παράγει μίγμα μεγάλης αναλογίας σε νερό, μπορεί να τροφοδοτήσει ατμοποιητές πολλαπλών εκτονώσεων.

Τέλος, αναφέρεται πως η βιομάζα, ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, δεν θεωρείται κατάλληλη για εφαρμογές αφαλάτωσης, δεδομένου ότι εξαρχής απαιτεί σημαντική κατανάλωση νερού.



Εικόνα 7.2 Η μονάδα “Geysers Complex”, για την παραγωγή ενέργειας από γεωθερμία στην Καλιφόρνια, δυναμικής 1.520 MW (Πηγή : διαδίκτυο)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης του Εργαστηρίου ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ του ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ (εικόνα 8.1) η οποία και χρησιμοποιήθηκε για την λήψη των πειραματικών μετρήσεων για ενδεικτικές περιπτώσεις αλατότητας, με σκοπό την εκπόνηση της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας. Τα χαρακτηριστικά, οι λειτουργίες της ανά στάδιο επεξεργασίας, καθώς και η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την λήψη και επεξεργασία των μετρήσεων αναλύονται στα ακόλουθα υποκεφάλαια.



Εικόνα 8.1 Πειραματική μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης Εργαστηρίου ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ (Πηγή : Ποσοτικής Νικόλαος - Μελέτη και Πειραματικός Έλεγχος Επίδρασης της Αλατότητας στην Κατανάλωση Μονάδας Αντίστροφης Όσμωσης)

### 8.1 Υβριδικός σταθμός παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Η μονάδα αφαλάτωσης του εργαστηρίου ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας, είναι μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης του οίκου OSMO. Η μονάδα αυτή, έχει τη δυνατότητα τροφοδοσίας από τον πειραματικό υβριδικό σταθμό του εργαστηρίου, ο οποίος αποτελείται από:

- Ανεμογεννήτρια Whisper 100, ονομαστικής ισχύος 900 W, με δρομέα τριών πτερυγίων και διαμέτρου 2100 mm. Το σώμα της ανεμογεννήτριας είναι κατασκευασμένο από χυτό αλουμίνιο.
- Φωτοβολταϊκή μονάδα 8 συστοιχιών πολυκρυσταλλικού πυριτίου συνολικής ονομαστικής ισχύος 1540 Wp, με 16 συνολικά φωτοβολταϊκά πλαίσια (10 οίκου Kyocera, 2 οίκου Phaesun και 4 οίκου Aleo).
- 12 συσσωρευτές κλειστού τύπου οίκου Rolls, αργής εκφόρτισης και μεγάλης εκφόρτισης. Η σύνδεση είναι σε σειρά ανά 4 και στη συνέχεια εν παραλλήλω.

## 8.2 Βασικά στοιχεία μονάδας αφαλάτωσης

Η ίδια η μονάδα, αποτελεί ολοκληρωμένο κύκλωμα, με τρεις κυλίνδρους ημιπερατών μεμβρανών. Τα βασικά στοιχεία του κυκλώματος αυτού, περαν τον μεμβρανών είναι :

- Η κεντρική μονάδα αφαλάτωσης
- Η δεξαμενή τροφοδοσίας
- Τη δεξαμενή επεξεργασμένου προϊόντος
- Δύο δεξαμενές για χλωρίωση και αποχλωρίωση
- Η αντλία τροφοδοσίας
- Φίλτρο άμμου, φίλτρο ενεργού άνθρακα, φίλτρα 5  $\mu\text{m}$  και 20  $\mu\text{m}$

**Η κεντρική μονάδα αφαλάτωσης**, η οποία ελέγχει τις παραμέτρους λειτουργίας της μονάδας, αποτελείται από :

1. Ηλεκτρικό πίνακα ελέγχου βασικών ρυθμίσεων μονάδας και ενδείξεις αγωγιμότητας, θερμοκρασίας, χρόνου λειτουργίας.
2. Ηλεκτρικός πίνακας ασφαλειών της ηλεκτρικής εγκατάστασης.
3. Μανόμετρο εισόδου, μανόμετρο παραγωγής.
4. Ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα εισόδου.
5. Αναλογικό μανόμετρο.
6. Αντλία αντίστροφης όσμωσης.
7. Ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα παραγωγής.
8. Ροόμετρο παραγωγής.
9. Πιεσοστάτες παραγωγής και πίεσης εισόδου
10. Ροόμετρα αποβλήτων.
11. Μανόμετρο πίεσης εξόδου.
12. Κύλινδροι ημιπερατής μεμβράνης.

Η **Δεξαμενή τροφοδοσίας**, είναι η δεξαμενή προετοιμασίας του διαλύματος με την εκάστοτε επιθυμητή αλατότητα. Είναι κυλινδρικού τύπου δεξαμενή, χωρητικότητας 100 λίτρων.

Η **Δεξαμενή επεξεργασμένου προϊόντος**, είναι ορθογώνια δεξαμενή χωρητικότητας 400 λίτρων, η οποία συλλέγει το νερό της παραγωγής της μονάδας.

Οι **Δεξαμενές χλωρίωσης και αποχλωρίωσης**. Κάθε δεξαμενή έχει δοσομετρική αντλία για την προσθήκη της επιθυμητής ποσότητας χημικής ουσίας στο νερό τροφοδοσίας. Η χωρητικότητα κάθε μιας είναι 200 λίτρα.

Η **Αντλία τροφοδοσίας**, έχει ως βασική χρήση την τροφοδοσία του νερού δεξαμενής τροφοδοσίας στην κύρια αντλία της διάταξης. Επίσης, φροντίζει για την ανάδευση του νερού τροφοδοσίας για την αποφυγή κατακρήσθησης ιζήματος αλατιού και τη δημιουργία ομοιόμορφου διαλύματος.

Τα φίλτρα **άμμου, ενεργού άνθρακα, 5  $\mu\text{m}$  και 20  $\mu\text{m}$** , φροντίζουν για τον τελικό καθαρισμό από μικροοργανισμούς και στερεά σωματίδια του νερού τροφοδοσίας, προτού εκείνο εισέλθει στην κυρίως αντλία και στις μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης.

### 8.3 Λειτουργία πειραματικής εγκατάστασης αφαλάτωσης

Η πειραματική διαδικασία είχε σκοπό την λήψη μετρήσεων από τα μανόμετρα εξόδου, μανόμετρα εισόδου, παροχής καθαρού νερού, παροχής άλμης, έντασης ρεύματος της αντλίας και ηλεκτρικής κατανάλωσης της πειραματικής μονάδας, για μεταβαλλόμενη πίεση εισόδου του νερού τροφοδοσίας και για διαφορετικά σενάρια ποιότητας (αλατότητας) νερού τροφοδοσίας.

Για τον λόγο αυτό, αρχικά απαιτήθηκε η προετοιμασία του διαλύματος στην επιθυμητή ανά περίπτωση αλατότητα. Αυτό επιτεύχθηκε με τη σταδιακή διάλυση άλατος σε νερό αρχικά σε βοηθητικό δοχείο μικρής χωρητικότητας και μετέπειτα προσθήκη αυτού στην δεξαμενή τροφοδοσίας, ή οποία ήδη περιείχε ποσότητα νερού. Με την ενεργοποίηση της αντλίας τροφοδοσίας και κατάλληλη ρύθμιση της διάταξης, επιτεύχθηκε η ανακυκλοφορία/ανάδευση του νερού της δεξαμενής τροφοδοσίας.

Με την ολοκλήρωση της ανάδευσης, προχωρήσαμε στη λήψη δείγματος του νερού από την κυρίως δεξαμενή και με τη βοήθεια ηλεκτρονικού αγωγιμόμετρου, λαμβάναμε την τιμή αλατότητας του διαλύματος. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε, έως ότου επιτύχουμε το επιθυμητής αλατότητας κάθε φορά διάλυμα.

Μετά την επίτευξη της επιθυμητής αλατότητας, η μονάδα τίθεται σε λειτουργία. Αρχικά, πραγματοποιείται έλεγχος της συνδεσμολογίας στο κύκλωμα των αγωγών του συστήματος, ώστε να βρίσκονται σε θέση λειτουργίας. Έπειτα, η μονάδα τίθεται σε λειτουργία από τον κεντρικό διακόπτη στον ηλεκτρικό πίνακα με επιλογή αυτόματης λειτουργίας.

