



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ – ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ
ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ ΥΠΟ
ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΝΕΡΟΥ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Σ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Επιβλέπων: Γεώργιος Παπαδάκης, Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ 2012

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ ΥΠΟ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΝΕΡΟΥ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ

ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Σ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Γεώργιος Παπαδάκης, Καθηγητής, Επιβλέπων

Νικόλαος Συγριμής, Καθηγητής

Κωνσταντίνος Αρβανίτης, Αναπληρωτής Καθηγητής



ΑΘΗΝΑ 2012

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διατριβής μου, θέλω να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με βοήθησαν κατά την διάρκεια της εκπόνησης της.

Το θέμα της διατριβής επιλέχτηκε από τον Καθηγητή του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών κ. Παπαδάκη Γεώργιο, επιβλέποντα της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, τον οποίο θέλω να ευχαριστήσω τόσο για την ευκαιρία που μου έδωσε να μελετήσω το συγκεκριμένο θέμα όσο και για τις συμβουλές που μου παρείχε κατά την συγγραφή της διατριβής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμότατα τον Δρ. Mohamed Essam, για την χορήγηση όλων των στοιχείων της Διδακτορικής του διατριβής, όπου περιγράφεται η σχεδίαση και κατασκευή της πρότυπης μονάδας αφαλάτωσης. Τα στοιχεία αυτά ήταν απαραίτητα για την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, την οργάνωση των μετρήσεων και την αξιολόγηση του συστήματος. Τον ευχαριστώ ακόμη, για την συνεχή καθοδήγηση και πολύτιμη βοήθεια του κατά την διεξαγωγή του πειράματος καθώς και για τη διάθεση του πολύτιμου χρόνου του κατά την συγγραφή της διατριβής. Η συνεργασία μου μαζί του υπήρξε πρωταρχικής σημασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υποψήφιο Δρ. Κυριακαράκο Γεώργιο, για την σημαντική βοήθεια που μου παρείχε και για την διάθεση πολύτιμου χρόνου και κόπου, σε κάθε στιγμή εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου διατριβής.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κκ Νικόλαο Συγριμή, Καθηγητή και Αρβανίτη Κωνσταντίνο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, για την συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή εξέτασης και για τις πολύτιμες γνώσεις που μου παρείχαν ως καθηγητές μου σε προπτυχιακό και μεταπτυχιακό επίπεδο.

Θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω τον Δρ. Μπαλαφούτη Αθανάσιο καθώς και όλους τους εργαζόμενους του Εργαστηρίου Γεωργικής Μηχανολογίας που με βοήθησαν κατά την παραμονή μου σε αυτό.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους φίλους και συναδέλφους μου, Μιχαλοπούλου Αικατερίνη και Αντωνοπούλου Γεωργία, για την συμβολή και βοήθεια τους κατά την πραγματοποίηση του πειράματος.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	V
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	VII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	XI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ	XIII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	XV
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	XIX
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	XXI
ABSTRACT	XXIII
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Έλλειψη νερού.....	1
1.1.1 Τα αίτια της έλλειψης νερού	2
1.1.2 Η χρήση του νερού	2
1.2 Το πρόβλημα του νερού στην Ελλάδα	4
1.2.1 Γενικά	4
1.2.2 Μέθοδοι αντιμετώπισης της λειψυδρίας.....	4
2. ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ	7
2.1 Γενικά	7
2.1.1 Η έννοια της αφαλάτωσης	7
2.1.2 Ιστορική αναδρομή.....	8
2.2 Τεχνολογίες αφαλάτωσης	9
2.2.1 Οι θερμικές μέθοδοι	9
2.2.1.1 Πολυβάθμια εκτόνωση (Multi-Stage Flushing, MSF)	9
2.2.1.2 Εξάτμιση με πολλαπλές βαθμίδες (Multiple Effect Evaporation ή ME).....	10
2.2.1.3 Εξάτμιση με επανασυμπύεση ατμών (Vapor Compression – VC).....	11
2.2.1.4 Αφαλάτωση με ψύξη (freezing process)	12
2.2.1.5 Ηλιακή απόσταξη (Solar Distillation).....	12
2.2.2 Οι μέθοδοι με μεμβράνες.....	13
2.2.2.1 Ηλεκτροδιάλυση (Electro Dialysis ή E.D.).....	13
2.2.2.2 Αντίστροφη ώσμωση.....	14
2.3 Σύγκριση τεχνολογιών αφαλάτωσης	17
2.4 Πλεονεκτήματα της αντίστροφης ώσμωσης.....	20
3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΠΕ	23
3.1 Εισαγωγή.....	23
3.2 Συμβατικές πηγές ενέργειας.....	23
3.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αφαλάτωση.....	24
3.3.1 Ανάγκη για χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	24

3.3.2	<i>Τρόπος σύνδεσης αφαλάτωσης με την πηγή ενέργειας</i>	25
3.3.3	<i>Συνδυασμοί τεχνολογιών αφαλάτωσης και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας</i>	26
3.3.3.1	<i>Μονάδες αφαλάτωσης με φωτοβολταϊκά</i>	27
3.3.3.2	<i>Μονάδες αφαλάτωσης με ανεμογεννήτριες</i>	28
3.3.3.3	<i>Συστήματα αφαλάτωσης με θερμική ηλιακή ενέργεια</i>	29
3.3.3.4	<i>Υβριδικά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για αφαλάτωση</i>	29
4.	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	31
4.1	<i>Ενεργειακές απαιτήσεις κατά την αφαλάτωση νερού</i>	31
4.2	<i>Εξοικονόμηση ενέργειας στα συστήματα ΑΩ (αναμήκτες ενέργειας)</i>	32
4.2.1	<i>Συμβατικά συστήματα ανάκτησης ενέργειας</i>	32
4.2.2	<i>Νέες τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας</i>	33
4.2.2.1	<i>Εναλλάκτης πίεσης (Pressure Exchanger PX)</i>	34
4.2.2.2	<i>Αντλίες APP</i>	35
4.2.2.3	<i>Clark Pump</i>	35
4.3	<i>Αποθήκευση ενέργειας</i>	36
5.	ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ	39
5.1	<i>Η έννοια του μικροδικτύου</i>	39
5.2	<i>Τεχνικές και ρυθμιστικές προδιαγραφές μικροδικτύου</i>	40
5.3	<i>Μικροδίκτυο και αφαλάτωση</i>	41
5.3.1	<i>Εφαρμογή μικροδικτύου για τροφοδοσία μονάδας αφαλάτωσης ΑΩ</i>	41
6.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ	45
6.1	<i>Εισαγωγή</i>	45
6.2	<i>Περιγραφή συμβατικών συστημάτων ΑΩ</i>	45
6.2.1	<i>Σύστημα προ-επεξεργασίας</i>	46
6.2.2	<i>Το κυρίως σύστημα αφαλάτωσης ΑΩ</i>	48
6.2.3	<i>Σύστημα μετ-επεξεργασίας</i>	49
6.3	<i>Παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία των μεμβρανών</i>	49
6.3.1	<i>Επίδραση της πίεσης</i>	50
6.3.2	<i>Επίδραση της θερμοκρασίας</i>	51
6.3.3	<i>Επίδραση της συγκέντρωσης των αλάτων του νερού τροφοδοσίας</i>	52
6.3.4	<i>Επίδραση του βαθμού ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού</i>	53
6.3.5	<i>Επίδραση pH</i>	54
6.4	<i>Θεωρητική περιγραφή του ανακτητή υδραυλικής ενέργειας</i>	54
7.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ - ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	57
7.1	<i>Εισαγωγή</i>	57
7.2	<i>Σκοπός πειραματικής διερεύνησης</i>	57
7.3	<i>Περιγραφή της μονάδας Αντίστροφης ώσμωσης</i>	58
7.3.1	<i>Δεξαμενή Τροφοδοσίας</i>	58
7.3.2	<i>Αντλία Τροφοδοσίας</i>	59

7.3.3	Σύστημα προ – επεξεργασίας του νερού τροφοδοσίας	60
7.3.4	Ανακτητής υδραυλικής ενέργειας (Clark Pump).....	61
7.3.5	Μεμβράνη και μεμβρανοθήκη.....	61
7.3.6	Δοχείο έκπλυσης.....	62
7.3.7	Αντλία έκπλυσης	63
7.3.8	Πίνακας ελέγχου	64
7.3.9	Πίνακας ισχύος	65
7.3.10	Ρυθμιστής στροφών	65
7.3.11	Αισθητήρια της μονάδας αφαλάτωσης.....	66
7.3.12	Καταγραφικό δεδομένων (Data Logger).....	71
7.4	Λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης	72
7.5	Θεωρητική διερεύνηση - μεθοδολογία.....	75
7.5.1	Ισοζύγιο μάζας.....	75
7.5.2	Ανάκτηση αφαλατωμένου νερού.....	76
7.5.3	Η ωσμωτική πίεση.....	76
7.5.4	Ο μηχανικός βαθμός απόδοση της αντλίας Clark	76
7.5.5	Ειδική κατανάλωση ενέργειας	77
7.5.6	Η φαινόμενη ισχύς	77
7.5.7	Στροφές του κινητήρα τροφοδοσίας	78
8.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	79
8.1	Συμπεριφορά της μονάδας ΑΩ σε συνθήκες μεταβλητής συχνότητας του κινητήρα της αντλίας τροφοδοσίας.....	79
8.1.1	Οι πιέσεις της μονάδας αφαλάτωσης.....	79
8.1.2	Η παροχή αφαλατωμένου νερού	80
8.1.3	Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού.....	82
8.1.4	Ο Μηχανικός βαθμός απόδοσης της αντλίας Clark και η ειδική κατανάλωση ενέργειας.....	83
8.1.5	Το ποσοστό ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού	84
8.1.6	Η φαινόμενη ισχύς και η ειδική κατανάλωση ενέργειας	85
8.1.7	Στροφές του κινητήρα τροφοδοσίας	87
8.2	Συμπεριφορά της μονάδας ΑΩ σε συνθήκες μεταβλητής συχνότητας του κινητήρα της αντλίας, υπό διαφορετικές θερμοκρασίες νερού τροφοδοσίας.....	88
8.2.1	Η πίεση στην είσοδο των μεμβρανών	89
8.2.2	Η πίεση της αντλίας τροφοδοσίας.....	90
8.2.3	Η παροχή του αφαλατωμένου νερού	90
8.2.4	Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού.....	91
8.2.5	Η ειδική κατανάλωση ενέργειας	92
8.3	Συμπεράσματα	94
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	95

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

C_b (ppm):	Συγκέντρωση αλάτων της άλμης
C_f (ppm):	Συγκέντρωση αλάτων του νερού τροφοδοσίας
$C_{osφ}$:	Συντελεστής ισχύος του κινητήρα
C_p (ppm):	Συγκέντρωση αλάτων του αφαλατωμένου νερού
C_s (ppm):	Μέση συγκέντρωση των αλάτων στα δύο διαλύματα από τις δύο πλευρές της μεμβράνης
E_m (kWh):	Καταναλισκόμενη ενέργεια από τον κινητήρα
f (Hz):	Η συχνότητα λειτουργίας του κινητήρα
n_s (rpm):	Ο σύγχρονος αριθμός στροφών του κινητήρα
p :	Ο αριθμός των πόλων του κινητήρα
P (kW):	Η ενεργός ισχύς που καταναλώνει ο κινητήρας
P_b (bar):	Η πίεση της άλμης στην είσοδο της αντλίας Clark
P_f (bar):	Η πίεση του νερού τροφοδοσίας της μεμβράνης
P_h (bar):	Η πίεση του νερού εξόδου από την αντλία Clark υψηλής πίεσης
P_L (bar):	Η πίεση της απορριπτόμενης άλμης χαμηλής πίεσης
P_p (bar):	Η πίεση του αφαλατωμένου νερού
Q (L/h):	Πραγματική παροχή της αντλίας
Q_b (L/h):	Παροχή της άλμης
Q_f (L/h):	Παροχή νερού τροφοδοσίας της μεμβράνης
Q_h (L/h):	Παροχή νερού εξόδου από την αντλία Clark υψηλής πίεσης
Q_L (L/h):	Παροχή νερού τροφοδοσίας χαμηλής πίεσης στην αντλία Clark
Q_p (L/h):	Παροχή αφαλατωμένου νερού
R (%):	Ποσοστό ανάκτησης αφαλατωμένου νερού
R_c :	Συντελεστής συγκράτησης
S (kVA):	Η φαινόμενη ισχύς που καταναλώνει ο κινητήρας
S_{EC} (kWh/m ³):	Ειδική κατανάλωση ενέργειας
T (°C):	Θερμοκρασία
η :	Βαθμός απόδοσης
η_m :	Μηχανική απόδοση της αντλίας
Π (psi):	Ωσμωτική πίεση

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

CA:	Οξική Κυτταρίνη
ED:	Ηλεκτροδιάλυση (Electro Dialysis)
ME:	Εξάτμιση με πολλαπλές βαθμίδες (Multiple Effect Evaporation)
MSF:	Πολυβάθμια εκτόνωση (Multi – Stage Flash)
MVC:	Μηχανική συμπίεση ατμών (Mechanical Vapor Compression)
PA:	Πολυαμίδες
PI:	Πολύ-ιμίδες
PVDF:	Φθοριούχο πολυβινυλιδένιο
PVI:	Πολυβινυλιμυδαζολίνη
PX:	Εναλλάκτης πίεσης (Pressure Exchanger)
RPM:	Revelations per minuet
TDS:	Ολικά διαλυμένα άλατα (Total Dissolved Solid)
TVC:	Θερμική συμπίεση ατμών (Thermal Vapor Compression)
VC:	Εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών (Vapor Compression)
ΑΓ:	Ανεμογεννήτρια
ΑΠΕ:	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΑΩ:	Αντίστροφη Ώσμωση
ΕΡ:	Εναλλασσόμενο ρεύμα
ΣΡ:	Συνεχές ρεύμα
Φ/Β:	Φωτοβολταϊκά

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1:	Κατασκευή φραγμάτων. (Πηγή: Τζανάκη, 2010).....	5
Εικόνα 2.1:	Σχηματικό διάγραμμα των εισόδων και των παραμέτρων ενός συστήματος αφαλάτωσης. Εισόδους αποτελούν η ενέργεια (απο ανανεώσιμες πηγές ή μη) και το αλμυρό νερό και εξόδους το φρέσκο νερό, η άλμη (brine) και τα αέρια του θερμοκηπίου (GHG). (Πηγή: Παλιεράκης, 2007).....	7
Εικόνα 2.2:	Σχηματική παράσταση πολυβάθμιας εκτόνωσης. (Πηγή: Δεληγιάννη και Μπελεσιώτης, 1995).....	10
Εικόνα 2.3:	Εξάτμιση με πολλαπλές βαθμίδες. (Πηγή: Μανωλάκος, 2006)	11
Εικόνα 2.4:	Θερμική συμπίεση ατμών. (Πηγή: Μανωλάκος, 2006).....	12
Εικόνα 2.5:	Μηχανική συμπίεση ατμών. (Πηγή: Μανωλάκος, 2006)	12
Εικόνα 2.6:	Ηλιακός αποστακτήρας τύπου θερμοκηπίου. Όπου T είναι το διαφανές κάλυμμα, Λ η λεκάνη που περιέχει το νερό και Σ τα κανάλια συλλογής του αποστάγματος. (Πηγή: Δεληγιάννη και Μπελεσιώτης, 1995).....	13
Εικόνα 2.7:	Κίνηση των ιόντων κατά τη μέθοδο της ηλεκτροδιάλυσης. (Πηγή: Τζανάκη, 2010).....	14
Εικόνα 2.8:	Σχηματική παράσταση της ωσμωτικής πίεσης A, στο σημείο ισορροπίας B και της αντίστροφης ώσμωσης Γ. (Πηγή Δεληγιάννη και Μπελεσιώτης, 1995)....	15
Εικόνα 2.9:	Δομή μιας μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης σπειροειδούς περιέλιξης. (Πηγή: Τζανάκη, 2010)	17
Εικόνα 2.10:	Εγκαταστάσεις αφαλάτωσης κατά τεχνολογία και η παραγωγή τους σε m ³ /d. (Πηγή: Τζανάκη, 2010).....	19
Εικόνα 3.1:	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για αφαλάτωση. (Πηγή: Mathioulakis, et al., 2007).....	25
Εικόνα 3.2:	Τεχνολογίες αφαλάτωσης που συνδυάζονται με ΑΠΕ. (Πηγή: Mathioulakis, et al., 2007).....	26
Εικόνα 4.1:	Συμβατικό σύστημα ανάκτησης ενέργειας. (Πηγή: Mohamed, 2009)	32
Εικόνα 4.2:	Σύστημα υψηλής πίεσης με ανάκτηση ενέργειας της Grundfos. (Πηγή: Mohamed, 2009).....	33
Εικόνα 4.3:	Συσκευή ανάκτησης ενέργειας PX σε μονάδα αντίστροφης ώσμωσης. (Πηγή: Water reverse osmosis energy recovery systems, 2012)	34
Εικόνα 4.4:	Αντλίες APP της Danfoss. (Πηγή: Danfoss, 2012).....	35
Εικόνα 4.5:	Η αντλία Clark. (Πηγή: Spectra water makers, 2012)	35
Εικόνα 4.6:	Λειτουργία αντλίας Clark. (Πηγή: EcoHydro solutions, 2012).....	36
Εικόνα 4.7:	Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με συσσωρευτές. (Πηγή: Παπαδάκης, 2009)	37
Εικόνα 5.1:	Σχηματική παρουσίαση του πολυπαραγωγικού συστήματος.....	42
Εικόνα 6.1:	Διάγραμμα συμβατικής μονάδας αφαλάτωσης ΑΩ. (Πηγή: Αυλωνίτης, 2006).....	46