Με την ενεργοποίηση της μονάδας, ξεκινούσε η λειτουργία πρωτεύοντος πλυσίματος της διάταξης, το οποίο αποσκοπεί στον καθαρισμό του συστήματος από κατάλοιπα προηγούμενης χρήσης. Με την ολοκλήρωση της πλύσης, ενεργοποιείται η κεντρική αντλία του συστήματος και ξεκινούσε η τροφοδοσία των φίλτρων αντίστροφης όσμωσης με υψηλής πίεσης νερό τροφοδοσίας.

Σημειώνεται, πως κατά τη διάρκεια λειτουργίας της μονάδας, δινόταν ιδιαίτερη προσοχή στα εξής σημεία :

- Η πίεση στο μανόμετρο προ των μεμβρανών, δεν πρέπει να είναι μικρότερη των 20 bar, ειδάλλως διακόπτεται η λειτουργία της μονάδος.
- Η πίεση στο μανόμετρο μετά από τις μεμβράνες, δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 65 bar, ειδάλλως διακόπτεται η λειτουργία της μονάδος.
- Η διαφορά πίεσης προ και μετά των μεμβρανών πρέπει να είναι από 5 έως και 7 bar.

Με την επιτυχή ολοκλήρωση κάθε πειραματικής διαδικασίας και λήψης των απαιτούμενων μετρήσεων, ο χειριστής θέτει το σύστημα σε κατάσταση αναμονής. Κατά τον τερματισμό της λειτουργίας, ενεργοποιείται η λειτουργία δευτερεύοντος πλυσίματος για προκαθορισμένο

χρόνο και με την ολοκλήρωση αυτού ξεκινάει η έκπλυση του συστήματος, κατά την οποία διοχετεύεται καθαρό νερό δικτύου για τον καθαρισμό του συστήματος. Με την ολοκλήρωση της έκπλυσης, τερματίζεται και η λειτουργία της μονάδας.

#### 8.4 Λήψη και επεξεργασία μετρήσεων

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, λήφθηκαν μετρήσεις πίεσης εξόδου αντλίας ΥΠ (“ $P_{hp}$ ” σε bar), παροχής αφαλατωμένου νερού (“ $Q_{des}$ ” σε l/h), παροχής αποβλήτων (“ $Q_{brine}$ ” σε l/h), έντασης ρεύματος αντλίας ΥΠ (“ $I_{hp}$ ” σε A) και μέτρηση ηλεκτρικής κατανάλωσης (“ $N_{load}$ ” σε W).

Οι μετρήσεις αυτές έπειτα γινόντουσαν εκ νέου, αυξάνοντας την πίεση αφαλάτωσης κατά 5 bar, σε εύρος 20 έως 55 bar.

Η όλη διαδικασία επαναλήφθηκε για διαφορετικά σενάρια κάθε φορά ως προς την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας. Συγκεκριμένα, ελήφθησαν μετρήσεις για τιμές αγωγιμότητας (αλατότητας) για περιπτώσεις :

- Νερό δικτύου (327  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , βάση ΕΥΔΑΠ).
- Υδατικό διάλυμα 2.600~2.700  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .
- Υδατικό διάλυμα 40.400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .
- Υδατικό διάλυμα 51.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .
- Υδατικό διάλυμα 63.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Με βάση τις διαθέσιμες μετρήσεις, προχωρήσαμε στην επεξεργασία αυτών, ακολουθώντας την εξής μεθοδολογία :

- Υπολογισμός μέσης αποδιδόμενης ισχύος στην έξοδο της αντλίας :  
$$N_w = P_{hp} * (Q_{des} + Q_{brine})$$
- Μέση απορροφούμενη ισχύς της αντλίας :  
$$N_{hp} = I_{hp} * V_{net} * \cos\phi$$
 (όπου  $\cos\phi$  λαμβάνεται ίσος με 1 για λόγους απλούστευσης και  $V_{net}$  τάση δικτύου 230V)
- Μέση απορροφούμενη ισχύς από συσσωρευτές :  
$$N_{bat} = I_{bat} * V_{bat}$$
- Αποδιδόμενη ενέργεια στην έξοδο της αντλίας :  
$$E_w = N_w * t$$
- Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από την αντλία :  
$$E_{hp} = N_{hp} * t$$



- Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα αφαλάτωσης :  
 $E_{load} = N_{load} * t$
- Απορροφούμενη ενέργεια από τους συσσωρευτές :  
 $E_{bat} = N_{bat} * t$
- Βαθμός απόδοσης αντλίας :  
 $\eta_{hp} = E_w / E_{hp}$
- Βαθμός απόδοσης αντιστροφέα τάσης :  
 $\eta_{hybrid} = E_{load} / E_{bat}$
- Ολικός βαθμός απόδοσης διάταξης :  
 $\eta_{overall} = E_w / E_{bat}$

Με βάση τις επεξεργασμένες τιμές και τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για κάθε σενάριο αλατότητας, παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 9 αναλυτικά διαγράμματα για :

1. Την μεταβολή της ποσότητας παραγωγής καθαρού νερού και άλμης σε συνάρτηση της πίεσης λειτουργίας του συστήματος.
2. Τη μεταβολή της ισχύος στην έξοδο της αντλίας, της απορροφούμενης ισχύος από την αντλία και της μέσης απορροφούμενης ισχύος από τους συσσωρευτές, συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας του συστήματος
3. Τη μεταβολή του βαθμού απόδοσης της αντλίας, του αντιστροφέα τάσης καθώς και του ολικού βαθμού απόδοσης της διάταξης, συναρτήσει της μεταβολής πίεσης λειτουργίας συστήματος.

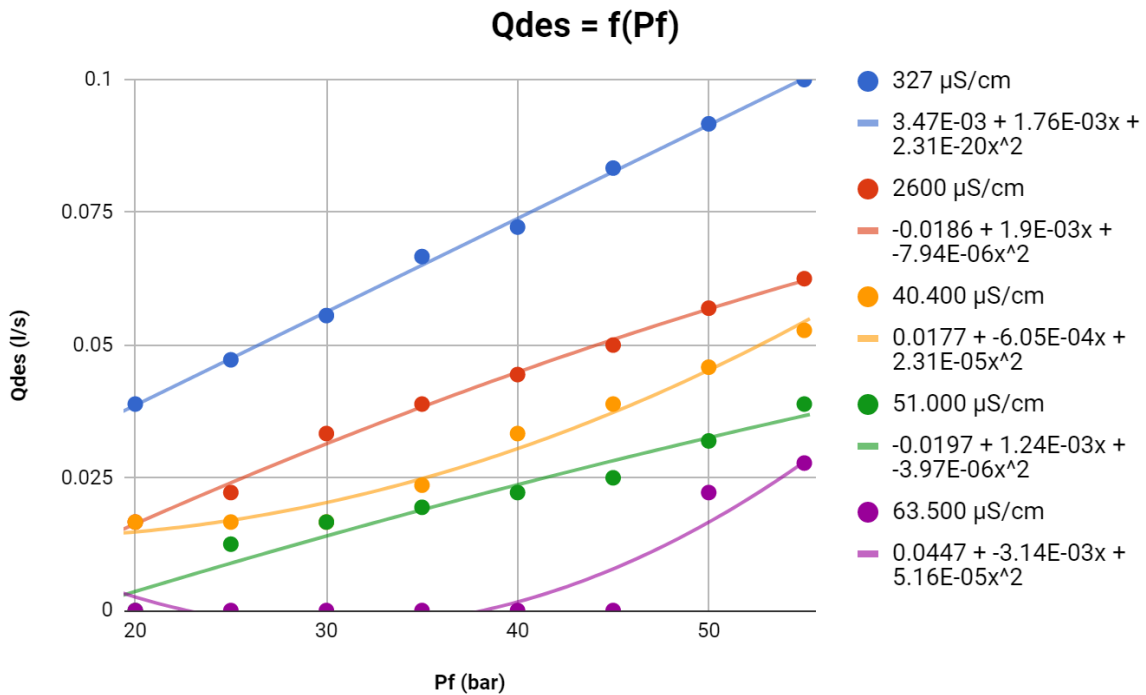
Τέλος, για κάθε σειρά μετρήσεων και για κάθε υπό μελέτη περίπτωση τιμή αλατότητας νερού, παρουσιάζεται η ανηγμένη τιμή κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή αφαλατωμένου νερού. Οι ληφθείσες μετρήσεις για κάθε περίπτωση και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας αυτών, παρουσιάζονται στο παράρτημα της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας και της επεξεργασίας των πειραματικών μετρήσεων, καθώς και γίνεται μια συνολική αποτίμηση αυτών αξιολογώντας τη δυνατότητα αποδοτικής λειτουργίας της μονάδας, λαμβάνοντας ενδεικτικές περιπτώσεις για δυνατότητα λειτουργίας αυτής σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας.

## 9.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων πειραματικής διάταξης

Αρχικά μελετήθηκε η δυνατότητα παραγωγής του συστήματος στις υπό εξέταση περιπτώσεις, τόσο για τη δυνατότητα παραγωγής επεξεργασμένου αφαλατωμένου νερού, όσο και για την παράπλευρη παραγωγή άλμης από τη μονάδα αφαλάτωσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται υπό τη μορφή διαγραμμάτων (γράφημα 1, γράφημα 2).

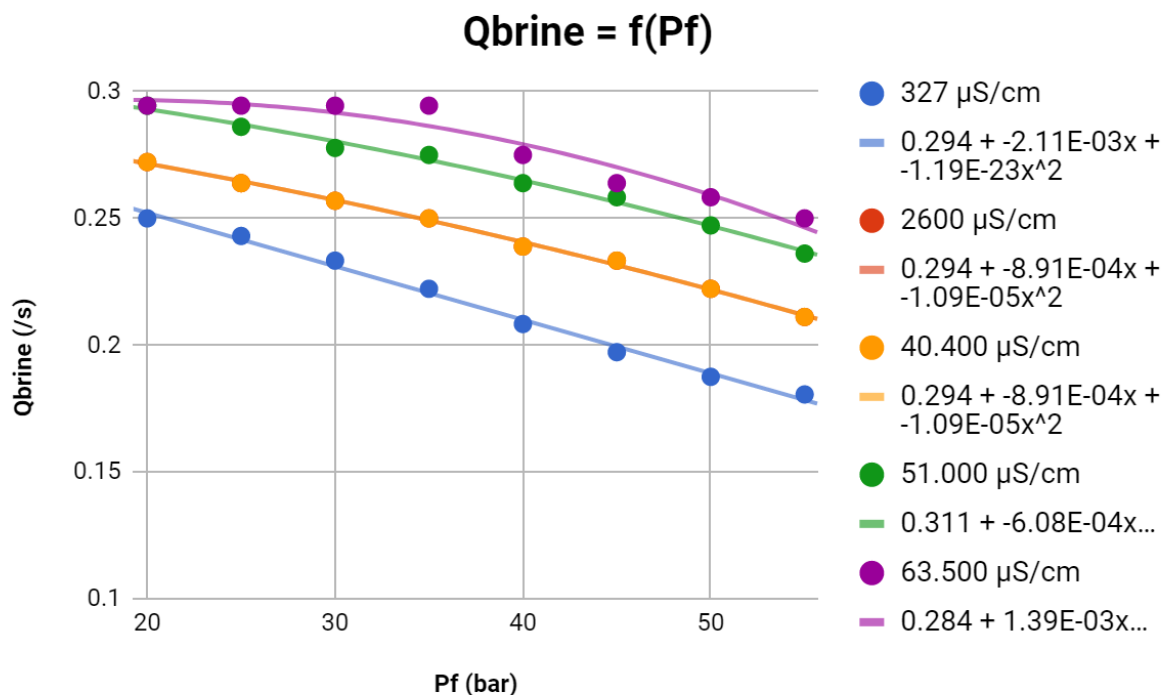


Γράφημα 1. Μεταβολή της παραγωγής αφαλατωμένου νερού συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας της αντλίας υψηλής πίεσεως.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα των γραφημάτων, αρχικά παρατηρείται αύξηση της παραγωγής και μείωση της παραγόμενης άλμης με την αύξηση της πίεσης λειτουργίας στην αντλία υψηλής πίεσης. Το συμπέρασμα αυτό βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με τα θεωρητικά μας δεδομένα, καθώς αυξάνοντας την πίεση στην παροχή του νερού τροφοδοσίας, μεγαλύτερη ποσότητα αυτού διέρχεται από τις μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης που οδηγεί στην αύξηση της παραγωγής της διάταξης.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μηδενική παραγωγή του συστήματος στις περιπτώσεις των διαλυμάτων :

- 51.000 μS/cm για πίεση αντλίας 20 bar.
- 63.500 μS/cm για πίεση αντλίας 20 και 25 bar.



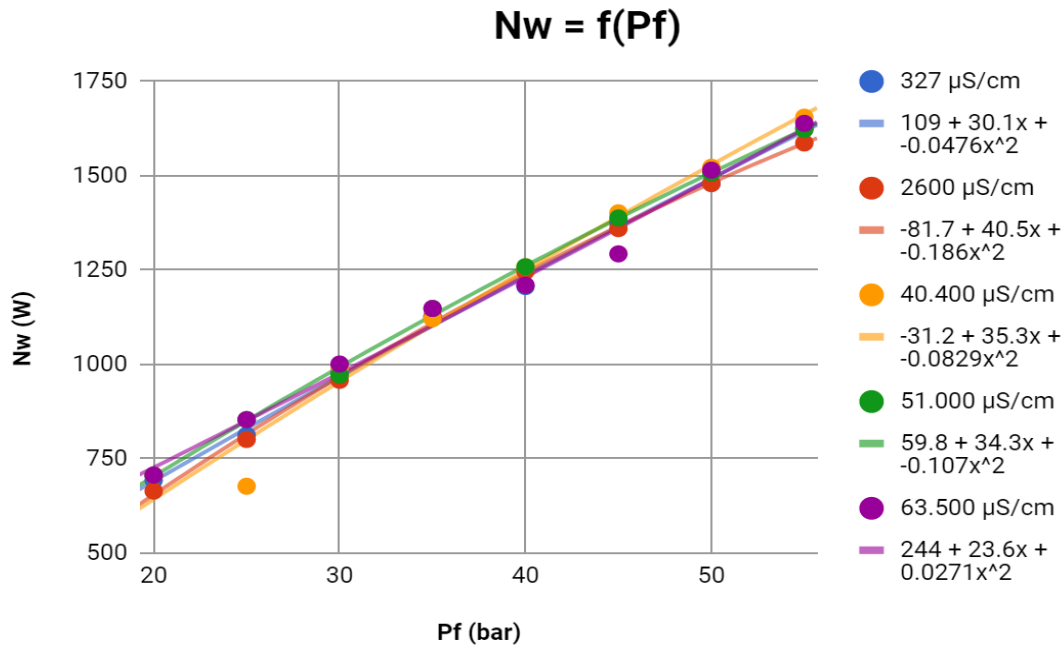
Γράφημα 2. Μεταβολή της παραγωγής άλμης από την πειραματική μονάδα αφαλάτωσης, συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας.

Στις περιπτώσεις αυτές, η προσφερόμενη πίεση της αντλίας είναι μικρότερη αυτής της απαιτούμενης οσμωτικής πίεσης διαλύματος, το οποίο οδηγεί στην ανικανότητα των μεμβρανών να επεξεργαστούν το νερό τροφοδοσίας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η οσμωτική πίεση είναι ευθέως ανάλογη της αλατότητας του διαλύματος, οπότε και αποτυχία παραγωγής για χαμηλές πιέσεις λειτουργίας στα δύο διαλύματα υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα κρίνεται αναμενόμενο αποτέλεσμα.