Εικόνα 6.2:	Επίδραση της ασκούμενης πίεσης της μεμβράνης στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη των αλάτων. (Πηγή: DOW, 2012).....	50
Εικόνα 6.3:	Επίδραση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη των αλάτων. (Πηγή: DOW, 2012) .	51
Εικόνα 6.4:	Επίδραση της συγκέντρωσης των αλάτων στο νερό τροφοδοσίας στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη των αλάτων. (Πηγή: DOW, 2012)	52
Εικόνα 6.5:	Επίδραση του βαθμού ανάκτησης στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη των αλάτων. (Πηγή: DOW, 2012).....	53
Εικόνα 6.6:	Επίδραση του PH στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη των αλάτων. (Πηγή: DOW, 2012)	54
Εικόνα 6.7:	Λειτουργία της αντλίας Clark. (Πηγή: Thomson, 2003).....	55
Εικόνα 7.1:	Η δεξαμενή τροφοδοσίας.....	58
Εικόνα 7.2:	Η αντλία τροφοδοσίας Fluid – o – tech PO700.....	59
Εικόνα 7.3:	Φίλτρα προ-επεξεργασίας του νερού	60
Εικόνα 7.4:	Ο ανακτητής υδραυλικής ενέργειας (Clark rump)	61
Εικόνα 7.5:	Η μεμβράνη (σπειροειδούς περιέλιξης).....	62
Εικόνα 7.6:	Η μεμβρανοθήκη Code Line	62
Εικόνα 7.7:	Το δοχείο έκπλυσης.....	63
Εικόνα 7.8:	Η αντλία έκπλυσης ECOJET 120.....	63
Εικόνα 7.9:	Ο πίνακας ελέγχου	64
Εικόνα 7.10:	Ο πίνακας ισχύος	65
Εικόνα 7.11:	Ο ρυθμιστής στροφών HYUNDAI N50.....	66
Εικόνα 7.12:	Μεταδότης πίεσης.....	67
Εικόνα 7.13:	Μεταδότες ροής Α) αφαλατωμένου νερού Β) άλμης.....	68
Εικόνα 7.14:	Μεταδότες ηλεκτρικής αγωγιμότητας Α) αφαλατωμένου νερού Β) άλμης	69
Εικόνα 7.15:	Μεταδότες ισχύος	70
Εικόνα 7.16:	Το καταγραφικό δεδομένων CR10X της Campbell SCIENTIFIC	71
Εικόνα 7.17:	Το καταγραφικό δεδομένων ADC - 24 της Pico - Technology	71
Εικόνα 7.18:	Η μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης.....	73
Εικόνα 7.19:	Σχηματικό διάγραμμα την μονάδας αφαλάτωσης.....	74
Εικόνα 7.20:	Σχηματικό διάγραμμα της μεμβράνης ΑΩ. (Πηγή: Mohamed, 2009)	75
Εικόνα 7.21:	Σχηματικό διάγραμμα της αντλίας Clark. (Πηγή: Mohamed, 2009).....	76
Εικόνα 8.1:	Επίδραση της συχνότητας του κινητήρα στις πιέσεις της μονάδας ΑΩ.....	80
Εικόνα 8.2:	Επίδραση της μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην παροχή του αφαλατωμένου νερού	81
Εικόνα 8.3:	Μεταβολή της πίεσης στην είσοδο των μεμβρανών σε σχέση με την παροχή του αφαλατωμένου νερού	81
Εικόνα 8.4:	Επίδραση της μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην ηλεκτρική αγωγιμότητα αφαλατωμένου νερού	82

Εικόνα 8.5:	Μεταβολή της πίεσης στην είσοδο των μεμβρανών σε σχέση με την ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού.....	83
Εικόνα 8.6:	Επίδραση μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στον μηχανικό βαθμό απόδοσης αντλίας Clark και στην ειδική κατανάλωση ενέργειας.....	84
Εικόνα 8.7:	Επίδραση της μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στο ποσοστό ανάκτησης αφαλατωμένου νερού.....	85
Εικόνα 8.8:	Επίδραση της μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην κατανάλωση φαινόμενης ισχύος του κινητήρα τροφοδοσίας	85
Εικόνα 8.9:	Επίδραση της μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην ειδική κατανάλωση ενέργειας φαινόμενης ισχύος.....	86
Εικόνα 8.10:	Επίδραση της συχνότητας στις στροφές του κινητήρα τροφοδοσίας	87
Εικόνα 8.11:	Υδατόλουτρο για την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας.....	88
Εικόνα 8.12:	Επίδραση μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην πίεση εισόδου των μεμβρανών της μονάδας $A\Omega$ υπό διαφορετικές θερμοκρασίες νερού τροφοδοσίας	89
Εικόνα 8.13:	Επίδραση μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην πίεση της αντλίας τροφοδοσίας της μονάδας $A\Omega$ υπό διαφορετικές θερμοκρασίες νερού τροφοδοσίας	90
Εικόνα 8.14:	Επίδραση μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην παροχή του αφαλατωμένου νερού υπό διαφορετικές θερμοκρασίες νερού τροφοδοσίας..	91
Εικόνα 8.15:	Επίδραση μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού υπό διαφορετικές θερμοκρασίες νερού τροφοδοσίας	92
Εικόνα 8.16:	Επίδραση μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην ειδική κατανάλωση ενέργειας με βάση την ενεργό και την φαινόμενη ισχύ που καταναλώνει ο κινητήρας υπό διαφορετικές θερμοκρασίες νερού τροφοδοσίας	93

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1:	Μέθοδος αφαλάτωσης ανά χώρα και η παραγωγή νερού σε 103m ³ /d (Πηγή: Τζανάκη, 2010)	18
Πίνακας 2.2:	Χαρακτηριστικά στοιχεία των κυριότερων μεθόδων αφαλάτωσης (Πηγή: Loupasis, 2002)	20
Πίνακας 4.1:	Κατανάλωση ενέργειας των κυριότερων μεθόδων αφαλάτωσης (Πηγή: Loupasis, 2002)	31
Πίνακας 7.1:	Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα και της αντλίας τροφοδοσίας	59
Πίνακας 7.2:	Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ανακτητή ενέργειας	61
Πίνακας 7.3:	Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μεμβράνης και της μεμβρανοθήκης	62
Πίνακας 7.4:	Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα και της αντλίας έπκλυσης	64
Πίνακας 7.5:	Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ρυθμιστή στροφών.	66
Πίνακας 7.6:	Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη της πίεσης στην κατάθλιψη της αντλίας τροφοδοσίας	67
Πίνακας 7.7:	Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη υψηλής πίεσης	67
Πίνακας 7.8:	Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη παροχής αφαλατωμένου νερού	68
Πίνακας 7.9:	Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη παροχής της άλμης	68
Πίνακας 7.10:	Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη ηλεκτρικής αγωγιμότητας του αφαλατωμένου νερού	69
Πίνακας 7.11:	Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη ηλεκτρικής αγωγιμότητας της άλμης ..	69
Πίνακας 7.12:	Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη ενεργού ισχύος του κινητήρα τροφοδοσίας	70
Πίνακας 7.13:	Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη συντελεστού ισχύος του κινητήρα τροφοδοσίας	70

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα συστήματα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση αποτελούν μια πετυχημένη προσέγγιση στη λύση του προβλήματος πόσιμοι νερού κυρίως σε νησιωτικές, αλλά και σε παραθαλάσσιες περιοχές. Τα συστήματα αυτά πολλές φορές διασυνδέονται με συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες παράγουν την ενέργεια που καταναλώνεται από τη μονάδα αφαλάτωσης. Οι μονάδες που βρίσκονται στην αιχμή της τεχνολογίας συνδυάζονται, πολλές φορές, και με συστήματα ανάκτησης της ενέργειας, που μπορούν να μειώσουν δραστικά την καταναλισκόμενη ενέργεια από τη μονάδα.

Στην βιβλιογραφία, επίσης, υπάρχουν αναφορές ότι η λειτουργία μιας μονάδος αφαλάτωσης σε μερικό φορτίο μπορεί να παρουσιάσει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης σε σχέση με τη λειτουργία της στην ονομαστική ισχύ.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε πειραματική αξιολόγηση της μονάδος αφαλάτωσης που υπάρχει εγκατεστημένη στο εργαστήριο γεωργικής μηχανολογίας σε λειτουργία μερικού φορτίου.

Η πειραματική λειτουργία της μονάδος σε μερικό φορτίο επιτυγχάνεται μέσω μεταβαλλόμενων παραμέτρων (στροφών) του συγκροτήματος αντλίας – κινητήρα που είναι ενσωματωμένο στην μονάδα.

Για τον σκοπό αυτό έγινε αντικατάσταση του υπάρχοντος ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος της μονάδας, με αντίστοιχο εναλλασσομένου ρεύματος. Ο νέος κινητήρας είναι εφοδιασμένος με μετατροπέα συχνότητας, για τον έλεγχο των στροφών του.

Στα πλαίσια της πειραματικής αξιολόγησης έγινε σχεδιασμός και υλοποιήθηκε σύστημα καταγραφής δεδομένων (παροχή αφαλατωμένου νερού, καταναλισκόμενη ενέργεια, αλατότητα παραγόμενου νερού κλπ). Εν συνεχεία έγιναν επί μέρους μετρήσεις και χαράχτηκαν οι ανάλογες καμπύλες.

Κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων προέκυψαν ενδιαφέροντα συμπεράσματα ως προς τις συνθήκες λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης σε μερικό φορτίο και ειδικότερα, την ποιότητα του παραγομένου νερού, την καταναλισκόμενη ενέργεια και την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης.

Εν γένει καταδεικνύεται ότι, σε μία απομακρυσμένη περιοχή, που οι ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας και πόσιμοι νερού καλύπτονται από ένα μικροδίκτυο, η μονάδα ΑΩ, με κατάλληλο σχεδιασμό και διαχείριση, θα μπορούσε να λειτουργήσει σε μερικό φορτίο τις ώρες αιχμής της ηλεκτρικής ενέργειας και σε πλήρες φορτίο τις υπόλοιπες ώρες, κατά τις οποίες η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από την περιοχή είναι περιορισμένη.

Λέξεις Κλειδιά: Αφαλάτωση, Αντίστροφη Ωσμωση, μεταβλητές συνθήκες λειτουργίας.

ABSTRACT

The desalination systems with Reverse Osmosis (RO) constitute a successful approach in covering the need of potable water, not only on islands, but also in coastal regions. These systems are often interlinked with systems of Renewable Energy Sources. Photovoltaic and Wind generators produce the energy consumed by the Desalination Unit. State-of-the-art units are often combined with recuperation-energy systems, which can decrease drastically the energy consumed by the unit.

Furthermore, in the bibliography there are references which assert that the operation of a Desalination Unit in part-load conditions can result in higher efficiency compared to a full-load operation.

In the postgraduate thesis in question, an experimental evaluation of an existing Desalination Unit, installed in the Laboratory of Agricultural Engineering of AUA, is realized in part-load operation.

The experimental operation of the Unit in part-load conditions is achieved via a variation of the rotation speed of the pump–motor complex of the unit. In order for this to be achieved, the existing DC motor of the Unit was replaced with a corresponding AC one. The new motor is provided with a frequency inverter to control its rotation speed.

Moreover, within the framework of this experimental evaluation work, a design and data recording system was created to measure, collect and evaluate the conditions and variable operation parameters of the unit, such as the desalination water supply, the consumed energy, the salinity of the produced water etc.

During the evaluation of the measurements results, interesting conclusions were drawn regarding the operation of a Desalination Unit in part-load conditions and, more specifically, the quality of the produced water, the consumed energy and the achievement of higher operation efficiency.

In general, it is proven that, in remote areas, where the needs of electrical energy and potable water are satisfied by polygeneration microgrids, a RO Desalination Unit could operate periodically under a suitable planning and management program in part-load conditions (during the peak – hours of electric energy) and in full-load (during the rest of the day, when the electric energy demand from the microgrid is limited).

Key words: Desalination, Reverse Osmosis, variable operating conditions.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Έλλειψη νερού

Το νερό είναι πηγή ζωής, ένας πολύτιμος φυσικός πόρος, αναντικατάστατο στοιχείο που αποτελεί προϋπόθεση για την ανθρώπινη ύπαρξη και τη ζωή στον πλανήτη. Ο άνθρωπος στην ιστορική του διαδρομή επέλεξε περιοχές κοντά σε ποτάμια, λίμνες και θάλασσες για να κατοικήσει και να ιδρύσει πόλεις με έντονη εμπορική δραστηριότητα και με οικονομική και πολιτιστική ανάπτυξη.

Ο πλανήτης μας καλύπτεται κατά ένα μεγάλο μέρος από νερό, αλλά μόνο το 3% είναι πόσιμο ή γλυκό, ενώ το υπόλοιπο 97% αποτελεί το νερό των θαλασσών και των ωκεανών, το οποίο σε πρώτη φάση θεωρείται ακατάλληλο προς χρήση από τους ανθρώπους (Δεληγιάννη, Μπελεσιώτης 1995). Τα παγκόσμια αποθέματα νερού συνεχώς μειώνονται και η δυνατότητα εύρεσης νέων πηγών νερού έχει περιοριστεί. Η λειψυδρία έχει ως αποτέλεσμα μεγάλο μέρος του πληθυσμού να μην έχει πρόσβαση σε πόσιμο νερό. Στις μέρες μας περίπου 300.000 εκατομμύρια άνθρωποι σε 25 χώρες στερούνται πόσιμου νερού τους περισσότερους μήνες το χρόνο. Το 20% του πληθυσμού της Γης αναγκάζεται να πίνει νερό από μολυσμένες πηγές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, πάνω από 2.000.000 άνθρωποι κάθε χρόνο να πεθαίνουν από ασθένειες που σχετίζονται με αυτό (έλλειψη – ακαταλληλότητα νερού) (ΤΕΕ, 2005). Ο πληθυσμός του λεγόμενου τρίτου κόσμου πλήττεται περισσότερο και υπολογίζεται ότι περίπου 3.900 παιδιά πεθαίνουν καθημερινά από ασθένειες που οφείλονται στην έλλειψη φρέσκου νερού.