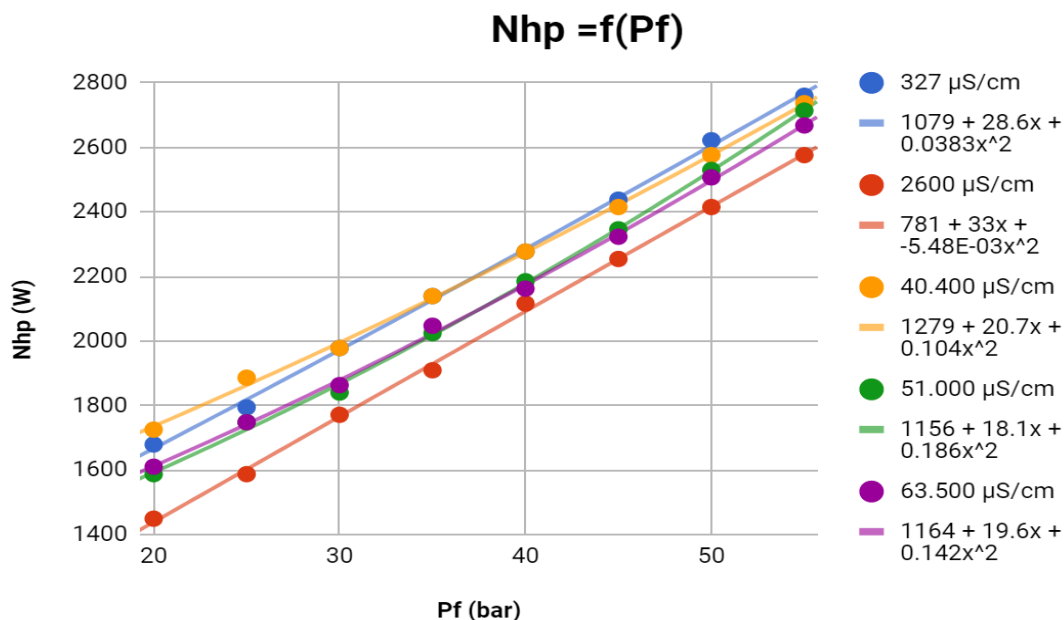
Στη συνέχεια εξετάζεται η μεταβολή της αποδιδόμενης ισχύος στην έξοδο της αντλίας, της απορροφούμενης από την αντλία ισχύος και της μέσης απορροφούμενης ισχύος από τους συσσωρευτές της διάταξης (γράφημα 3, γράφημα 4, γράφημα 5). Αρχικά παρατηρείται η αύξηση της μέσης αποδιδόμενης ισχύος στην έξοδο με την αύξηση της πίεσης λειτουργίας στην έξοδο της αντλίας ΥΠ. Το γεγονός αυτό είναι απολύτως αναμενόμενο, καθώς αυτή ακριβώς είναι η λειτουργία που πρέπει να επιτελέσει η αντλία της διάταξης. Επίσης, παρατηρείται πολύ μικρή διακύμανση στην ισχύ για κάθε περίπτωση διαλύματος. Η παρατήρηση αυτή κρίνεται επίσης αποδεκτή, αφού η αποδιδόμενη ισχύς στην έξοδο της αντλίας δεν εξαρτάται από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του διαλύματος, παρά μόνο από τις τεχνικές προδιαγραφές της ίδιας της αντλίας. Μικρές διαφοροποιήσεις μπορούν να αποδοθούν κατά βάση στην διακριτική ικανότητα των οργάνων μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν. Η αύξηση της απορροφούμενης πίεσης από την αντλία παράλληλα με την αύξηση της αποδιδόμενης από αυτήν πίεσης, ευκόλως ερμηνεύεται από την ανάγκη άντλησης μεγαλύτερης ποσότητας ενέργειας της αντλίας για την παροχή υψηλότερης πίεσης στην έξοδό της. Και πάλι, η ποιότητα του νερού δεν επηρεάζει την κατανάλωση ισχύος.

Αντιστοίχως, αυξάνοντας την πίεση λειτουργίας της αντλίας, αυξάνει και η απορροφούμενη από τους συσσωρευτές ισχύς. Η αύξηση αυτή οφείλεται στον προγραμματισμένη σύμπραξη των συσσωρευτών, από τους οποίους και απορροφάται μεγαλύτερη ισχύς για την πλήρωση της

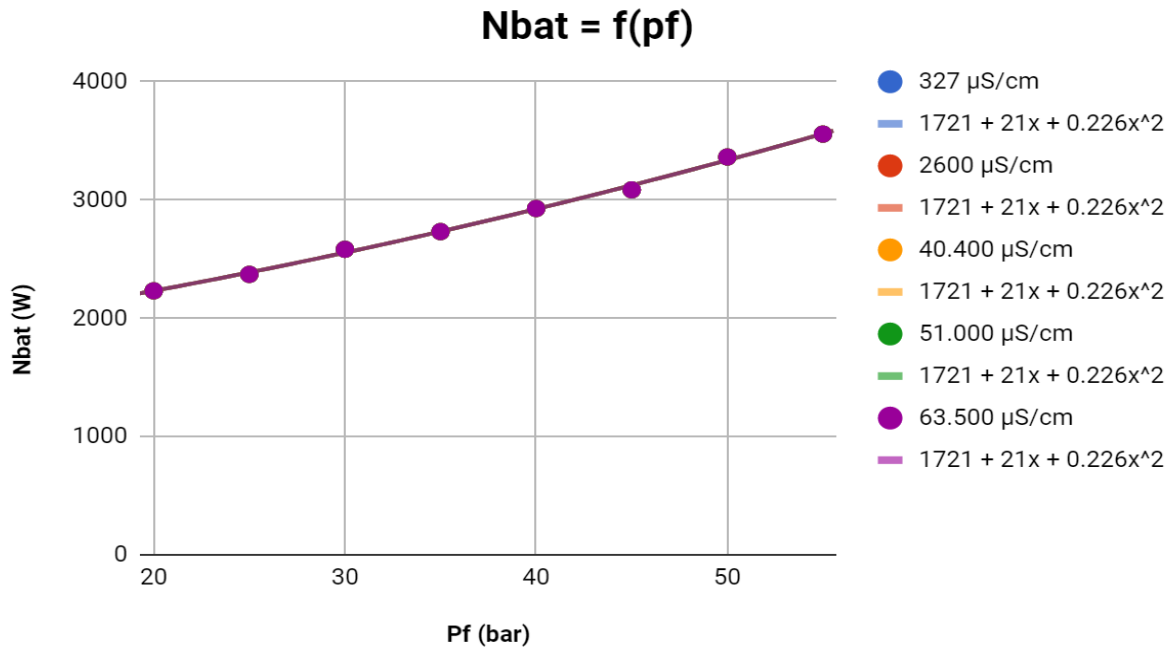
απαιτούμενης από την αντλία κατανάλωσης. Η μη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων για τις κατ' εξέταση περιπτώσεις διαλυμάτων, οφείλεται στο ότι η ζητούμενη ισχύς από την αντλία, μέρος της οποίας καλύπτεται από τους συσσωρευτές, καθορίζεται από τις τεχνικές δυνατότητες της αντλίας και όχι από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του διαλύματος τροφοδοσίας.



Γράφημα 3. Μεταβολή της μέσης αποδιδόμενης ισχύος στην έξοδο της αντλίας συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας αντλίας.

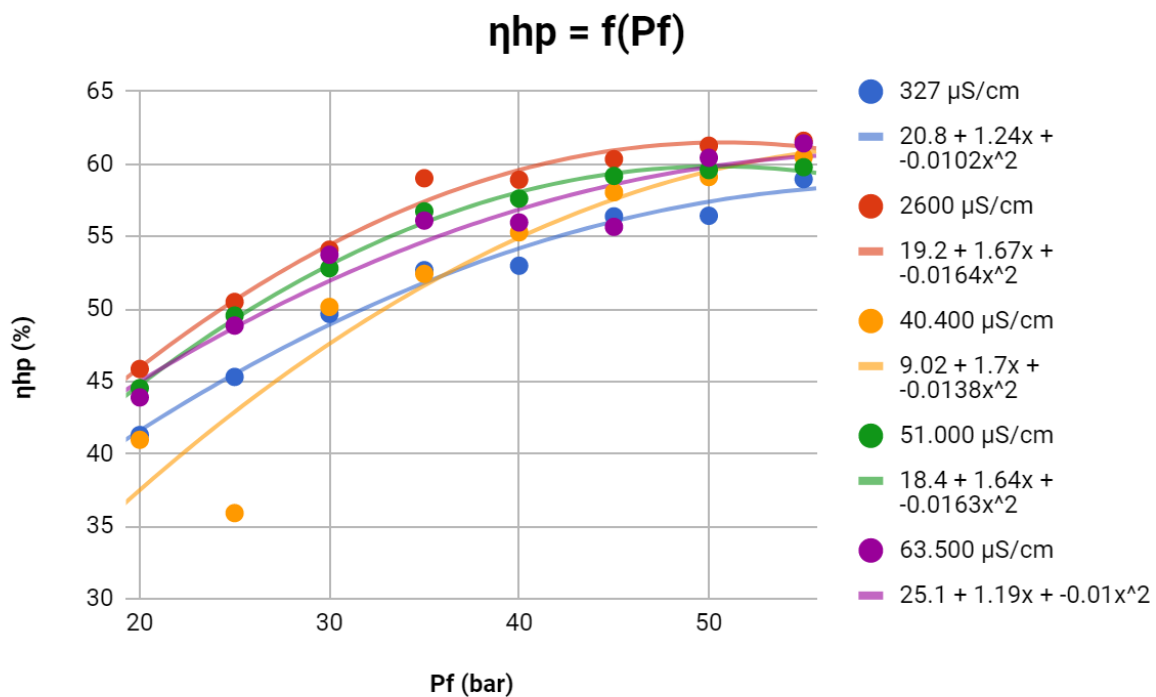


Γράφημα 4. Μεταβολή της μέσης απορροφούμενης ισχύος από την αντλία συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας αντλίας.

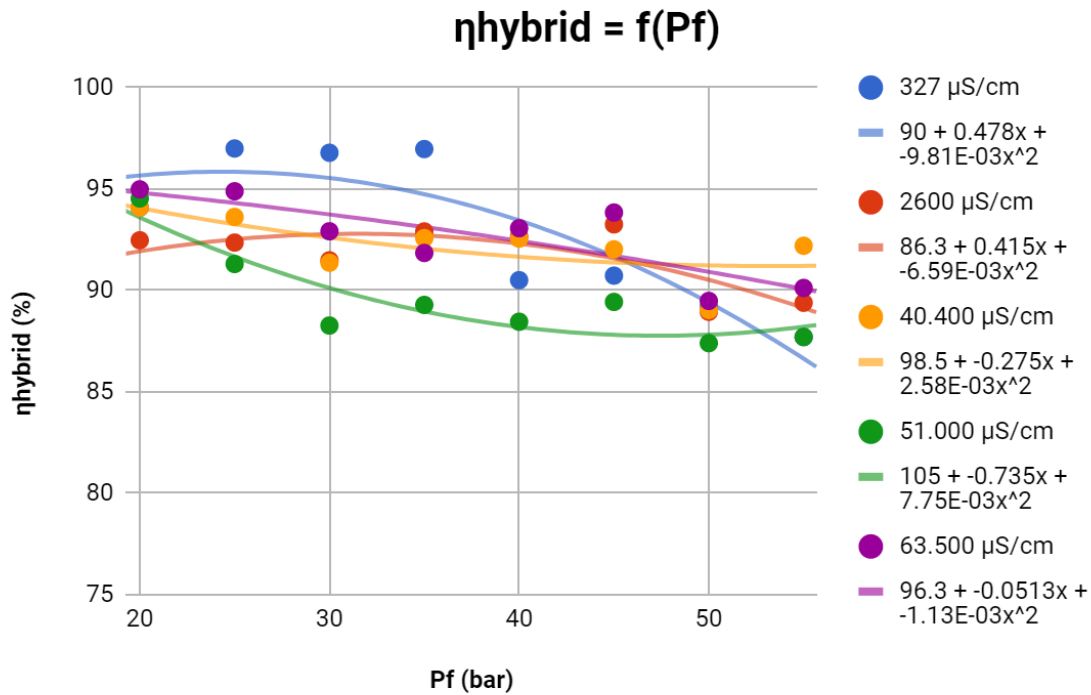


Γράφημα 5. Μεταβολή της μέσης απορροφούμενης ισχύος από τους συσσωρευτές της διάταξης, συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας αντλίας.

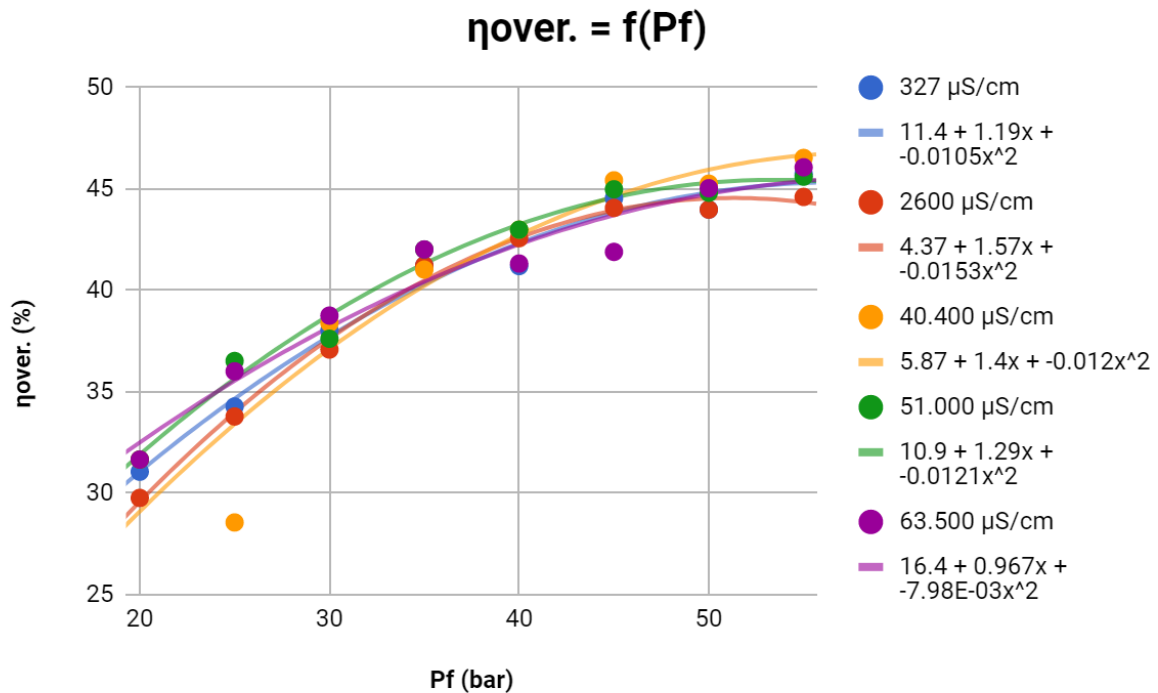
Τέλος, παρουσιάζονται οι μεταβολές των αποδόσεων της αντλίας, του αντιστροφέα τάσης και του ολικού βαθμού απόδοσης της διάταξης, για κάθε σενάριο αλατότητας, συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας της αντλίας (γράφημα 6, γράφημα 7, γράφημα 8).



Γράφημα 6. Μεταβολή της απόδοσης αντλίας συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας.



Γράφημα 7. Μεταβολή απόδοσης αντιστροφέα τάσης συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας.



Γράφημα 8. Μεταβολή ολικού βαθμού απόδοσης της διάταξης συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας.

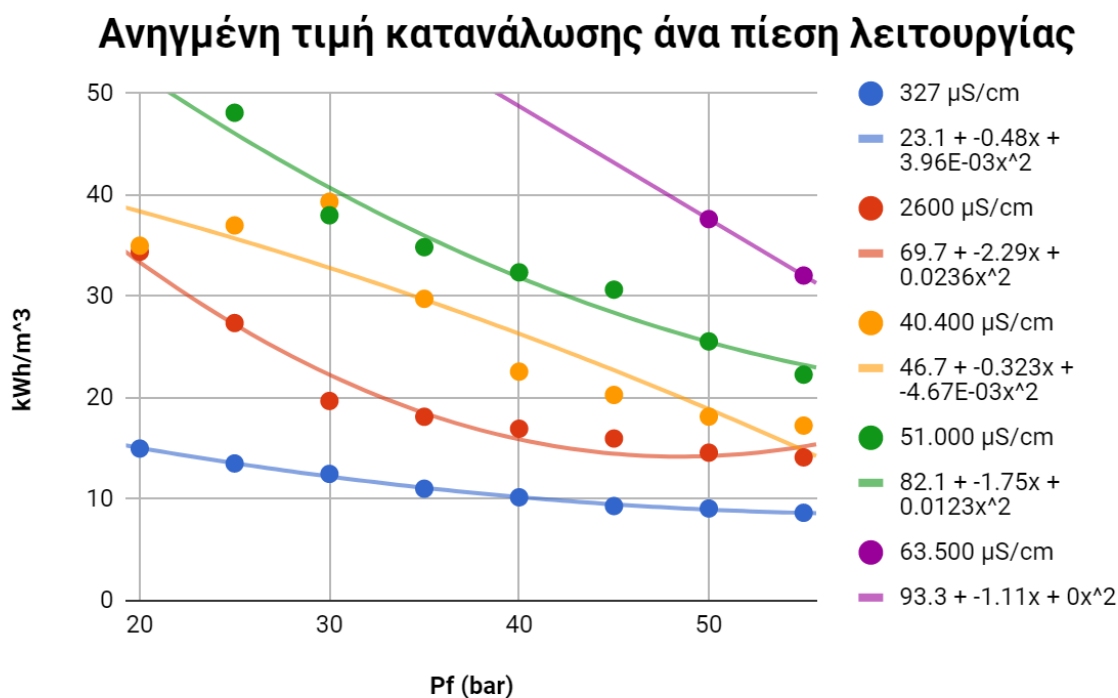
Όπως παρατηρούμε, ο συνολικός βαθμός απόδοσης της διάταξης κυμαίνεται από 0.3 έως και 0.45 και η βέλτιστη πίεση λειτουργίας της διάταξης ορίζεται στα 50 bar.