Πολλές περιοχές του πλανήτη θεωρούνται ως άγονες, λόγω των ελάχιστων βροχοπτώσεων και των κλιματικών συνθηκών που επικρατούν εκεί και ταλαιπωρούνται από προβλήματα λειψυδρίας. Μεγαλύτερο πρόβλημα παρουσιάζεται στις παράκτιες περιοχές, καθώς υπολογίζεται ότι υπάρχουν 33.000km άγονων ακτών, κυρίως στην Αφρική, τον Ινδικό Ωκεανό και την Αραβική χερσόνησο (Mohamed, 2009). Μεγάλες εκτάσεις γης απειλούνται με ερημοποίηση, μερικές από τις οποίες βρίσκονται στη Μεσόγειο και περιλαμβάνουν περιοχές της Ελλάδας όπως είναι η Κρήτη, οι Κυκλάδες και τα Δωδεκάνησα.

Παγκοσμίως υπάρχουν περίπου 260 κύρια ποτάμια συστήματα, που τροφοδοτούν με φρέσκο νερό πολλές χώρες, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται διαμάχες για τον έλεγχο των υδάτινων αποθεμάτων. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα των ποταμών Τίγρη και Ευφράτη, που παρέχουν φρέσκο νερό στην Τουρκία, τη Συρία και το Ιράκ. Οι ανάγκες των χωρών αυτών είναι περισσότερες από τα αποθέματα των ποταμών και συχνά αναπτύσσονται μεταξύ τους εντάσεις. Η Τσεχία και η Ουγγαρία διεκδικούν τα νερά του Δούναβη, ενώ ανάλογες διαμάχες έχει η Βόρειος Κορέα με τη Νότιο, το Ισραήλ με την Παλαιστίνη και η Αίγυπτος με την Αιθιοπία (Παλιεράκης, 2007).

Τα τελευταία χρόνια η χρήση του νερού παγκόσμια εξαπλασιάστηκε και το πρόβλημα οξύνθηκε, ενώ μέχρι το 2050 αναμένεται να διπλασιαστεί. Οι ανάγκες του ανθρώπου για νερό, δεν περιορίζονται μόνο στο πόσιμο, αλλά χρειάζεται νερό για οικιακή χρήση, ενώ η τροφή του απαιτεί περίπου 70 φορές περισσότερο νερό από τις οικιακές του ανάγκες.

1.1.1 Τα αίτια της έλλειψης νερού

Σύμφωνα με ορισμένους επιστήμονες, η κυριότερη αιτία για την έλλειψη φρέσκου νερού σε παγκόσμιο επίπεδο είναι το φαινόμενο της παγκόσμιας θέρμανσης ή αλλιώς φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη προκαλεί αύξηση των βροχοπτώσεων και μείωση των χιονοπτώσεων, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ποσότητα νερού που παραμένει στις ορεινές περιοχές με τη μορφή χιονιού ή πάγου, που αποδίδεται κατά τους θερινούς μήνες και τις περιόδους ξηρασίας. Συγχρόνως η αύξηση των βροχοπτώσεων προκαλεί αύξηση της απορροής του νερού με αποτέλεσμα να προκαλούνται πλημμύρες (Παλιεράκης, 2007).

Η εκρηκτική αύξηση του πληθυσμού σε συνδυασμό με τη γενικότερη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, κυρίως στις ανεπτυγμένες χώρες, αποτελεί επίσης μια σημαντική αιτία έλλειψης νερού. Προβλέψεις που έγιναν μετά από σχετικές στατιστικές μελέτες δείχνουν ότι ο παγκόσμιος πληθυσμός θα σταθεροποιηθεί στα 8,5-9 δισεκατομμύρια έως το 2050.

Η γεωργία, καταναλώνει το 80-85% των διαθέσιμων υδατικών πόρων και αναπτύσσεται συνεχώς για να μπορέσει να καλύψει τις αυξημένες ανάγκες του πληθυσμού, ενώ η αλόγιστη χρήση φυτοφαρμάκων και χημικών λιπασμάτων που παρασύρονται από το νερό της βροχής, ρυπαίνουν τόσο τα επιφανειακά νερά όσο και τα υπόγεια αποθέματα, αποτελώντας ένα ακόμη επιβαρυντικό παράγοντα που προκαλεί λειψυδρία.

Η μεγάλη αύξηση της βιομηχανικής παραγωγής, η οποία προσπαθεί να καλύψει τις συνεχώς αυξανόμενες καταναλωτικές ανάγκες, που οφείλονται στην αύξηση του βιοτικού επιπέδου των ανθρώπων κυρίως στις οικονομικά ανεπτυγμένες χώρες (Τζανάκη, 2010).

Η συγκέντρωση μεγάλου πληθυσμού στις πόλεις είναι μια δημογραφική παράμετρος που οδηγεί σε αλόγιστη χρήση νερού. Στις μεγάλες πόλεις μεγάλες ποσότητες επιφανειακών υδάτων εκτρέπονται και τελικά οδηγούνται στη θάλασσα ανεκμετάλλευτα, μη επιτρέποντας στη γη να τα απορροφήσει (Παλιεράκης, 2007).

Η κακή διαχείριση των υδατικών πόρων και η έλλειψη στρατηγικού σχεδιασμού, που περιλαμβάνει την κατασκευή έργων υποδομής, την αντικατάσταση ή συντήρηση των δικτύων και γενικότερα τη διαχείριση της ζήτησης, είναι παράγοντες που διογκώνουν το πρόβλημα.

Η σπατάλη του νερού που οφείλεται κυρίως στη μη ορθολογική χρήση του στην άρδευση, είναι άλλος ένας παράγοντας που επιδεινώνει το πρόβλημα. Σε παγκόσμιο επίπεδο υπολογίζεται ότι το 80% της αύξησης της ζήτησης τροφής μετά το 1960, καλύφθηκε από γεωργική παραγωγή που βασίζεται στην άρδευση (Παλιεράκης, 2007).

Η υπεράντληση νερού με γεωτρήσεις προκαλεί την υφαλμύρωση του υδροφόρου ορίζοντα. Επίσης διάφορες ανθρωπίνες δραστηριότητες, μπορεί να προκαλέσουν την μόλυνσή του.

1.1.2 Η χρήση του νερού

Το νερό χρησιμοποιείται ευρύτατα σε διάφορες δραστηριότητες και σκοπούς, σε ποσότητες που εξαρτώνται από παράγοντες που έχουν σχέση με το γεωγραφικό χώρο, το πολιτιστικό, το κοινωνικό και το οικονομικό επίπεδο των ανθρώπων.

Οι χρήσεις του νερού διακρίνονται (Δεληγιάννη και Μπελεσιώτης, 1995):

- Στην οικιακή χρήση, όπου περιλαμβάνεται το πόσιμο, το νερό για καθαριότητα και το νερό για μαγείρεμα.
- Στην κοινοτική χρήση, στην οποία περιλαμβάνεται το πότισμα των δημοσίων χώρων, το δίκτυο νερού για πυρόσβεση, οι υδατικοί δρόμοι μεταφοράς όπου υπάρχουν, όπως είναι τα κανάλια για μεταφορά υλικών.
- Στη βιομηχανική χρήση, η οποία περιλαμβάνει το νερό που χρησιμοποιείται για τις ανάγκες της βιομηχανίας, χημικής ή μη, για τις ανάγκες της παραγωγής ή σαν νερό ψύξης και
- Στη γεωργική χρήση, όπου περιλαμβάνεται νερό που χρησιμοποιείται στη γεωργία, την κτηνοτροφία και την αλιεία.

Η κάθε χρήση απαιτεί νερό διαφορετικής ποιότητας τόσο ως προς την περιεκτικότητα των αλάτων όσο και ως προς τη βιολογική καθαρότητα. Οι προδιαγραφές του νερού είναι διαφορετικές και είναι περισσότερο ή λιγότερο ελαστικές ανάλογα με τη χρήση του (Δεληγιάννη και Μπελεσιώτης, 1995).

Το νερό παρουσιάζει μεγάλη διαλυτική ικανότητα, καθώς διαλύει στερεά, υγρά και αέρια συστατικά με μεγάλη ευκολία. Τα φυσικά νερά των πηγών, των ποταμών και των λιμνών έχουν πολύ χαμηλή περιεκτικότητα αλάτων, ενώ στο θαλασσινό νερό η περιεκτικότητα των αλάτων είναι μεγαλύτερη, κυρίως σε χλωριούχο νάτριο το οποίο του προσδίδει την αλμυρότητα (Τζανάκη, 2010).

Η ποσότητα και οι χημικές ιδιότητες των διαλυμένων αλάτων επηρεάζουν τη γεύση και γενικά τη χρησιμότητα του νερού. Ανάλογα με την ποσότητα των ολικώς διαλυμένων αλάτων (Total dissolved solids, TDS), κατατάσσεται σε (Δεληγιάννη και Μπελεσιώτης, 1995):

- Κατάλληλο πόσιμο νερό με 500 ppm TDS.
- Ελαφρώς αλμυρό νερό με 1.000 ppm TDS, το οποίο γίνεται αποδεκτό και ως πόσιμο νερό.
- Αλμυρό νερό με 1.000-2.000 ppm TDS, το οποίο μόνο σε ακραίες περιπτώσεις γίνεται αποδεκτό για οικιακή χρήση.
- Γλυφό νερό με περιεκτικότητα αλάτων 2.000-10.000 ppm TDS και η χρήση του ως πόσιμο νερό προκαλεί διάφορες διαταραχές.
- Πολύ αλμυρό νερό με TDS > 10.000 ppm.
- Θαλάσσιο και ωκεάνιο νερό με περιεκτικότητα αλάτων από 10.000 έως περίπου 42.000 ppm TDS.

Η κατηγοριοποίηση αυτή είναι σχετική και υπάρχουν διαβαθμίσεις ανάλογα με την σκοπιμότητα της χρήσης του.

1.2 Το πρόβλημα του νερού στην Ελλάδα

1.2.1 Γενικά

Η Ελλάδα, όπως εξάλλου και ολόκληρος ο πλανήτης βρίσκεται τα τελευταία χρόνια αντιμέτωπη με το μείζον πρόβλημα της λειψυδρίας. Η μείωση των βροχοπτώσεων, οι ακραίες μετεωρολογικές μεταβολές και κυρίως η κακή διαχείριση των υδατικών πόρων είναι μερικοί παράγοντες που επιδεινώνουν την κατάσταση και ωθούν στην αναζήτηση εναλλακτικών πηγών ύδρευσης (Τζεν, 2008).

Η υπερεκμετάλλευση του υπόγειου και του επιφανειακού υδροφόρου ορίζοντα, η έλλειψη σχεδίου διαχείρισης, η κακή υποδομή των δικτύων ύδρευσης και αποθήκευσης νερού, η τάση για προσωρινές και μη αποτελεσματικές λύσεις, συνιστούν κακή διαχείριση των υδατικών πόρων και επιδεινώνουν το υπάρχον πρόβλημα. Έως και το 2100 προβλέπεται αύξηση της μέσης θερμοκρασίας έως και 2 βαθμούς °C, οι βροχοπτώσεις θα μειωθούν σημαντικά ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες, ενώ θα υπάρχει και αστάθεια στην ένταση και τη συχνότητά τους.

Η ανάπτυξη του τουρισμού οδηγεί σε μεγάλη διακύμανση της ζήτησης μεταξύ θερινής και χειμερινής περιόδου, με σημαντική αύξηση της ζήτησης νερού κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, που μπορεί να φτάσει στο πενταπλάσιο της χειμερινής ζήτησης.

Όλα αυτά συνεπάγονται μείωση της απορροής και υποβάθμιση της ποιότητας του νερού που σε συνδυασμό με την αυξημένη αστική και γεωργική κατανάλωση, θα οδηγήσει σε μείωση της γεωργικής παραγωγής, αποδυνάμωση του αγροτικού πληθυσμού και πιθανόν διαμάχες για τη χρήση νερού. Τα ποσοστά βροχοπτώσεων ανά τη χώρα ελαττώνονται σε περιοχές όπως η Κρήτη, τα νησιά του Αιγαίου αλλά και τμήματα της ηπειρωτικής Ελλάδας. Άμεση συνέπεια είναι οι περιοχές αυτές να αντιμετωπίζουν το μεγαλύτερο κίνδυνο εξάντλησης των υδάτινων αποθεμάτων τους στο εγγύς μέλλον (Παλιεράκης, 2007).

1.2.2 Μέθοδοι αντιμετώπισης της λειψυδρίας

Για τη σωστή αντιμετώπιση της λειψυδρίας, θα πρέπει (Τζεν, 2010):

- Να εφαρμοστούν μέτρα εξοικονόμησης και σωστής διαχείρισης των υδατικών πόρων
- Να εφαρμοστούν μέθοδοι επαναχρησιμοποίησης του νερού
- Να εφαρμοστούν διαχρονικές πολιτικές όσον αφορά την προστασία και τη διάθεση των υδάτων.

Λύσεις στην έλλειψη του νερού είναι η μεταφορά νερού από περιοχές που υπάρχει το αγαθό αυτό, η κατασκευή φραγμάτων για τη συγκέντρωση και αποθήκευση του νερού των ποταμών και την μετέπειτα αξιοποίησή του και η αφαλάτωση θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού. Αν αναλογιστεί κανείς ότι το 97% του νερού πάνω στη γη είναι θαλασσινό, γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η αφαλάτωση θαλασσινού για την παραγωγή πόσιμου νερού, είναι η μόνη ουσιαστική και μακροχρόνια λύση στο πρόβλημα, σε παγκόσμιο επίπεδο. Βέβαια παρά το ότι η αφαλάτωση παράγει φρέσκο νερό, αυτό δεν θα πρέπει να επιφέρει την ανατιολόγητη και υπερβολική παραγωγή και την αλόγιστη διάθεση και χρήση του (Τζεν, 2010).

Η μεταφορά νερού και η αφαλάτωση είναι οι εναλλακτικές λύσεις που εφαρμόζονται περισσότερο, ενώ επίσης έχουν κατασκευαστεί φράγματα σε πολλές περιοχές.

➤ **Κατασκευή φραγμάτων**

Η κατασκευή φραγμάτων είναι μια λύση που εκμεταλλεύεται το ανάγλυφο του εδάφους των νησιών, με τις έντονες κλίσεις και τις υψομετρικές διαφορές. Κατά την περίοδο βροχοπτώσεων, δημιουργούνται χείμαρροι που με ταχύτητα κατευθύνουν μεγάλες ποσότητες νερού στη θάλασσα, αφήνοντάς το αναξιοποίητο και ανεκμετάλλευτο (Τζανάκη, 2010).



Εικόνα 1.1: Κατασκευή φραγμάτων. (Πηγή: Τζανάκη, 2010)

➤ **Μεταφορά νερού**

Η μεταφορά νερού από γειτονικά νησιά ή από την ηπειρωτική χώρα άρχισε να εφαρμόζεται από τη δεκαετία του '80 και είναι μια λύση προσωρινή και πολύ δαπανηρή. Αρχικά η μεταφορά γινόταν με πλοία του στρατού, αλλά εδώ και αρκετά χρόνια έχει ανατεθεί σε ιδιώτες και η αγορά μονοπωλείται από ένα υδροφόρο πλοίο (Τζανάκη, 2010).

➤ **Αφαλάτωση νερού**

Η αφαλάτωση του νερού είναι μια εναλλακτική λύση, πολύ χαμηλότερου κόστους από τη μεταφορά νερού και έχει ήδη εφαρμοστεί σε ορισμένα νησιά με την κατασκευή και λειτουργία μονάδων αφαλάτωσης κυρίως με τη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης.

Κάποιες από αυτές τις μονάδες έχουν εγκαταλειφθεί, πολλές λειτουργούν, ενώ μερικές είναι πιλοτικές εφαρμογές ενταγμένες σε αναπτυξιακά προγράμματα (Τζανάκη, 2010).

2. ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ

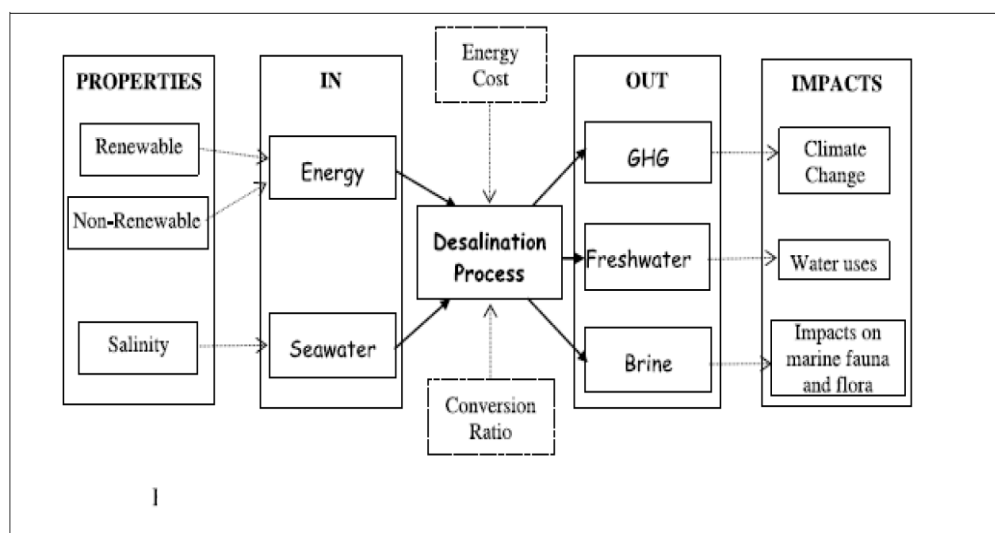
2.1 Γενικά

2.1.1 Η έννοια της αφαλάτωσης

Με τον όρο αφαλάτωση χαρακτηρίζουμε οποιαδήποτε διεργασία αφαίρεσης αλάτων από μια αλατούχα ουσία και κυρίως από αλατούχα ύδατα. Κατ' επέκταση, η αφαλάτωση είναι μια μέθοδος ανάκτησης πόσιμου νερού από θαλασσινό νερό ή από υφάλμυρα υπόγεια και επιφανειακά νερά. Βρίσκει κυρίως εφαρμογή σε περιοχές δίπλα στη θάλασσα, αλλά φτωχές σε πόσιμο νερό. (Καραχάλιου, 2010).

Υφάλμυρο θεωρείται το νερό με συγκέντρωση 1.000 – 11.000 ppm TDS, ενώ θαλασσινό το νερό με αλατότητα περίπου 35.000 ppm TDS (Tzen, 2010).

Για να γίνει η επεξεργασία, απαιτούνται εγκαταστάσεις με ανεπτυγμένη τεχνολογία και υψηλό κόστος. Η έλλειψη νερού όμως παρουσιάζεται και σε χώρες που όχι μόνο δεν έχουν οικονομικά προβλήματα, αλλά είναι διατεθειμένες να επενδύσουν αξιόλογα ποσά τόσο για την τεχνολογική έρευνα όσο και για την εγκατάσταση μεγάλων μονάδων αφαλάτωσης, αρκεί οι πολίτες τους να μην στερηθούν αυτό το πολύτιμο φυσικό αγαθό.



Εικόνα 2.1: Σχηματικό διάγραμμα των εισόδων και των παραμέτρων ενός συστήματος αφαλάτωσης. Εισόδους αποτελούν η ενέργεια (απο ανανεώσιμες πηγές ή μη) και το αλμυρό νερό και εξόδους το φρέσκο νερό, η άλμη (brine) και τα αέρια του θερμοκηπίου (GHG). (Πηγή: Παλιεράκης, 2007)

2.1.2 Ιστορική αναδρομή

Οι αρχαίοι Έλληνες γνώριζαν τη διαδικασία αφαλάτωσης μέσω εξάτμισης, ενώ οι ναυτικοί είχαν μαζί τους στα μεγάλα ταξίδια τους μικρές συσκευές απόσταξης θαλασσινού νερού.

- Ο Αριστοτέλης, το 350 π.Χ., είχε πειραματιστεί στην αφαλάτωση.
- Το 200 μ.Χ., οι ναυτικοί έχουν στα πλοία τους μικρές, πρωτόγονες μονάδες αφαλάτωσης.
- Το 16^ο αιώνα οι ευρωπαίοι θαλασσοπόροι ήταν εφοδιασμένοι, με μονάδες αφαλάτωσης οι οποίες επιτρεπόταν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε περίπτωση ανάγκης.
- Το 1850 αναπτύχθηκαν μέθοδοι απόσταξης ζάχαρης, που ελαττώνουν τις απαιτήσεις ενέργειας κατά 80%, από τον Αμερικανό μηχανικό Norbert Rillieux, ενώ στα τέλη του 19^{ου} αιώνα αυτές οι μέθοδοι αρχίζουν να εφαρμόζονται και στην αφαλάτωση θαλασσινού νερού.
- Το 1869 δίνεται στην Αγγλία το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για αφαλάτωση νερού.
- Το 1890, στη Δυτική Αυστραλία λειτουργούν μονάδες αφαλάτωσης με τη θερμαντική μέθοδο και παράγουν πανάκριβο νερό. Τα 4,5 λίτρα αφαλατωμένου νερού κόστιζαν όσο το ένα τρίτο του μισθού ενός ανειδίκευτου εργάτη.
- Το 1930 γίνεται η εγκατάσταση του πρώτου εργοστασίου αφαλάτωσης στις Ολλανδικές Αντίλλες.
- Το 1950 στην Αμερική, ιδρύεται το Τμήμα Αλμυρού Νερού και χρηματοδοτούνται έρευνες για την αφαλάτωση, ενώ σε χώρες στη Μέση Ανατολή γίνονται οι πρώτες σύγχρονες εφαρμογές θερμικής αφαλάτωσης.
- Το 1960 στο πανεπιστήμιο UCLA της Καλιφόρνια εκτελούνται τα πρώτα πειράματα στην αντίστροφη ώσμωση και κατασκευάζονται οι πρώτες μεμβράνες από τους ερευνητές, Sydney Loeb και Shrinivasa Sourirajan.
- Το 1965 εφαρμόζεται η μέθοδος αντίστροφης ώσμωσης σε μια πειραματική μονάδα αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού.
- Στα τέλη της δεκαετίας του '70, ο ερευνητής John Cadotte, εφευρίσκει μια μεμβράνη, με εξαιρετικά βελτιωμένα χαρακτηριστικά, η οποία χρησιμοποιείται ευρύτατα τα επόμενα χρόνια.
- Το 1980, λειτουργεί στη Jeda της Σαουδικής Αραβίας, η πρώτη μονάδα αφαλάτωσης που εξυπηρετεί πόλη.
- Την περίοδο 1990-2003 πραγματοποιείται τεχνολογική πρόοδος στην παραγωγική διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης, που είχε σαν αποτέλεσμα τη βελτίωση της ποιότητας του νερού και κυρίως τον υποτριπλασιασμό του κόστους αφαλάτωσης.
- Το 2006 το περιοδικό Science δημοσίευσε μελέτη που ανέφερε τη δημιουργία μεμβρανών νανοσωλήνων άνθρακα (carbon-nanotube membrane), οι οποίες μπορούν να μειώσουν το κόστος παραγωγής κατά 3-4 φορές, λόγω της πολύ χαμηλότερης πίεσης που απαιτείται. Η μέθοδος βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο και εκτιμάται ότι σε 6 με 8 χρόνια, θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανική κλίμακα.

- Το 2006 το PacificInstitute παρουσιάζει μελέτη με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αφαλάτωσης, οι οποίες δεν είναι απαγορευτικές, αλλά ούτε και αμελητέες (Καραχάλιου, 2010).

2.2 Τεχνολογίες αφαλάτωσης

Η αφαλάτωση, όπως αναφέρθηκε, είναι μια φυσική διεργασία αποχωρισμού αλάτων και νερού από υδατικά διαλύματα και χρησιμοποιείται σε μεγάλη κλίμακα, ως καθαρά βιομηχανική μέθοδος, για την παραγωγή καθαρού νερού για κάθε χρήση.

Πολλές μέθοδοι αφαλάτωσης έχουν μελετηθεί σε πιλοτικές εγκαταστάσεις, όμως ελάχιστες εφαρμόστηκαν τελικά σε βιομηχανική κλίμακα, ενώ μερικές εφαρμόστηκαν σε περιορισμένο αριθμό μικρών βιομηχανικών μονάδων.

Οι μέθοδοι αφαλάτωσης για την παραγωγή πόσιμου και βιομηχανικού νερού από θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό, που έχουν προταθεί, εφαρμόσκει και κυκλοφορούν περισσότερο στο εμπόριο, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Στις θερμικές μεθόδους
- Στις μεθόδους με μεμβράνες.

Στις θερμικές μεθόδους (αλλαγή φάσης), η απόσταξη του θαλασσινού νερού επιτυγχάνεται με την αξιοποίηση μιας πηγής θερμικής ενέργειας. Η θερμική αυτή ενέργεια μπορεί να εξασφαλιστεί από μια συμβατική πηγή φυσικού καυσίμου, πυρηνική ενέργεια ή από μια μη συμβατική πηγή ηλιακής ενέργειας ή γεωθερμικής ενέργειας. Στις μεθόδους με μεμβράνες χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια είτε για να επιτευχθεί υψηλή πίεση στις αντλίες είτε για τον ιονισμό των περιεχόμενων αλάτων στο θαλασσινό νερό (A.M.K. El-Ghonemy, 2012).

2.2.1 Οι θερμικές μέθοδοι

Η βασική αρχή είναι η αλλαγή φάσης από υγρό σε αέριο, τους ατμούς οι οποίοι επανασυμπυκνώνονται σε υγρό, ο οποίος είναι τελείως απαλλαγμένος από τα άλατα του αρχικού διαλύματος.

Η αλλαγή φάσης γίνεται με την προσαγωγή θερμότητας, θεωρητικά ίση με τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού η οποία, σε ορισμένες περιπτώσεις, αποδίδεται ξανά, εν μέρει τουλάχιστον, στο σύστημα κατά τη συμπύκνωση των ατμών (Mohamed, 2009).

Η μέθοδοι αφαλάτωσης με απόσταξη κατατάσσονται σε πέντε μεγάλες ομάδες (A.M.K. El-Ghonemy, 2012).

2.2.1.1 Πολυβάθμια εκτόνωση (Multi-Stage Flushing, MSF)

Η μέθοδος της πολυβάθμιας εκτόνωσης ή πολυβάθμιας εκρηκτικής εξάτμισης εφαρμόζεται σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις με μεγάλες παροχές σε αφαλατωμένο νερό.

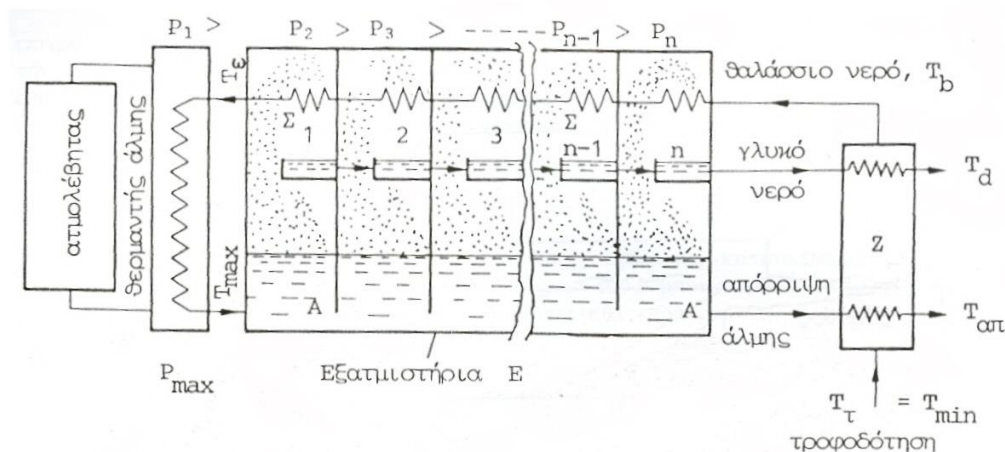
Η μέθοδος αυτή αποτελείται από μια σειρά από θαλάμους οι οποίοι ονομάζονται βαθμίδες. Σε κάθε βαθμίδα συμπηκνωμένος ατμός χρησιμοποιείται για να προθερμάνει το θαλασσινό νε-

ρό. Το θαλασσινό νερό θερμαίνεται σε θερμοκρασία λίγο χαμηλότερη από το σημείο βρασμού και εισέρχεται στην πρώτη βαθμίδα, όπου επικρατεί πίεση χαμηλότερη από την πίεση κορεσμού. Με την απότομη μετάβαση του θερμού θαλασσινού νερού σε χαμηλότερη πίεση, προκαλείται ένας εκρηκτικός ταχύτατος βρασμός και η απότομη μετατροπή του σε ατμό. Ο ατμός που δημιουργείται έρχεται κατόπιν σε επαφή με τους σωλήνες που μεταφέρουν κρύο θαλασσινό νερό, υγροποιείται και συλλέγεται ως καθαρό νερό (Α.Μ.Κ. El-Ghonemy, 2012).

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται στις επόμενες βαθμίδες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2 με την υπολειπόμενη άλμη και με πίεση συνεχώς μειούμενη, λόγω της αντίστοιχης μείωσης της θερμοκρασίας της άλμης.

Τέτοιες εγκαταστάσεις βρίσκουν ευρύτατη εφαρμογή στη Μέση Ανατολή και ειδικότερα στη Σαουδική Αραβία, τα Εμιράτα και το Κουβέιτ και καλύπτουν το 40% της παγκόσμιας εφαρμογής της αφαλάτωσης. Η πρώτη μεγάλη εγκατάσταση πραγματοποιήθηκε στο Κουβέιτ και αποτελείτο από δύο μονάδες παροχής 4540 m³/dkάθε μία, με 19x2 = 38 βαθμίδες και με βαθμό απόδοσης 5,7kg/2326 KJ.

Μπορούμε δυνητικά να θεωρήσουμε ως βαθμό απόδοσης των θερμικών μονάδων αφαλάτωσης το πηλίκο της μάζας του παραγόμενου αποσταγμένου νερού προς τη μάζα του ατμού που χρησιμοποιήθηκε. Για τη συγκεκριμένη αυτή μέθοδο, ένας τυπικός βαθμός απόδοσης είναι περίπου οκτώ.



Εικόνα 2.2: Σχηματική παράσταση πολυβάθμιας εκτόνωσης. (Πηγή: Δεληγιάννη και Μπελεσιώτης, 1995)

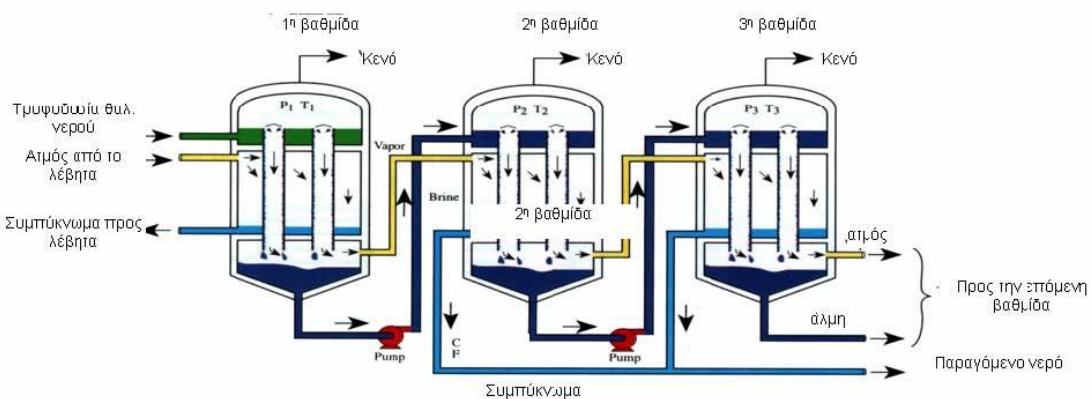
2.2.1.2 Εξάτμιση με πολλαπλές βαθμίδες (Multiple Effect Evaporation ή ME)

Η εξάτμιση με πολλαπλές βαθμίδες παλαιότερα δεν ήταν και τόσο διαδεδομένη λόγω των τεχνικών προβλημάτων που είχε και σταδιακά αντικαταστάθηκε από την πολυβάθμια εκτόνωση. Αρχίζει όμως ξανά να κερδίζει έδαφος λόγω του ότι έχει καλύτερο συντελεστή θερμικής απόδοσης.