Η απόδοση του συστήματος δεν επηρεάζεται από την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας. Το συμπέρασμα αυτό εξηγείται με το γεγονός πως η σύμπραξη των συσσωρευτών της διάταξης στην ενεργειακή τροφοδότηση της αντλίας είναι προγραμματισμένη και προκαθορισμένη.

## 9.2 Συμπεράσματα-σχολιασμός

Με την ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας, αποσκοπείται η επίτευξη δύο στόχων. Επιδιώκεται η μελέτη και κατανόηση της λειτουργίας μιας ολοκληρωμένης μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης για την διαδικασία της παραγωγής πόσιμου νερού από υδατικά διαλύματα αλάτων, καθώς και η συμπεριφορά αυτών σε πλήθος παραμέτρων που χαρακτηρίζουν και επηρεάζουν την συγκεκριμένη μέθοδο. Ταυτόχρονα, αποτελεί παρακαταθήκη για κάθε μελλοντική μελέτη για την εφαρμογή της αφαλάτωσης στον ελλαδικό χώρο, δημιουργώντας μια βάση πειραματικά επικυρωμένων αποτελεσμάτων για ένταξη σε θεωρητικά μοντέλα για την μελέτη εγκατάστασης υβριδικών εγκαταστάσεων με συμμετοχή μονάδων αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης.

Για την συνολική αποτίμηση της πειραματικής διαδικασίας, παρουσιάζεται η ανηγμένη τιμή κατανάλωσης ανά πίεση λειτουργίας για την παραγωγή πόσιμου νερού, όπως προέκυψε από την ολοκλήρωση της μελέτης (γράφημα 9).



Γράφημα 9. Ανηγμένη τιμή κατανάλωσης ανά πίεση λειτουργίας για διαφορετικές τιμές αλατότητας.

Συμπεραίνουμε λοιπόν τα εξής :

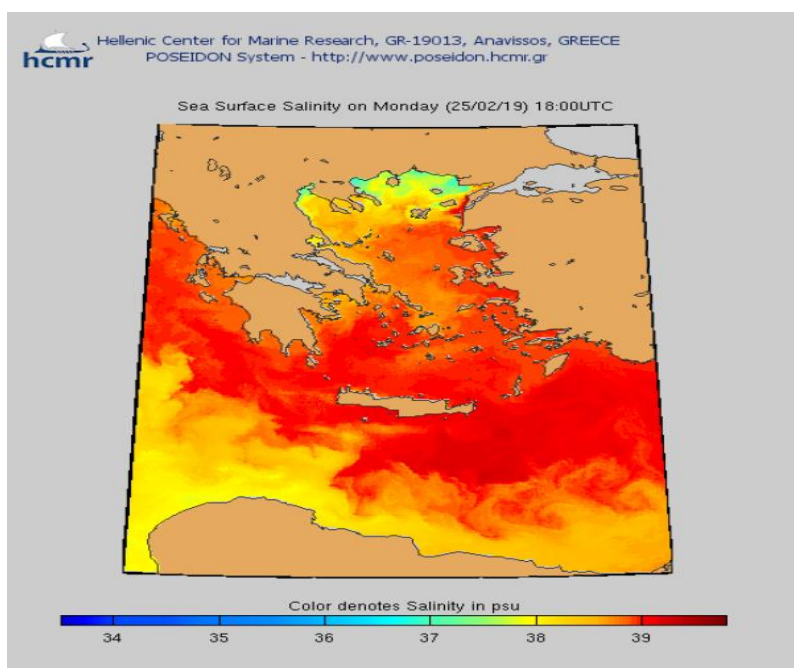
- Η απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή πόσιμου νερού από την πειραματική μονάδα αφαλάτωσης του εργαστηρίου, αυξάνεται ακολουθώντας την αύξηση της

αλατότητας του προς επεξεργασία διαλύματος. Αυτό οφείλεται στην ταυτόχρονη αύξηση της οσμωτικής πίεσης του διαλύματος την οποία η αντλία οφείλει να καλύψει για την αντιστροφή της όσμωσης και την επιτυχής λειτουργία των μεμβρανών. Έτσι, σε υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα διαλύματα, απαιτείται μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή συγκεκριμένης ποσότητας πόσιμου νερού.

- Σε κάθε πειραματικό σενάριο μελέτης, η ανηγμένη τιμή κατανάλωσης μειώνεται με την αύξηση της πίεσης λειτουργίας. Με την αύξηση της πίεσης λειτουργίας και με την προϋπόθεση παροχής μεγαλύτερης πίεσης από την οσμωτική του διαλύματος, η διαφορά πίεσης λειτουργίας-οσμωτική πίεση αυξάνει. Αυτό επιτρέπει την παραγωγή μεγαλύτερης ποσότητας επεξεργασμένου νερού, αφού η διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης επιταχύνεται.

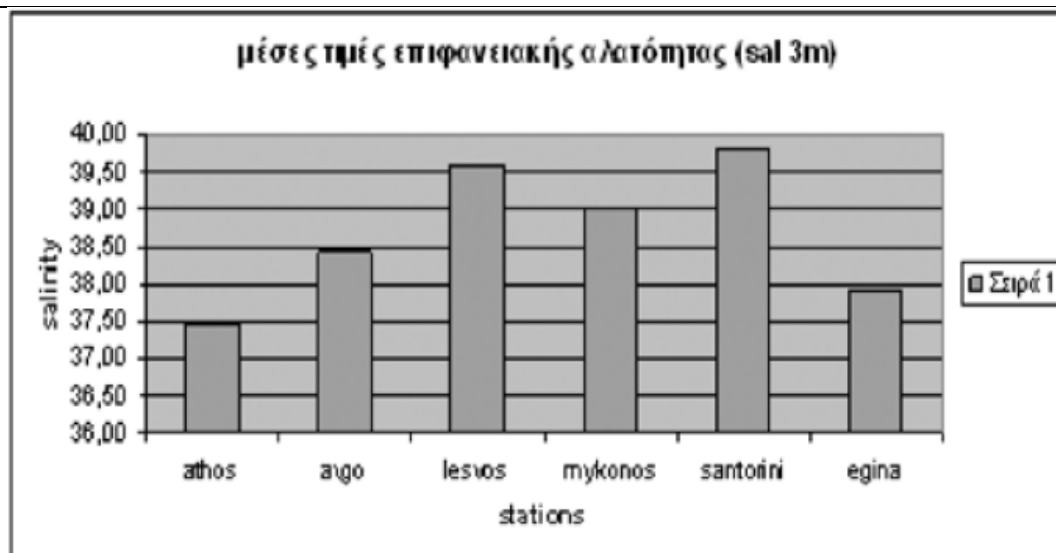
### 9.3 Πεδία εφαρμογής

Η αφαλάτωση αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο παραγωγής αξιοποιήσιμου νερού στο σήμερα. Ιδιαίτερα στην Ελλάδα και στις περιπτώσεις των άνυδρων νησιών της, αποκτά την εικόνα μοναδικής λύσης για την κάλυψη των αναγκών τους σε υδροδότηση. Με την εύκολη πρόσβαση σε θαλασσινό νερό, την πληθώρα επιλογής παράκτιων περιοχών εγκατάστασης μονάδων και την συνεχή τεχνολογική βελτιστοποίηση αυτών, η μελέτη για τη μελλοντική αξιοποίηση της τεχνολογίας της αντίστροφης όσμωσης κρίνεται άκρως θεμιτή, καθώς μπορεί να αποτελέσει ουσιαστική λύση σε πολλές περιοχές αντιμετώπισης με προβλήματα λειψυδρίας, καλύπτοντας σημαντικό εύρος παραμέτρων λειτουργίας και με σημαντικό βαθμό απόδοσης. Το θαλάσσιο νερό της Ελλάδας έχει μια μέση αλατότητα των 39 psu (58.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), καθιστώντας το μέσα στο εύρος αποδοτικής λειτουργίας μιας μονάδας αντίστροφης όσμωσης, όπως προέκυψε από την μελέτη του συγκεκριμένου μοντέλου (Εικόνα 9.1, Εικόνα 9.2).



Εικόνα 9.1 Κατανομή της μέσης επιφανειακής αλατότητας στην Ελλάδα (Πηγή : *poseidon.hcmr*)





Εικόνα 9.2 Μέσες τιμές επιφανειακής αλατότητας ανά νησί (Πηγή : διαδίκτυο)

Ταυτόχρονα, η παρουσία πολλών υφάλμυρων υδάτων και η εύκολη πρόσβαση σε αυτά, θα μπορούσε να αποτελέσει πεδίο ακόμα αποδοτικότερης εφαρμογής της μονάδας, η οποία δύναται να παράξει πόσιμο νερό με μικρότερα λειτουργικά κόστη και επομένως και μικρότερη τιμή μονάδας προϊόντος, για διαλύματα μέσης αλατότητας (Εικόνα 9.3).