Στη μέθοδο αυτή ο ατμός παράγεται από την απορρόφηση θερμότητας από το θαλασσινό νερό. Ο ατμός που παράγεται σε μια βαθμίδα είναι σε θέση να θερμάνει το διάλυμα στην επόμενη βαθμίδα επειδή η επόμενη βαθμίδα είναι σε χαμηλότερη θερμοκρασία και πίεση. Η απόδοση της διεργασίας είναι ανάλογη του αριθμού των βαθμίδων (Μανωλάκος, 2006).

Στην Εικόνα 2.3 φαίνεται η πορεία του διαλύματος της άλμης και των ατμών σε τριτοβάθμιο εξατμιστήριο.

Στη διεργασία εξάτμισης σε πολλαπλές βαθμίδες χρησιμοποιούνται συχνά συμπιεστές μηχανικοί ή θερμικοί, ενώ υπάρχουν παραλλαγές της με οριζόντια ή κάθετη διάταξη των σωλήνων ατμού και με τη φορά του ατμού σε σχέση με την άλμη (ομοροή, αντιροή). Στις περισσότερες εγκαταστάσεις εξατμιστηρίων πολλαπλών βαθμίδων η κυκλοφορία της άλμης και των ατμών γίνεται κατά ομοροή (Ameri, et al., 2009).



Εικόνα 2.3: Εξάτμιση με πολλαπλές βαθμίδες. (Πηγή: Μανωλάκος, 2006)

2.2.1.3 Εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών (Vapor Compression – VC)

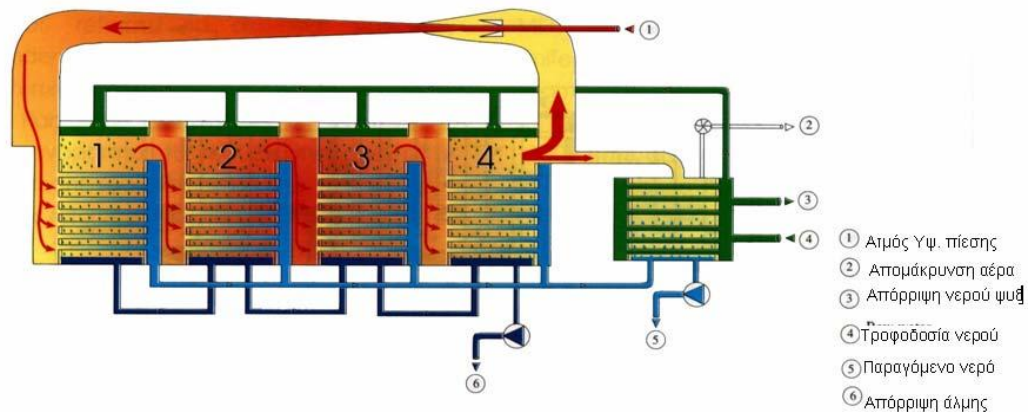
Αυτή η μέθοδος είναι πιο απλή από τις προηγούμενες ενώ είναι και πιο αποτελεσματική. Οι ατμοί οι οποίοι παράγονται κατά την εξάτμιση του θαλασσινού νερού, βρίσκονται, λόγω της ανύψωσης του σημείου βρασμού, σε κατάσταση υπερθέρμανσης και έχουν χαμηλότερη πίεση από αυτή που αντιστοιχεί στην πίεση κορεσμού του καθαρού νερού.

Συμπυκνώνονται επομένως, χάνοντας τη θερμότητα υπερθέρμανσης, σε θερμοκρασία χαμηλότερη από αυτή του σημείου βρασμού του διαλύματος.

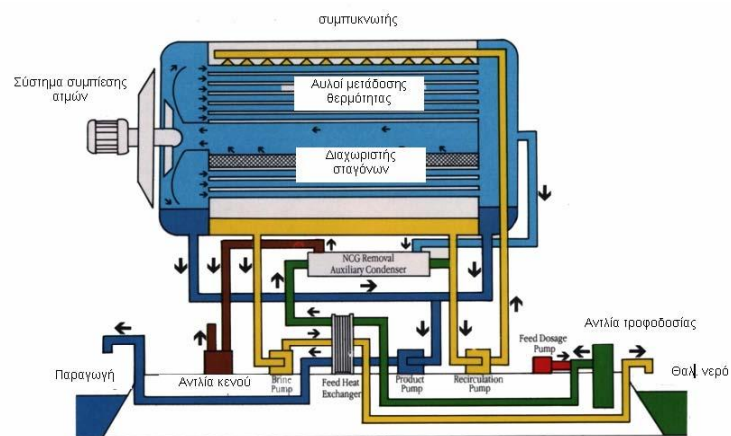
Η λανθάνουσα αυτή θερμότητα συμπύκνωσης που προσφέρεται από την πλευρά της εξάτμισης στο συμπυκνωτή είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ως θερμότητα θέρμανσης, στην άλλη πλευρά του συμπυκνωτή (Aybar, 2002) και (Bahar, et al., 2006).

Αυτό επιτυγχάνεται με τη συμπύεση των ατμών σε υψηλότερη πίεση και μπορεί να γίνει με δύο τρόπους.

Ο πρώτος είναι η θερμική συμπύεση ατμών (Thermal Vapor Compression, TVC) (Εικόνα 2.4), όπου χρησιμοποιείται ένας θερμοσυμπιεστής για να αυξήσει την πίεση του ατμού. Στο δεύτερο τρόπο η συμπύεση του ατμού γίνεται μέσω μιας μηχανικής διάταξης, η οποία τις περισσότερες φορές λειτουργεί με ηλεκτρισμό. Αυτή η διαδικασία έχει ονομαστεί μηχανική συμπύεση ατμού (Mechanical Vapor Compression, MVC) (Εικόνα 2.5) (Τζανάκη, 2010).



Εικόνα 2.4:Θερμική συμπίεση ατμών. (Πηγή: Μανωλάκος, 2006)



Εικόνα 2.5: Μηχανική συμπίεση ατμών. (Πηγή: Μανωλάκος, 2006)

2.2.1.4 Αφαλάτωση με ψύξη (freezing process)

Δεν έχει βρει ακόμη βιομηχανική εφαρμογή παρ'όλο ότι είναι μια απλή μέθοδος στην εφαρμογή της.

Όπως είναι γνωστό, ο πάγος ο οποίος σχηματίζεται κατά την ψύξη του θαλάσσιου νερού αποτελείται από γλυκό νερό ενώ τα άλατα συγκεντρώνονται στην επιφάνεια του πάγου.

Η μέθοδος ψύξης απέτυχε κυρίως διότι δεν έγινε δυνατόν να σχηματιστούν μεγάλοι κρύσταλλοι πάγου. Οι λεπτοί κρύσταλλοι συγκρατούσαν στην επιφάνειά τους τα άλατα για την απομάκρυνση των οποίων έπρεπε να χρησιμοποιείται σχεδόν η μισή ποσότητα του νερού. Έτσι η μέθοδος κρίθηκε αντισυμβατική (Rice and Chau, 1997) (Cheng, et al., 1987) (Abdul - Fattah, 1987) και (Fournier, et al., 1974).

2.2.1.5 Ηλιακή απόσταξη (Solar Distillation)

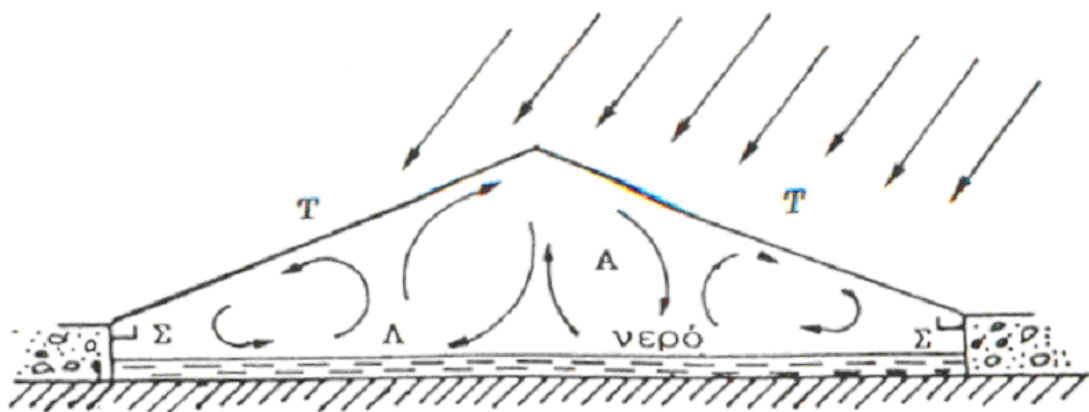
Μια ακόμα, όχι τόσο συνηθισμένη, μέθοδος αφαλάτωσης υφάλμυρου ή θαλασσινού νερού είναι η ηλιακή απόσταξη. Η μέθοδος αυτή απαιτεί μια απλή λειτουργία, η οποία μπορεί να λειτουργήσει από μη ειδικευμένο προσωπικό με χρήση ειδικών συσκευών που ονομάζονται ηλιακοί αποστακτήρες (solar stills). Λόγω της μη εξειδικευμένης απαίτησης των συσκευών αυτών για

χρήση, η διεργασία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί οπουδήποτε με το μικρότερο αριθμό προβλημάτων. Αξιοποιεί τη μέθοδο της εξάτμισης και τη μέθοδο της συμπύκνωσης. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στο γεγονός ότι το γυαλί, καθώς και άλλα διαφανή υλικά, έχουν την ιδιότητα της αντανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας (φαινόμενο θερμοκηπίου) (Α.Μ.Κ. ΕΙ. Ghonemy, 2012).

Οι ακτίνες του ήλιου, οι οποίες διέρχονται μέσα από μια διαφανή κεκλιμένη οροφή μέσα στον αποστακτήρα, θερμαίνουν το θαλασσινό νερό που βρίσκεται στον πυθμένα της, το οποίο εξατμίζεται και ανεβαίνει στην οροφή, οπότε συμπυκνώνεται και πάλι και με κατάλληλη διάταξη συλλέγεται ως προϊόν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6. Η μέγιστη θερμοκρασία ενός τέτοιου θερμοκηπίου μπορεί να φτάσει περίπου τους 45 °C – 55 °C το καλοκαίρι.

Το κόστος λειτουργίας της εγκατάστασης είναι ελάχιστο ή μηδενικό γιατί δεν χρησιμοποιείται κανένα καύσιμο και το κόστος κατασκευής περιορίζεται με την επιλογή σχετικά οικονομικών υλικών.

Η απόδοση μιας τέτοιας εγκατάστασης είναι χαμηλή, περίπου 3,5 l/m²εδάφους. Το νερό που παράγεται δεν είναι απαλλαγμένο από μικροοργανισμούς και χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία.



Εικόνα 2.6: Ηλιακός αποστακτήρας τύπου θερμοκηπίου. Όπου T είναι το διαφανές κάλυμμα, Λ η λεκάνη που περιέχει το νερό και Σ τα κανάλια συλλογής του αποστάγματος.
(Πηγή: Δεληγιάννη και Μπελεσιώτης, 1995)

2.2.2 Οι μέθοδοι με μεμβράνες

Οι μέθοδοι με μεμβράνες κατατάσσονται στην ηλεκτροδιάλυση και στην αντίστροφη ώσμωση.

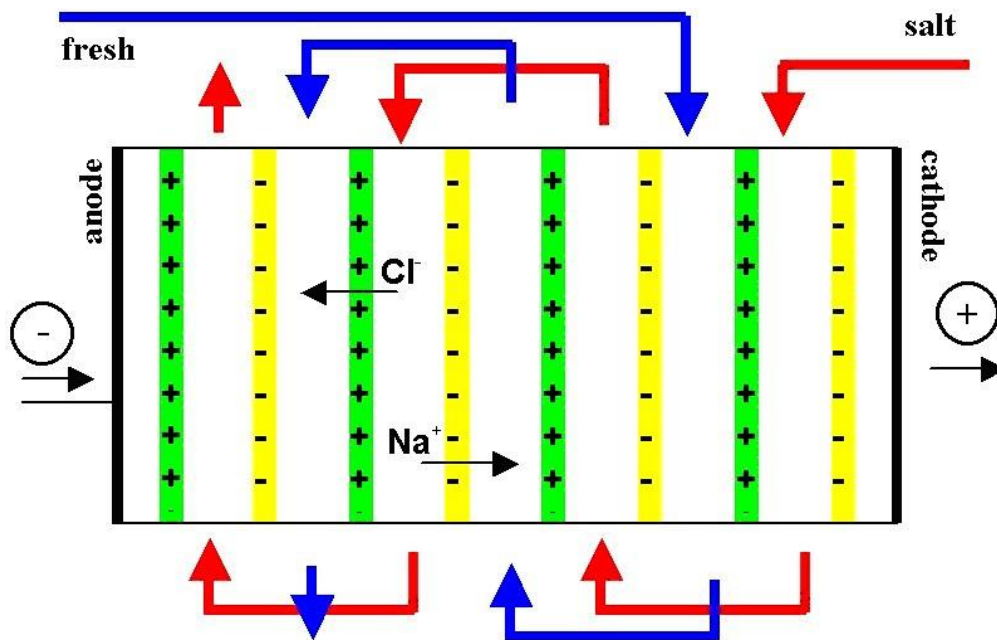
2.2.2.1 Ηλεκτροδιάλυση (Electro Dialysis ή E.D.)

Η ηλεκτροδιάλυση είναι μία ηλεκτροχημική μέθοδος διαχωρισμού στην οποία τα ιόντα μεταφέρονται μέσα από μεμβράνες, από την πλευρά όπου το διάλυμα έχει τη μικρότερη συγκέντρωση ιόντων σε αυτή με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση και με την εφαρμογή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος.

Ανάλογα με την πορεία της λειτουργίας μιας μονάδας ηλεκτροδιάλυσης, η μέθοδος χωρίζεται σε (Mohamed, 2009):

1. Ηλεκτροδιάλυση διακεκομμένης λειτουργίας
2. Ηλεκτροδιάλυση συνεχούς λειτουργίας μίας κατεύθυνσης (μονόδρομης)
3. Ανάστροφος ηλεκτροδιάλυση, η οποία είναι συνεχούς λειτουργίας.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε υφάλμυρα νερά, με σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις αλάτων, γιατί η ενέργεια που απαιτεί είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των αλάτων. Για το λόγο αυτό δεν είναι οικονομικά ανταγωνιστική για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού και δεν έχει ευρεία εφαρμογή.



Εικόνα 2.7: Κίνηση των ιόντων κατά τη μέθοδο της ηλεκτροδιάλυσης. (Πηγή: Τζανάκη, 2010)

2.2.2.2 Αντίστροφη ώσμωση

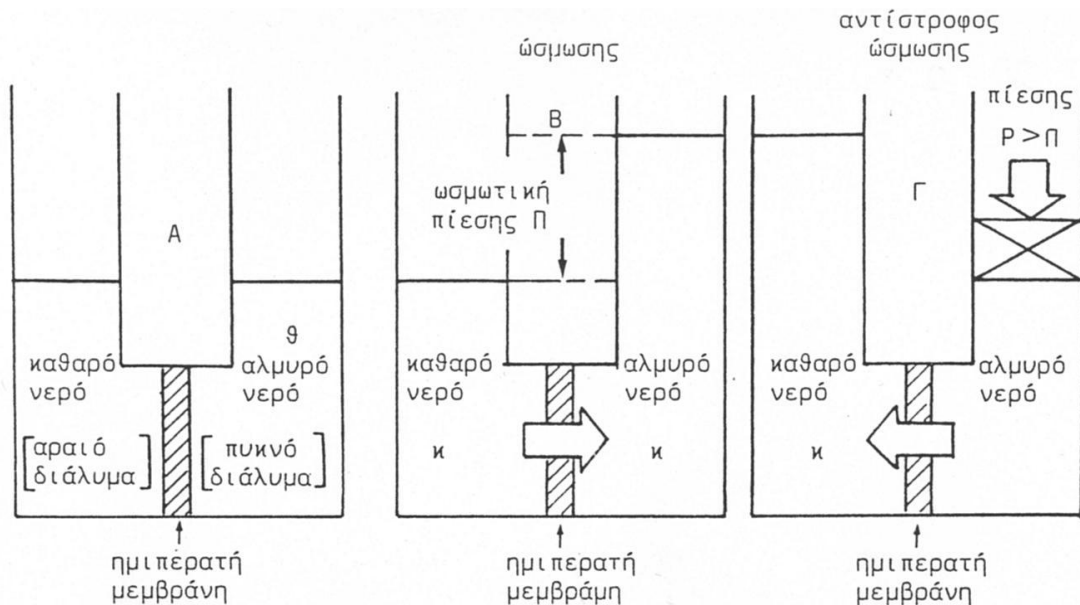
Η διεργασία της ώσμωσης και της αντίστροφης ώσμωσης

Η αντίστροφη ώσμωση είναι μια πολύ διαδεδομένη μέθοδος. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στο φαινόμενο της ώσμωσης και χρησιμοποιείται η αντίστροφη διαδικασία από την ορθή ώσμωση. Στην Εικόνα 2.8 απεικονίζεται σχηματικά η λειτουργία της ώσμωσης και της αντίστροφης ώσμωσης. Στο θάλαμο Κ υπάρχει καθαρό νερό, ενώ στο θάλαμο Θ έχει τοποθετηθεί θαλασσινό νερό. Τα δύο νερά χωρίζονται από μια διεκλεκτική μεμβράνη και βρίσκονται σε συνηθισμένη ατμοσφαιρική πίεση (Δεληγιάννη και Μπελεσιώτης, 1995).

Λόγω της διαφοράς δυναμικού στις δύο πλευρές της μεμβράνης παρατηρείται διάχυση νερού από το θάλαμο Κ προς το θάλαμο Θ, μέσω της μεμβράνης. Δεν είναι κανονική ροή δια των πόρων της μεμβράνης αλλά διάχυση των μορίων του νερού μέσα από τα κενά της μοριακής δομής του πλέγματος της μεμβράνης.

Το καθαρό νερό που διαχέεται μέσα από τη μεμβράνη ελαττώνει την πίεση και αυξάνει τη συγκέντρωση των αλάτων του καθαρού νερού, ενώ σύγχρονα αραιώνει το θαλάσσιο νερό και αυξάνει την πίεση στο θάλαμο Θ. Η αύξηση αυτή εμφανίζεται σαν υδροστατική διαφορά της

στάθμης των δύο διαλυμάτων. Αυτή η αύξηση της υδροστατικής πίεσης έχει σαν συνέπεια τη βαθμιαία ελάττωση της ροής του νερού.



Εικόνα 2.8: Σχηματική παράσταση της ωσμωτικής πίεσης A, στο σημείο ισορροπίας B και της αντίστροφης ώσμωσης Γ. (Πηγή Δεληγιάννη και Μπελεσιώτης, 1995)

Σε κάποιο σημείο της διαρκώς ελαττούμενης ποσότητας νερού που διαχέεται προς το θάλαμο Θ, η αύξηση της υδροστατικής πίεσης αντισταθμίζει τη ροή και αποκαθίσταται μία κινητική ισορροπία όπου το νερό ρέει προς τις δύο διευθύνσεις. Στο σημείο ισορροπίας η υδροστατική διαφορά της πίεσης ονομάζεται ωσμωτική πίεση. Εφ' όσον δεν επεμβαίνουν άλλοι εξωτερικοί παράγοντες παραμένει σταθερή στο σημείο ισορροπίας. Η αριθμητική τιμή της ωσμωτικής πίεσης είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης του νερού σε άλατα και της θερμοκρασίας του, είναι όμως ανεξάρτητη από τη μεμβράνη. Ένα θαλάσσιο νερό αλμυρότητας 35.000 ppm έχει ωσμωτική πίεση 23,3 bar ενώ σε νερό με αλμυρότητα 50.000 ppm η ωσμωτική πίεση ανέρχεται σε 37,4 bar (Mohamed, 2009).

Εάν εφαρμοστεί μία εξωτερική πίεση στην επιφάνεια του θαλάσσιου νερού μεγαλύτερη της ωσμωτικής $\Delta P > \Delta \Pi$ το φαινόμενο της ώσμωσης αντιστρέφεται και τα μόρια του νερού διαχέονται από το θαλάσσιο νερό προς το καθαρό, από το θάλαμο Θ προς το θάλαμο Κ.

Στην αντίστροφη ώσμωση οι ιδιότητες της μεμβράνης έχουν, αντίθετα με την ώσμωση, ιδιαίτερη σημασία στη διεργασία της μεθόδου, όπως π.χ. η σταθερά περατότητας και η διεκλεκτικότητα.

Στην Εικόνα 2.8, η μεταφορά του νερού προς το θάλαμο Κ αυξάνει την αλμυρότητα του, επομένως και την ωσμωτική πίεση, με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η ροή των μορίων του νερού και να απαιτείται βαθμιαία αύξηση της πίεσης, ώστε η διαφορά $\Delta P - \Delta \Pi$ να διατηρείται σταθερή.

Στη διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης, η ροή του νερού τροφοδότησης είναι συνεχής ενώ η ταχύτητα του ρυθμίζεται, ώστε η συγκέντρωση της άλμης να κρατείται σε ορισμένα όρια που να μην ελαττώνουν τη ροή του καθαρού νερού για την επικρατούσα πίεση (Mohamed, 2009).

Οι μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης

Οι μεμβράνες αποτελούν κύρια στοιχεία της διαδικασίας και όλη η μέθοδος βασίζεται στην καλή λειτουργία και την προστασία των μεμβρανών. Είναι πολύ λεπτά φύλλα τα οποία αποτελούν ένα φράγμα στην ελεύθερη ροή του διαλύματος τροφοδότησης. Αποτελούνται από δύο διακεκριμένες στοιβάδες: μία λεπτότατη στοιβάδα, τον υμένα (skin), που είναι το δραστικό τμήμα της μεμβράνης για το διαχωρισμό του νερού από τα διαλυμένα ή αιωρούμενα συστατικά, και από ένα λεπτό στρώμα από πορώδες υλικό το οποίο είναι περατό τόσο στο νερό όσο και στα υπόλοιπα συστατικά που περιέχονται σε αυτό.

Ο δραστικός υμένας είναι πολύ «εύθραυστος», και το πάχος του είναι μικρότερο του 0,1 μm. Συνήθως αφήνει ελεύθερα το νερό να διέρχεται δια της επιφάνειάς του, ενώ συγκρατεί 90 έως 99% τα ανόργανα και 95 έως 99% τα οργανικά συστατικά και σχεδόν 100% τα λεπτά αιωρούμενα κολλοειδή, όπως βακτηρίδια, ιούς, πυριτικό οξύ, άργιλο, κλπ. Ανάλογα με τον τρόπο παρασκευής τους και το πολυμερές συστατικό που χρησιμοποιείται διακρίνονται σε ομοιογενείς και ετερογενείς μεμβράνες (Αλεξάκης, 1993).

Η εσωτερική δομή των μεμβρανών, όπως αυτή παρατηρείται στην επιφάνεια μιας διατομής είναι ιδιαίτερης σημασίας για την αξιολόγηση της μεμβράνης. Η δομή της επιφάνειας του υμένα καθορίζει την περατότητα και την εκλεκτικότητα της μεμβράνης, ενώ η εσωτερική δομή της όλης μεμβράνης αφορά στη μηχανική της αντοχή.

Ως προς την εσωτερική μορφή οι μεμβράνες διακρίνονται σε (Mohamed, 2009):

1. Ομοιογενείς
2. Ασύμμετρες
3. Σύνθετες
4. Ασύμμετρες με επιφανειακό λεπτό υμένα.

Στη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης για την αφαλάτωση του νερού, οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες μεμβράνες είναι οι ασύμμετρες και οι σύνθετες, οι οποίες φέρουν ένα επιφανειακό υμένα (skin) λιγότερο πορώδη από την αμέσως επόμενη στοιβάδα στήριξης του υμένα, ο οποίος αποτελεί τη δραστική μεμβράνη για τη διαπερατότητα του νερού. Ο δραστικός υμένας στις ασύμμετρες μεμβράνες σχηματίζεται μόνο από οξική Κυτταρίνη, CA, πολυαμίδες, PA, και πολύ-ιμίδες, PI.

Αντίθετα η δραστική στοιβάδα στις σύνθετες μεμβράνες παρασκευάζεται από μία μεγάλη ποικιλία πολυμερών ουσιών που σχηματίζουν χυνόμενα λεπτά στρώματα, όπως π.χ. οξική κυτταρίνη, CA, πολυαμίδες, PA, πολυακρυλο-νιρίλια, PAN, πολυσουλφόνες, PS, φθοριούχο πολυβινυλιδένιο, PVDF, πολυβινυλιμυδαζολίνη, PVI, κλπ (Δεληγιάννη και Μπελεσιώτης, 1995).

Στοιχεία μεμβρανών (modules)

Οι μεμβράνες των μεθόδων υπό πίεση παρασκευάζονται από οργανικές πολυμερείς ενώσεις και είναι πολύ λεπτές και εύθραυστες, για αυτό το λόγο μορφοποιούνται, με τη βοήθεια διαφόρων στηριγμάτων, σε μονάδες οι οποίες ονομάζονται στοιχεία μεμβρανών (modules) (Mohamed, 2009).

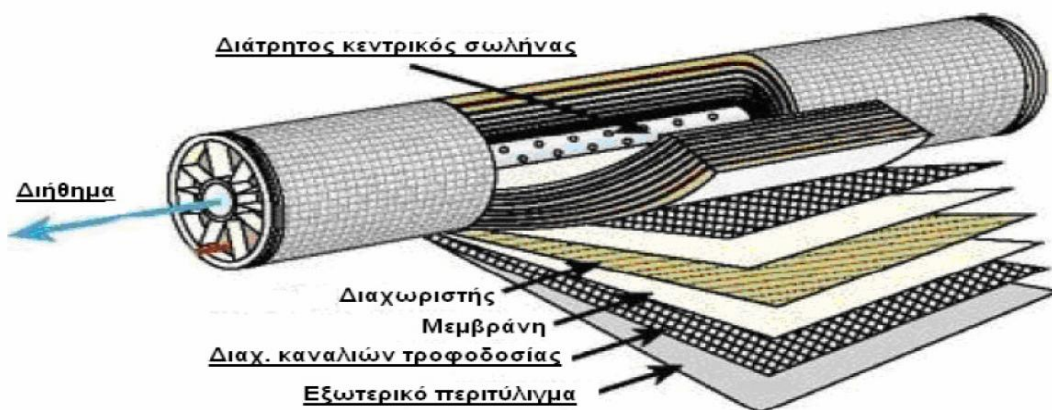
Κατά την παρασκευή τους σχηματοποιούνται σε δύο μορφές:

1. Σε επίπεδο σχήμα
2. σε σωληνωτή μορφή με διάμετρο από 85mm έως 2.54 cm (1 inch).

Για τις διεργασίες υπό πίεση υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι στοιχείων μεμβρανών που ανάλογα με την κατασκευαστική εταιρία παρουσιάζουν τεχνολογικές διαφορές, η βασική όμως αρχή της λειτουργίας τους παραμένει η ίδια. Οι τέσσερις τύποι των στοιχείων είναι:

1. Στοιχείο μεμβρανών ελικοειδούς περιέλιξης (spiral wound module) (Εικόνα 2.9)
2. Στοιχείο κοίλων ινών (hollow fiber module)
3. Σωληνοειδές στοιχείο (tubular module)
4. Δισκοειδήστοιχεία (Platte and frame modules).

Οι δύο πρώτοι τύποι στοιχείων έχουν την ευρύτερη εφαρμογή στην αντίστροφη ώσμωση για την παραγωγή καθαρού νερού από αλμυρό ή θαλάσσιο νερό.



Εικόνα 2.9: Δομή μιας μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης σπειροειδούς περιέλιξης. (Πηγή: Τζανάκη, 2010)

2.3 Σύγκριση τεχνολογιών αφαλάτωσης

Πολλοί παράγοντες συνηγορούν για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου και την εγκατάσταση μιας μονάδας αφαλάτωσης. Στην Εικόνα 2.10 φαίνονται σε παγκόσμια κλίμακα οι εγκαταστάσεις αφαλάτωσης κατά τεχνολογία και η παραγωγή τους σε m^3/d . Η αντίστροφη ώσμωση έχει το μεγαλύτερο μερίδιο με 59% και ακολουθεί η πολυβάθμια εκτόνωση (MSF) με ποσοστό 27%. Στον πίνακα 2.1 φαίνεται η κατανομή των εγκαταστάσεων ανά χώρα, η μέθοδος που εφαρμόζεται και η παραγωγή νερού σε χιλιάδες m^3/d .

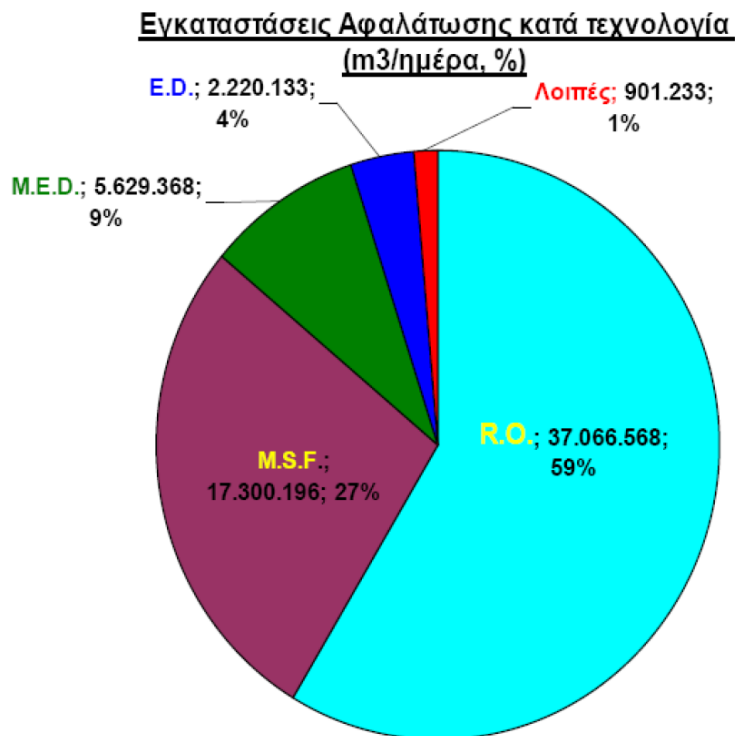
Πίνακας 2.1: Μέθοδος αφαλάτωσης ανά χώρα και η παραγωγή νερού σε 103m³/d (Πηγή: Τζανάκη, 2010)

Country	MSF	MED	VC	RO	ED
S. Arabia	2700		50	1000	94
USA	50	50	130	1600	280
Kuwait	350			50	
Libya	400			130	67
Spain	56		40	230	45
Italy	200		75	40	50
Algeria	60		30	80	16

Το καλύτερο σύστημα είναι αυτό που μπορεί να παράγει αξιόπιστα νερό με τις αναμενόμενες προδιαγραφές ποιότητας και την αναμενόμενη ποσότητα νερού σε λογικό κόστος (Lourasis, 2002). Τα κριτήρια σύμφωνα με τα οποία γίνεται η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου αφαλάτωσης είναι τα εξής (Τζεν, 2001):

1. Η ποιότητα και αλατότητα του νερού τροφοδοσίας
2. Η απαιτούμενη ποιότητα του παραγόμενου νερού
3. Το μέγεθος της μονάδας
4. Η διαθεσιμότητα ηλεκτρικής ενέργειας
5. Η διαθεσιμότητα του περιβάλλοντος χώρου
6. Ο προϋπολογισμός της επένδυσης
7. Ο απαιτούμενος χρόνος παράδοσης της μονάδας
8. Η διαθεσιμότητα τεχνικού προσωπικού.