Σε κάθε περίπτωση, απαιτείται ολοκληρωμένη μελέτη για τον σωστό καθορισμό των ανά τόπο παραμέτρων λειτουργίας της διάταξης, η αφαλάτωση όμως στον ελλαδικό χώρο, στα νησιά και τις παράκτιες περιοχές συνολικά αυτού, αναμένεται να βρει ευρύ πεδίο εφαρμογής, τόσο σε μικρής ή μεσαίας δυναμικής περιπτώσεις, αλλά και σε μεγάλες ολοκληρωμένες εγκαταστάσεις. Επίσης, η ταυτόχρονη παρουσία υψηλού αιολικού και ηλιακού δυναμικού στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, καθιστά την λειτουργία υβριδικών σταθμών εξαιρετικά αποδοτική λύση για μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας των μονάδων, δίνοντάς τους την δυνατότητα παραγωγής πόσιμου νερού μικρότερου κόστους και κάνοντας χρήση “πράσινης” ενέργειας.

	uS/cm
DISTILLED WATER	0.5 - 3
MELTED SNOW	2 - 42
TAP WATER	50 - 800
POTABLE WATER IN THE US	30 - 1500
FRESHWATER STREAMS	100 - 2000
INDUSTRIAL WASTEWATER	10000
SEAWATER	55000

Εικόνα 9.3 Μέση τιμή αγωγιμότητας ανά ποιοτική κατηγορία νερού (Πηγή : διαδίκτυο)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

a/a	t (s)	P <sub>f</sub> (bar)	P <sub>hp</sub> (bar)	Q <sub>des</sub> (l/h)	Q <sub>brine</sub> (l/h)	I <sub>hp</sub> (A)	I <sub>bat</sub> (A)	V <sub>bat</sub> (V)	N <sub>load</sub> (W)
1	60	20	24	140	900	7.3	90	24.8	2100
2	60	25	28	170	875	7.8	96	24.7	2300
3	60	30	34	200	840	8.6	105	24.6	2500
4	60	35	39	240	800	9.3	112	24.4	2650
5	60	40	43	260	750	9.9	120	24.4	2650
6	60	45	49	300	710	10.6	127	24.3	2800
7	60	50	53	330	675	11.4	139	24.2	3000
8	60	55	58	360	650	12	147	24.2	3120

Πίνακας 1 Πειραματικές μετρήσεις για υδατικό διάλυμα 327 μS/cm

a/a	t (s)	P <sub>f</sub> (bar)	P <sub>hp</sub> (bar)	Q <sub>des</sub> (l/h)	Q <sub>brine</sub> (l/h)	I <sub>hp</sub> (A)	I <sub>bat</sub> (A)	V <sub>bat</sub> (V)	N <sub>load</sub> (W)
1	60	20	23	60	980	6.3	90	24.8	2064
2	60	25	28	80	950	6.9	96	24.7	2190
3	60	30	33	120	925	7.7	105	24.6	2363
4	60	35	39	140	900	8.3	112	24.4	2539
5	60	40	44	160	860	9.2	120	24.4	2713
6	60	45	48	180	840	9.8	127	24.3	2878
7	60	50	53	205	800	10.5	139	24.2	2992
8	60	55	58	225	760	11.2	147	24.2	3180

Πίνακας 2 Πειραματικές μετρήσεις υδατικού διαλύματος 2.600 μS/cm.

a/a	t (s)	P <sub>f</sub> (bar)	P <sub>hp</sub> (bar)	Q <sub>des</sub> (l/h)	Q <sub>brine</sub> (l/h)	I <sub>hp</sub> (A)	I <sub>bat</sub> (A)	V <sub>bat</sub> (V)	N <sub>load</sub> (W)
1	60	20	24	60	1000	7.5	90	24.8	2100
2	60	25	23	60	1000	8.2	96	24.7	2220
3	60	30	34	60	990	8.6	105	24.6	2360
4	60	35	39	85	950	9.3	112	24.4	2530
5	60	40	44	120	910	9.9	120	24.4	2710
6	60	45	49	140	890	10.5	127	24.3	2840
7	60	50	54	165	850	11.2	139	24.2	2995
8	60	55	59	190	820	11.9	147	24.2	3280

Πίνακας 3. Πειραματικές μετρήσεις υδατικού διαλύματος 40.400 μS/cm.

a/a	t (s)	P <sub>f</sub> (bar)	P <sub>hp</sub> (bar)	Q <sub>des</sub> (l/h)	Q <sub>brine</sub> (l/h)	I <sub>hp</sub> (A)	I <sub>bat</sub> (A)	V <sub>bat</sub> (V)	N <sub>load</sub> (W)
1	60	20	24	0	1060	6.9	90	24.8	2110
2	60	25	29	45	1030	7.6	96	24.7	2165
3	60	30	33	60	1000	8	105	24.6	2280
4	60	35	39	70	990	8.8	112	24.4	2440
5	60	40	44	80	950	9.5	120	24.4	2590
6	60	45	49	90	930	10.2	127	24.3	2760
7	60	50	54	115	890	11	139	24.2	2940
8	60	55	59	140	850	11.8	147	24.2	3120

Πίνακας 4. Πειραματικές μετρήσεις υδατικού διαλύματος 51.000 μS/cm.

a/a	t (s)	P <sub>f</sub> (bar)	P <sub>hp</sub> (bar)	Q <sub>des</sub> (l/h)	Q <sub>brine</sub> (l/h)	I <sub>hp</sub> (A)	I <sub>bat</sub> (A)	V <sub>bat</sub> (V)	N <sub>load</sub> (W)
1	60	20	24	0	1060	7	90	24.8	2120
2	60	25	29	0	1060	7.6	96	24.7	2250
3	60	30	34	0	1060	8.1	105	24.6	2400
4	60	35	39	0	1060	8.9	112	24.4	2510
5	60	40	44	0	990	9.4	120	24.4	2725
6	60	45	49	0	950	10.1	127	24.3	2896
7	60	50	54	80	930	10.9	139	24.2	3010
8	60	55	59	100	900	11.6	147	24.2	3206

Πίνακας 5. Πειραματικές μετρήσεις υδατικού διαλύματος 63.500 μS/cm.

$N_w$ (W)	$N_{hp}$ (W)	$N_{bat}$ (W)	$E_w$ (Wh)	$E_{hp}$ (Wh)	$E_{load}$ (Wh)	$E_{bat}$ (Wh)	$\eta_{hp}$ (%)	$\eta_{hybrid}$ (%)	$\eta_{overall}$ (%)	kWh/m <sup>3</sup>
693.3	1679	2232.0	11.55556	27.98333	35.00000	37.20000	0.41294	0.94086	0.31063	15.00000
812.8	1794	2371.2	13.54630	29.90000	38.33333	39.52000	0.45305	0.96997	0.34277	13.52941
982.2	1978	2583.0	16.37037	32.96667	41.66667	43.05000	0.49657	0.96787	0.38026	12.50000
1126.7	2139	2732.8	18.77778	35.65000	44.16667	45.54667	0.52673	0.96970	0.41228	11.04167
1206.4	2277	2928.0	20.10648	37.95000	44.16667	48.80000	0.52982	0.90505	0.41202	10.19231
1374.7	2438	3086.1	22.91204	40.63333	46.66667	51.43500	0.56387	0.90729	0.44546	9.33333
1479.6	2622	3363.8	24.65972	43.70000	50.00000	56.06333	0.56430	0.89185	0.43985	9.09091
1627.2	2760	3557.4	27.12037	46.00000	52.00000	59.29000	0.58957	0.87705	0.45742	8.66667

Πίνακας 6. Επεξεργασία μετρήσεων υδατικού διαλύματος 237  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