Επιπλέον, ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που πρέπει να εξεταστεί είναι η δυνατότητα χρήσης ΑΠΕ, το δυναμικό της περιοχής, η δυνατότητα συνδυασμού της μεθόδου με την ΑΠΕ (Tzen and Morris, 2003).



Εικόνα 2.10: Εγκαταστάσεις αφαλάτωσης κατά τεχνολογία και η παραγωγή τους σε m³/d.
(Πηγή: Τζανάκη, 2010)

Στον πίνακα 2.2 δίνονται χαρακτηριστικά στοιχεία των κυριότερων μεθόδων αφαλάτωσης, το νερό τροφοδοσίας, ο τύπος της ενέργειας που απαιτείται, τα TDS του νερού που παράγεται και το εύρος δυναμικότητας της εγκατάστασης σε m³/d. Όσον αφορά στο νερό τροφοδοσίας, οι θερμικές διεργασίες χρησιμοποιούνται για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού, ενώ η ηλεκτροδιάλυση χρησιμοποιείται για την αφαλάτωση υφάλμυρου νερού. Η αντίστροφη ώσμωση χρησιμοποιείται για την αφαλάτωση τόσο του θαλασσινού όσο και του υφάλμυρου νερού. Συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους με μεμβράνες, για χαμηλή αλατότητα του τροφοδοτούμενου νερού και για μεγάλες εγκαταστάσεις αφαλάτωσης με παραγωγή πόσιμου νερού, η ηλεκτροδιάλυση είναι η πιο ελκυστική εναλλακτική λύση. Για μεγαλύτερη αλατότητα του νερού τροφοδοσίας, η αντίστροφη ώσμωση είναι συνήθως φθηνότερη επιλογή, αν και η επεξεργασία του τροφοδοτούμενου νερού είναι σημαντικό μέρος της διαδικασίας και μπορεί να είναι δαπανηρή.

Οι μονάδες αφαλάτωσης που χρησιμοποιούν τεχνολογίες πολυβάθμιας εκτόνωσης, πολυβάθμιας εξάτμισης και εξάτμισης με επανασυμπύεση ατμών, χρησιμοποιούν θερμική ενέργεια για τη θέρμανση του νερού τροφοδοσίας, επειδή η μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρισμό έχει χαμηλή απόδοση, υπάρχει ένα υψηλό ποσοστό απωλειών ενέργειας, αν για τη θέρμανση του νερού χρησιμοποιηθεί ηλεκτρική ενέργεια. Ενδεικτικά οι μονάδες εξάτμισης με επανασυμπύεση ατμών καταναλώνουν 15KWh/m³, ενώ οι μονάδες πολυβάθμιας εκτόνωσης καταναλώνουν πάνω από 20KWh/m³.

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά στοιχεία των κυριότερων μεθόδων αφαλάτωσης (Πηγή: Loupasis, 2002)

Μέθοδος	Νερό τροφοδοσίας	Ενέργεια	Ποιότητα παραγόμενου νερού (ppmTDS)	Μέγιστη τυπική δυναμικότητα μονάδας (m ³ /d)
MSF	Θαλασσινό	Ατμός	~10	5.000-60.000
MED	Θαλασσινό	Ατμός	~10	5.000-20.000
VC	Θαλασσινό	Ηλεκτρισμός	~10	2.400
SWRO	Θαλασσινό	Ηλεκτρισμός	~350-500	128.000
BWRO	Υφάλμυρο	Ηλεκτρισμός	~350-500	98.000
ED	Υφάλμυρο	Ηλεκτρισμός	~350-500	45.000

Γενικά οι θερμικές διεργασίες παράγουν αποσταγμένο νερό με πολύ χαμηλά TDS (περίπου 10 έως 20 ppm), ενώ αντίθετα τα TDS του παραγόμενου νερού από τις μεθόδους αντίστροφης ώσμωσης και ηλεκτροδιάλυσης είναι συνήθως γύρω στα 350-500 ppm(πόσιμο).

Η κατεργασία του νερού που απαιτείται μετά την αφαλάτωση ποικίλλει ανάλογα με τη χρήση του παραγόμενου νερού.

Οι μέθοδοι απόσταξης χρησιμοποιούνται συνήθως σε εγκαταστάσεις με μεγάλη παραγωγή νερού. Εξάριση αποτελεί η διαδικασία εξάτμισης με επανασυμπύκνωση ατμών, η οποία χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μικρής και μεσαίας κλίμακας. Οι μονάδες πολυβάθμιας εκτόνωσης είναι κατάλληλες για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές. Η διαδικασία πολυβάθμιας εξάτμισης χρησιμοποιείται σε μεσαίας και μεγάλης κλίμακας, ενώ έχουν αναπτυχθεί και εφαρμογές μικρής κλίμακας. Οι μέθοδοι με μεμβράνες εφαρμόζονται σε μεγάλο εύρος παραγωγής νερού, καθώς και οι δύο τεχνολογίες, η αντίστροφη ώσμωση και η ηλεκτροδιάλυση, είναι κατάλληλες για μικρές και μεγάλες εφαρμογές.

Σε μια σύγκριση μεταξύ θαλασσινού και υφάλμυρου νερού, το κόστος αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού (αλατότητα περίπου 35.000 ppm TDS), είναι περίπου τρεις έως πέντε φορές μεγαλύτερο από το κόστος του υφάλμυρου νερού (αλατότητα 1.000 – 11.000 ppm TDS), για το ίδιο μέγεθος της μονάδας (Τζανάκη, 2010).

2.4 Πλεονεκτήματα της αντίστροφης ώσμωσης

Η τεχνολογία της αντίστροφης ώσμωσης έχει επικρατήσει στην αγορά έναντι των άλλων τεχνολογιών. Μερικά από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

1. Μπορεί να αφαλατώνει θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό.
2. Εφαρμόζεται σε μεγάλο εύρος παραγωγής νερού, από μερικά λίτρα έως χιλιάδες.
3. Οι μονάδες είναι αξιόπιστες.
4. Μπορεί να παράγει πόσιμο νερό.
5. Έχει χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με άλλες μεθόδους.
6. Έχει modular και compact κατασκευή, η οποία μπορεί να είναι εγκατεστημένη μέσα σε μεταλλικά εμπορευματοκιβώτια (container).

7. Έχει μικρό χρόνο κατασκευής σε σχέση με άλλες μεθόδους.
8. Οι εγκαταστάσεις που απαιτούνται είναι πολύ μικρότερες σε όγκο για την ίδια ποσότητα παραγόμενου νερού.

Επιπλέον, δε χρειάζεται θέρμανση του νερού τροφοδοσίας και επομένως έχει χαμηλότερες θερμικές απώλειες, έχει λιγότερα προβλήματα διάβρωσης, έχει υψηλότερο βαθμό απόδοσης, ενώ εκτός από τα άλατα μπορούν να απομακρυνθούν και άλλα συστατικά όπως βακτήρια (Παλιεράκης, 2007).

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα είναι ο χρόνος που απαιτείται για την εγκατάστασή της. Μια μικρή μονάδα αντίστροφης ώσμωσης μπορεί να ολοκληρωθεί σε ένα μήνα, ενώ η κατασκευή εγκαταστάσεων για θερμικές διεργασίες μπορεί να διαρκέσει γύρω στα τρία με πέντε χρόνια και συγχρόνως απαιτεί πολύ μικρότερη έκταση γης από μια εγκατάσταση για θερμικές διεργασίες.

3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΠΕ

3.1 Εισαγωγή

Το κόστος της ενέργειας είναι ένας σημαντικός παράγοντας στις μεθόδους αφαλάτωσης και επηρεάζει σημαντικά το κόστος του αφαλατωμένου νερού.

Το κόστος της ενέργειας για τις περισσότερες χημικές βιομηχανίες, είναι χαμηλό και κυμαίνεται συνήθως ανά μονάδα παραγόμενου προϊόντος από 1 έως 5% του ολικού κόστους ενώ ακόμα και σε ακραίες περιπτώσεις δεν υπερβαίνει το 10%. Αντίθετα στη βιομηχανία της αφαλάτωσης το κόστος της ενέργειας ανέρχεται περίπου στο 40% του ολικού κόστους (Hellmann, et al., 2001). Λόγω ακριβώς του υψηλού κόστους της ενέργειας ερευνάται διαρκώς η δυνατότητα της εύρεσης και της χρήσης φθηνών πηγών ενέργειας για να είναι δυνατή η παραγωγή όσο το δυνατόν φθηνού αφαλατωμένου νερού.

3.2 Συμβατικές πηγές ενέργειας

Οι λεγόμενες συμβατικές μορφές ενέργειας, οι οποίες κυρίως χρησιμοποιούνται σήμερα στις μεγάλες εγκαταστάσεις αφαλάτωσης, παρουσιάζουν συχνές και πολλές φορές σημαντικές αυξομειώσεις κόστους με αντίστοιχη επίδραση στο κόστος του αφαλατωμένου νερού.

Η μεταφορά εξ' άλλου του αφαλατωμένου νερού σε μεγάλες αποστάσεις από τον τόπο της παραγωγής του, αυξάνει κατά πολύ το κόστος του, το ύψος του οποίου εξαρτάται και από τοπικούς παράγοντες. Αυτές οι συνθήκες καθιστούν αναγκαία, εκτός από ακραίες περιπτώσεις, την κατανάλωση του στην ευρύτερη περιοχή της παραγωγής του, όπου κατά κανόνα πρέπει να διατίθεται και η ενέργεια για την τροφοδότηση της εγκατάστασης.

Η ηλεκτρική ενέργεια συνήθως διατίθεται σε όποιο σημείο ζητηθεί εφ' όσον δεν υπάρχουν περιορισμοί ως προς την ποσότητα και την απόσταση μεταφοράς. Αντίθετα **η θερμότητα** πρέπει να διατίθεται επί τόπου, διότι η μεταφορά της ακόμα και σε μικρές αποστάσεις, είναι τελείως αντιοικονομική.

Η σύζευξη μιας εγκατάστασης αφαλάτωσης με ένα **πυρηνικό εργοστάσιο** εμπίπτει πρακτικά σε δυαδικό συγκρότημα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος-αφαλατωμένου νερού (Al-Mutaz, 2003). Σε μια παρόμοια εγκατάσταση οι στρόβιλοι κινούνται με ατμό που παράγεται σε ένα πυρηνικό αντιδραστήρα.

Η σύνδεση μιας εγκατάστασης αφαλάτωσης παρουσιάζει ορισμένα τεχνικά προβλήματα, ενώ ο συνδυασμός πυρηνική ενέργεια – αφαλάτωση είναι οικονομικός μόνο σε εγκαταστάσεις μεγάλων παροχών αφαλατωμένου νερού και το κόστος του νερού επηρεάζεται σημαντικά από το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος και του ατμού που παρέχεται στην αφαλάτωση (Nisan and Benzarti, 2008).

Οι χημικές και διάφορες άλλες βιομηχανίες απορρίπτουν τεράστιες ποσότητες, με χαμηλή περιεκτικότητα, θερμικής ενέργειας. Η ενέργεια αυτή απορρίπτεται είτε στην ατμόσφαιρα, ως αέρας ψύξης, ή στο περιβάλλον, ως νερό ψύξης. Παρ' όλη τη χαμηλή περιεκτικότητα σε θερμό-

τητα, η απορριπτόμενη αυτή ενέργεια μπορεί, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, να χρησιμοποιηθεί για την αφαλάτωση. Παρόμοιοι συνδυασμοί έχουν εφαρμοστεί σε βιομηχανίες για την εξοικονόμηση ενέργειας και την παραγωγή νερού για χρήση στις κατεργασίες των εγκαταστάσεων (Mohamed, 2009).

Παρόμοιες πηγές ενέργειας μπορούν να αξιοποιηθούν από βιομηχανίες οι οποίες χρησιμοποιούν υψηλές θερμοκρασίες και τα προϊόντα τους ψύχονται στο τελικό ή ενδιάμεσο στάδιο κατεργασίας, όπως π.χ. τσιμεντοβιομηχανίες, βιομηχανίες παραγωγής γυαλιού, σιδηροβιομηχανίες, κλπ. **Ιδιαίτερα χρήσιμη απορριπτόμενη θερμότητα είναι των απαερίων των μηχανών Ντίζελ και αυτών των αεριοστροβίλων** (Mohamed, 2009).

3.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αφαλάτωση

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θεωρούνται γενικά ότι έχουν χαμηλό κόστος (δωρεάν πρώτη ύλη) και ως εκ τούτου θεωρούνται οικονομικές, εν τούτοις δεν είναι πάντοτε εφαρμόσιμες στην αφαλάτωση, ακόμα και αν χρησιμοποιούνται μόνο σε μικρές μονάδες, χαμηλής παροχής, όπου άλλες πηγές ενέργειας δεν είναι προσιτές. Οι κύριοι λόγοι που οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν έχουν βρει ευρύτερη εφαρμογή είναι:

- Δεν έχουν συνεχή ροή ώστε να ανταποκρίνονται στη ζήτηση της παραγωγής.
- Δεν είναι εύκολο να αποθηκευτούν, όπως π.χ. η ηλιακή, σε ποσότητα ή ένταση για την απρόσκοπτη λειτουργία της εγκατάστασης αφαλάτωσης.
- Η τεχνολογία συλλογής ή και σύζευξης δεν έχει αναπτυχθεί σε σημείο ώστε να παρέχει τη φθηνή ενέργεια, σε χαμηλό κόστος.

3.3.1 Ανάγκη για χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

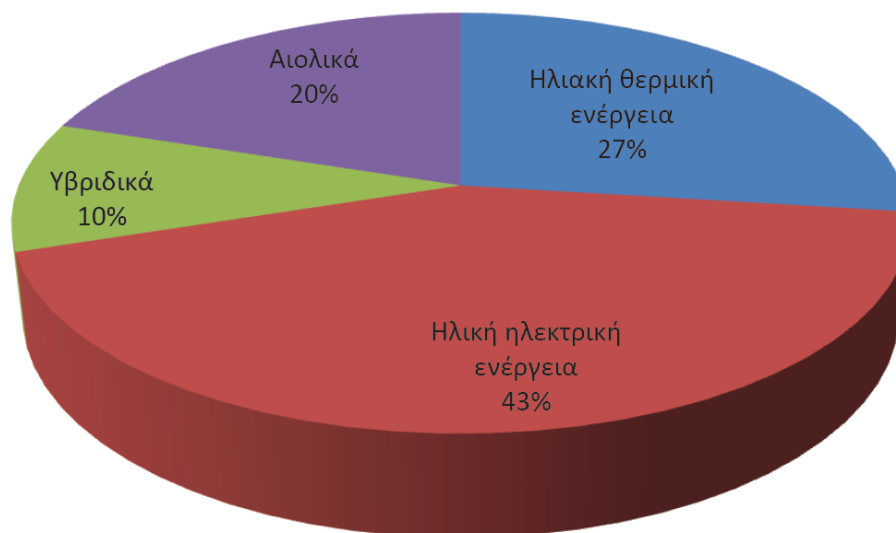
Όλες οι μέθοδοι αφαλάτωσης είναι ενεργοβόρες και συχνά πρέπει να εγκατασταθούν σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου η διαθέσιμη ενέργεια έχει υψηλό κόστος γιατί παράγεται από ακριβά καύσιμα ή όπου το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο είναι ασθενές (Τζεν, 2008).