$N_w$ (W)	$N_{hp}$ (W)	$N_{bat}$ (W)	$E_w$ (Wh)	$E_{hp}$ (Wh)	$E_{load}$ (Wh)	$E_{bat}$ (Wh)	$\eta_{hp}$ (%)	$\eta_{hybrid}$ (%)	$\eta_{overall}$ (%)	kWh/m <sup>3</sup>
664.4	1449	2232.0	11.07407	24.15000	34.40000	37.20000	0.45855	0.92473	0.29769	34.40000
801.1	1587	2371.2	13.35185	26.45000	36.50000	39.52000	0.50480	0.92358	0.33785	27.37500
957.9	1771	2583.0	15.96528	29.51667	39.38333	43.05000	0.54089	0.91483	0.37085	19.69167
1126.7	1909	2732.8	18.77778	31.81667	42.31667	45.54667	0.59019	0.92908	0.41228	18.13571
1246.7	2116	2928.0	20.77778	35.26667	45.21667	48.80000	0.58916	0.92657	0.42577	16.95625
1360.0	2254	3086.1	22.66667	37.56667	47.96667	51.43500	0.60337	0.93257	0.44069	15.98889
1479.6	2415	3363.8	24.65972	40.25000	49.86667	56.06333	0.61266	0.88947	0.43985	14.59512
1586.9	2576	3557.4	26.44907	42.93333	53.00000	59.29000	0.61605	0.89391	0.44610	14.13333

Πίνακας 7. Επεξεργασία μετρήσεων υδατικού διαλύματος 2.600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

$N_w$ (W)	$N_{hp}$ (W)	$N_{bat}$ (W)	$E_w$ (Wh)	$E_{hp}$ (Wh)	$E_{load}$ (Wh)	$E_{bat}$ (Wh)	$\eta_{hp}$ (%)	$\eta_{hybrid}$ (%)	$\eta_{overall}$ (%)	kWh/m <sup>3</sup>
706.7	1725	2232.0	11.77778	28.75000	35.00000	37.20000	0.40966	0.94086	0.31661	35.00000
677.2	1886	2371.2	11.28704	31.43333	37.00000	39.52000	0.35908	0.93623	0.28560	37.00000
991.7	1978	2583.0	16.52778	32.96667	39.33333	43.05000	0.50135	0.91367	0.38392	39.33333
1121.3	2139	2732.8	18.68750	35.65000	42.16667	45.54667	0.52419	0.92579	0.41029	29.76471
1258.9	2277	2928.0	20.98148	37.95000	45.16667	48.80000	0.55287	0.92555	0.42995	22.58333
1401.9	2415	3086.1	23.36574	40.25000	47.33333	51.43500	0.58052	0.92026	0.45428	20.28571
1522.5	2576	3363.8	25.37500	42.93333	49.91667	56.06333	0.59103	0.89036	0.45261	18.15152
1655.3	2737	3557.4	27.58796	45.61667	54.66667	59.29000	0.60478	0.92202	0.46531	17.26316

Πίνακας 8. Επεξεργασία μετρήσεων υδατικού διαλύματος 40.400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

$N_w$ (W)	$N_{hp}$ (W)	$N_{bat}$ (W)	$E_w$ (Wh)	$E_{hp}$ (Wh)	$E_{load}$ (Wh)	$E_{bat}$ (Wh)	$\eta_{hp}$ (%)	$\eta_{hybrid}$ (%)	$\eta_{overall}$ (%)	kWh/m <sup>3</sup>
706.7	1587	2232.0	11.77778	26.45000	35.16667	37.20000	0.44528	0.94534	0.31661	#DIV/0!
866.0	1748	2371.2	14.43287	29.13333	36.08333	39.52000	0.49541	0.91304	0.36520	48.11111
971.7	1840	2583.0	16.19444	30.66667	38.00000	43.05000	0.52808	0.88269	0.37618	38.00000
1148.3	2024	2732.8	19.13889	33.73333	40.66667	45.54667	0.56736	0.89286	0.42020	34.85714
1258.9	2185	2928.0	20.98148	36.41667	43.16667	48.80000	0.57615	0.88456	0.42995	32.37500
1388.3	2346	3086.1	23.13889	39.10000	46.00000	51.43500	0.59179	0.89433	0.44987	30.66667
1507.5	2530	3363.8	25.12500	42.16667	49.00000	56.06333	0.59585	0.87401	0.44815	25.56522
1622.5	2714	3557.4	27.04167	45.23333	52.00000	59.29000	0.59783	0.87705	0.45609	22.28571

Πίνακας 9. Επεξεργασία μετρήσεων υδατικού διαλύματος 51.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

$N_w$ (W)	$N_{hp}$ (W)	$N_{bat}$ (W)	$E_w$ (Wh)	$E_{hp}$ (Wh)	$E_{load}$ (Wh)	$E_{bat}$ (Wh)	$\eta_{hp}$ (%)	$\eta_{hybrid}$ (%)	$\eta_{overall}$ (%)	kWh/m <sup>3</sup>
-----------	--------------	---------------	------------	---------------	-----------------	----------------	-----------------	---------------------	----------------------	--------------------

706.7	1610	2232.0	11.77778	26.83333	35.33333	37.20000	0.43892	0.94982	0.31661	
853.9	1748	2371.2	14.23148	29.13333	37.50000	39.52000	0.48849	0.94889	0.36011	
1001.1	1863	2583.0	16.68519	31.05000	40.00000	43.05000	0.53737	0.92915	0.38758	
1148.3	2047	2732.8	19.13889	34.11667	41.83333	45.54667	0.56098	0.91847	0.42020	
1210.0	2162	2928.0	20.16667	36.03333	45.41667	48.80000	0.55967	0.93067	0.41325	
1293.1	2323	3086.1	21.55093	38.71667	48.26667	51.43500	0.55663	0.93840	0.41899	
1515.0	2507	3363.8	25.25000	41.78333	50.16667	56.06333	0.60431	0.89482	0.45038	37.62500
1638.9	2668	3557.4	27.31481	44.46667	53.43333	59.29000	0.61428	0.90122	0.46070	32.06000

Πίνακας 10. Επεξεργασία μετρήσεων υδατικού διαλύματος 63.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. David Paul, Abdul Rahman M. Abanmy, «Reverse Osmosis Membrane Fouling – The Final Frontier», 1990
2. Zafirakis D., Fragos P., Kavadias K., Kaldellis J.K, Determining the energy pay-back period of pv-battery stand alone systems : case study Greece.
3. “Υβριδικα συστήματα ισχύος” Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
4. Hatch, «Reserve Osmosis System», 2009
5. National Research Council, «Desalination: a National Respective», Committee on Advancing Desalination Technology, 2008
6. J.K. Kaldellis, M. Simotas, D. Zafirakis, E. Kondili, Optimum autonomous photovoltaic solutions for the Greek islands on the basis of energy pay-back analysis.
7. Mohamed A. Eltawil, Zhao Zhengming, Liqiang Yuan, «A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems», 2009
8. «Modelling of water–energy systems. The case of desalination», Gregor Meerganz von Medeazza, Vincent Moreau, Energy 32 pp. 1024-1031.
9. «Overview of the cost of desalinated water and costing methodologies», K.V. Reddy, N. Ghaffour, Desalination 205 pp. 340-353.
10. «Small-scale thermal seawater desalination simulation and optimization of system design», Muller-Holst H., Engelhardt M., and Scholkopf W., 1999, Desalination, 122 pp. 255-262.
11. Kalogirou, S.A., Seawater desalination using renewable energy sources. Progress in Energy and Combustion Science, 2005. 31(3): p. 242-281.
12. J.K. Kaldellis, P. Koronakis, K. Kavadias, Energy balance analysis of a stand-alone photovoltaic system, including variable system reliability impact. Renewable energy.
13. Φουντουκίδης Γ. Ευάγγελος, «Αφαλάτωση Νερού με Αντίστροφη Ώσμωση», 2012
14. E.A Alsema, P. Frankl, K. Kato, Energy pay-back time of photovoltaic energy systems present status and prospects
15. S. Krauter, R. Rütther, Considerations for the calculation of greenhouse gas reduction by photovoltaic solar energy, Renewable energy.
16. Tzen, E. and R. Morris, Renewable energy sources for desalination. Solar energy, 2003. 75: p. 375-379.
17. Almulla A., Eid M., Cote P., Coburn J., «Developments in high recovery brackish water desalination plants as part of the solution to water quantity problems», 2002

18. Electricity Storage Association. Technologies and applications. Technology Comparisons. California, <http://electricitystorage.org/tech/;2003>.
19. Bartels C., Rybar S., Franks R., «Integrated membrane desalination systems – potential benefits of combined technology», 2006
20. «Vacuum desalination for water purification using waste heat», Tay J.H., Low S.C. and Jeyaseelan S., 1996, Desalination, 106, pp. 131-135.
21. Masahiro Murakami, «Managing Water for Peace in the Middle East: Alternative Strategies», 1995
22. «The analysis and performance of large-scale stand-alone solar desalination plants» Tsilingiris, P.T., Desalination 103, pp. 249-255.