Στην Ελλάδα για παράδειγμα, σε πολλά νησιά η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μιας εγκατάστασης αφαλάτωσης δεν μπορεί να γίνει από το υπάρχον δίκτυο ενέργειας, καθώς τα τοπικά δίκτυα έχουν μικρή ισχύ και δεν μπορούν να καλύψουν το επιπλέον φορτίο. Για την ενίσχυση του τοπικού δικτύου, δεν μπορεί να γίνει μεταφορά ενέργειας από την ηπειρωτική χώρα, καθώς η υποθαλάσσια σύνδεση απαιτεί υψηλό προϋπολογισμό, ενώ η ηλεκτρική ενέργεια στοιχίζει γιατί συχνά για την παραγωγή ρεύματος χρησιμοποιείται ακριβό ντίζελ.

Επομένως το πρόβλημα της παροχής ενέργειας σε μια εγκατάσταση αφαλάτωσης είναι υπαρκτό και πολύ σημαντικό. Το πρόβλημα δεν είναι μόνο να υπάρχει ηλεκτρική ενέργεια, αλλά καθώς το κόστος ενέργειας είναι βασικός παράγοντας που καθορίζει το τελικό κόστος του νερού, η ενέργεια πρέπει να είναι φθηνή ώστε το κόστος του παραγόμενου νερού να είναι μικρό και να μπορεί να είναι ανταγωνιστικό έναντι των άλλων μεθόδων αντιμετώπισης της έλλειψης νερού. Άλλο σημαντικό ζήτημα όσον αφορά στην ενέργεια που πρέπει να ληφθεί υπόψη, είναι ότι κατά την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, εκλύεται CO₂ που ρυπαίνει την ατμόσφαιρα.

Η λύση στο πρόβλημα είναι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας η ηλιακή, η αιολική και η γεωθερμία που έχουν σχετικά χαμηλό κόστος και συγχρόνως δε ρυπαίνουν το περιβάλλον. Η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην αφαλάτωση είναι τεχνικά εφικτή και εφαρμόζεται όλο και περισσότερο σε παγκόσμιο επίπεδο (Τζεν, 2010).

Η πλειονότητα των εφαρμογών είναι αυτόνομες πιλοτικές μονάδες που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο εθνικών ή κοινοτικών προγραμμάτων και αποτελούν μια εναλλακτική εφαρμογή των συστημάτων αφαλάτωσης, στο πλαίσιο της προστασίας του περιβάλλοντος όσον αφορά στην ενεργειακή τους κατανάλωση. Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται το ποσοστό συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην αφαλάτωση νερού. Η ηλιακή ενέργεια με χρήση φωτοβολταϊκών καταλαμβάνει το 43%, ενώ η θερμική ηλιακή ενέργεια το 27%. Συνολικά η συμμετοχή της ηλιακής ενέργειας στην αφαλάτωση σε σχέση με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι 70%. Ακολουθούν η αιολική ενέργεια με χρήση ανεμογεννήτριας με ποσοστό 20% και τα υβριδικά συστήματα με 10% (Mathioulakis, et al., 2007).



Εικόνα 3.1: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για αφαλάτωση. (Πηγή: Mathioulakis, et al., 2007)

3.3.2 Τρόπος σύνδεσης αφαλάτωσης με την πηγή ενέργειας

Ένα σύστημα αφαλάτωσης μπορεί να τροφοδοτείται ενεργειακά με τους εξής τρόπους:

- Διασυνδεδεμένο χωρίς ΑΠΕ, όπου η μονάδα αφαλάτωσης είναι συνδεδεμένη με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο.
- Διασυνδεδεμένο με ΑΠΕ, όπου η ΑΠΕ τροφοδοτεί απευθείας τη μονάδα και το πλεόνασμα της ενέργειας που παράγει το δίνει στο δίκτυο. Ο νέος νόμος 3851 επιτρέπει η εγκατεστημένη ισχύς της ΑΠΕ να είναι έως 25% μεγαλύτερη από την εγκατεστημένη ισχύ της μονάδας αφαλάτωσης.
- Αυτόνομο σύστημα, το οποίο καλύπτεται ενεργειακά από ΑΠΕ ή σε συνδυασμό με ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος.

Το υβριδικό σύστημα χρησιμοποιεί δύο διαφορετικές ανεξάρτητες πηγές ενέργειας, όπου η μία δρα επικουρικά ως προς την άλλη.

3.3.3 Συνδυασμοί τεχνολογιών αφαλάτωσης και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

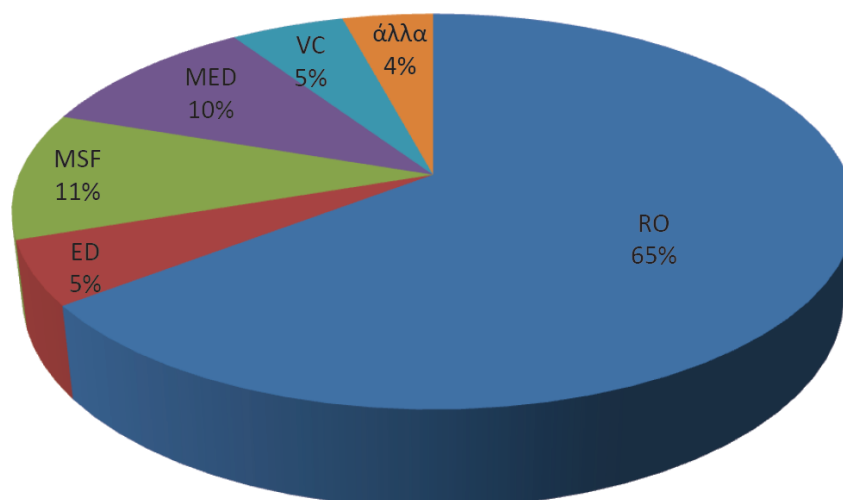
Υπάρχουν πολλοί πιθανοί συνδυασμοί τεχνολογιών αφαλάτωσης και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ορισμένοι όμως παρουσιάζουν περισσότερα πλεονεκτήματα από οικονομική και τεχνολογική άποψη. Κάποιοι συνδυασμοί είναι πιο κατάλληλοι για μονάδες μεγάλης κλίμακας και άλλοι είναι καλύτεροι για εφαρμογές μικρής κλίμακας.

Η εφαρμογή τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην περιοχή και από την ποιότητα του νερού που τροφοδοτεί τη μονάδα. Παράμετροι που πρέπει να εξεταστούν για την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού (Τζανάκη, 2010):

- Αξιολόγηση των υδατικών πόρων ως προς την ποιότητα καθώς και ως προς την ποσότητα εάν πρόκειται για υφάλμυρο νερό. Αν είναι διαθέσιμο υφάλμυρο νερό, μπορεί να αποτελέσει την καλύτερη λύση επειδή η αλατότητά του κανονικά είναι πολύ μικρότερη (<10.000 ppm). Επίσης σε περιοχές μακριά από την ακτογραμμή μπορεί να είναι διαθέσιμο μόνο υφάλμυρο νερό, ενώ σε παράκτιες περιοχές συνήθως επιλέγεται θαλασσινό νερό.
- Προσδιορισμός των διαθέσιμων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αξιολόγηση του δυναμικού τους στην περιοχή.

Σε κάθε περίπτωση συνδυασμού μεθόδων αφαλάτωσης με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας απαιτείται αναλυτική μελέτη, καθώς εκτός από τους υδατικούς πόρους, πρέπει να διερευνηθεί το δυναμικό της κάθε μορφής ΑΠΕ στην περιοχή, πρέπει να γίνει κατάλληλη τεχνικοοικονομική μελέτη για να διαπιστωθεί η διαθεσιμότητα της κάθε τεχνολογίας και η εμπορική της ωριμότητα, καθώς επίσης και η δυνατότητα εφαρμογής της στην κάθε περίπτωση, οι υπάρχουσες υποδομές, τα συνοδά έργα που απαιτούνται και τέλος το κόστος της επένδυσης (Τzen, 2010).

Στην Εικόνα 3.2 παρουσιάζονται οι τεχνολογίες αφαλάτωσης που συνδυάζονται με ΑΠΕ. Παρατηρείται ότι 65% από τα συστήματα αφαλάτωσης που συνδέθηκαν με ΑΠΕ είναι ΑΩ.



Εικόνα 3.2: Τεχνολογίες αφαλάτωσης που συνδυάζονται με ΑΠΕ. (Πηγή: Mathioulakis, et al., 2007)

Παρακάτω αναφέρονται οι κυριότεροι συνδυασμοί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συστημάτων αφαλάτωσης.

3.3.3.1 Μονάδες αφαλάτωσης με φωτοβολταϊκά

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών είναι από τις πιο ανεπτυγμένες στο χώρο των ΑΠΕ και στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο που παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το 1839 από το Γάλλο φυσικό Edmond Becquerel. Η ηλιακή ενέργεια συλλέγεται από μια διάταξη φωτοβολταϊκών πάνελ και παράγεται συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο με ένα μετατροπέα μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα.

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες είναι συνήθως κατασκευασμένες από πυρίτιο ή άλλο ημιαγωγό υλικό. Στις εφαρμογές που κυκλοφορούν στο εμπόριο, οι μονοκρυσταλλικές κυψέλες σιλικόνης μπορούν να έχουν απόδοση της τάξης του 15% και οι πολυκρυσταλλικές κυψέλες σιλικόνης 10-11%. Μπορεί να επιτευχθεί αύξηση της ηλεκτρικής παραγωγής με τη χρήση κατάλληλων ανακλαστικών κατόπτρων, τα οποία συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ορισμένα σημεία, όπως επίσης και με τη χρήση κατάλληλων συσκευών που στρέφουν τις κυψέλες στη σωστή κατεύθυνση ανάλογα με τη θέση του ήλιου. Οι έρευνες στο χώρο των φωτοβολταϊκών στοχεύουν στην αύξηση της απόδοσης των κυψελών, στη μείωση του κόστους κατασκευής τους, στην έρευνα για άλλα ημιαγωγά υλικά, όπως το CIS που είναι ευαίσθητο και σε ακτινοβολίες που ανήκουν στην υπέρυθη περιοχή του φάσματος του φωτός ή το GaAs με το οποίο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 30%, τα οποία όμως είναι τοξικά (A.M.K. El-Ghonemy, 2012).

Στην αφαλάτωση, ο συνδυασμός ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά με τη διαδικασία της αντίστροφη ώσμωσης έχει ευρεία εφαρμογή και αποτελεί οικονομικά βιώσιμη και εμπορικά εκμεταλλεύσιμη λύση. Το κατά πόσο μπορεί αυτή η τεχνολογία να ανταγωνιστεί τις συμβατικές πηγές ενέργειας καθορίζεται από παράγοντες που έχουν σχέση με τη δυνατότητα παραγωγής της μονάδας, με την απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο και με τη συγκέντρωση άλατος στο νερό τροφοδοσίας.

Μια εφαρμογή φωτοβολταϊκών σε συνδυασμό με την τεχνολογία πολυβάθμιας εξάτμισης πραγματοποιήθηκε το 1984 στο UmmAlNar, AbuDhabi, Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, με τροφοδοσία θαλασσινού νερού, 1064 συλλέκτες και δυναμικότητα 80m³/d (Tzen, 2010).

Οι Thomsonetal (2003) παρουσίασαν ένα σύστημα ΦΒ-ΑΩ ονομαστικής δυναμικότητας 3 m³/day, με εγκαταστημένη ισχύ ΦΒ συστήματος 2,4 kW_p. Το σύστημα λειτουργεί χωρίς συσσωρευτές, και είναι εξοπλισμένο με μονάδα ανάκτησης υδραυλικής ενέργειας της άλμης του τύπου Clarkμπρητης εταιρίας SpectraWatermakers. Το συνεχές ρεύμα από το ΦΒ σύστημα μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο μέσω δύο αντιστροφών μεταβλητής συχνότητας οι οποίοι τροφοδοτούν απευθείας τους δύο κινητήρες του συστήματος.

Τέλος, μια εφαρμογή φωτοβολταϊκών σε συνδυασμό με την τεχνολογία πολυβάθμιας εξάτμισης πραγματοποιήθηκε το 1993 στην Almeria στην Ισπανία, με τροφοδοσία θαλασσινού νερού, 252 συλλέκτες και δυναμικότητα 72 m³/d (Tzen, 2010).

3.3.3.2 Μονάδες αφαλάτωσης με ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Βραχυπρόθεσμα, η αιολική ενέργεια είναι η πιο ελκυστική επιλογή γιατί η τεχνολογία της είναι καλά ανεπτυγμένη και σχετικά φθηνή (Tzen, 2010). Οι ανεμογεννήτριες επανήλθαν στο προσκήνιο της ενεργειακής τεχνολογίας στα μέσα της δεκαετίας του εβδομήντα, κυρίως σε συνέπεια των διαδοχικών ενεργειακών κρίσεων αλλά και της επιδεινούμενης περιβαλλοντικής υποβάθμισης. Σήμερα οι ανεμογεννήτριες είναι μια ώριμη τεχνολογία.

Η χρήση ανεμογεννήτριας σε μονάδα αφαλάτωσης εφαρμόζεται κυρίως σε παράκτιες περιοχές, όπου συνήθως το αιολικό δυναμικό είναι αυξημένο, καθώς θεωρείται κατάλληλο αν η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι πάνω από 5m/s. Η ανεμογεννήτρια εκτός από την αφαλάτωση μπορεί να συνεισφέρει στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των κατοίκων της περιοχής με την επιπλέον ενέργεια που παράγει.

Η σύζευξη των ανεμογεννητριών με συστήματα αφαλάτωσης είναι τεχνικά εφικτή. Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια κυρίως συστήματα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης και ηλεκτροδιάλυσης με την προϋπόθεση όμως ότι υπάρχει μεγάλη αποθήκη της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και πολύπλοκα ηλεκτρονικά ισχύος για τη διαχείριση της χρονικής μεταβλητότητας στην προσφορά αιολικής ενέργειας (Καραχάλιου, 2010). Παρόλα αυτά υπάρχουν προσπάθειες για τη χρήση της ανεμογεννήτριας σε απευθείας σύνδεση με τα συστήματα αφαλάτωσης και τη χρήση της ΑΓ με συστήματα αφαλάτωσης με συμπίεση ατμών (VC).

Εφαρμογή ανεμογεννήτριας σε συνδυασμό με μονάδα αφαλάτωσης με τη μέθοδο επανασυμπίεσης ατμών (VC) δυναμικότητας 50 m³/d, πραγματοποιήθηκε το 1999 στα Κανάρια νησιά, στο Rozolzquierdo, στην Ισπανία. Το νερό τροφοδοσίας ήταν θαλασσινό και εγκαταστάθηκαν δύο ανεμογεννήτριες ισχύος 230 KW έκαστη. Η ονομαστική ισχύς του συμπιεστή ήταν 30KW και η κατανάλωση ενέργειας 16 KWh/m³ (Tzen, 2010).

Οι MirandaandInfield (2002), εξέταζαν την απευθείας χρήση της ανεμογεννήτριας ισχύος 2.2 kWμε σύστημα αφαλάτωσης ΑΩ 3 m³/day. Το σύστημα αυτό επηρεάζεται πολύ από τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου και για το λόγο αυτό το ενεργειακό σύστημα περιλαμβάνει πολύ πολύπλοκο σύστημα διαχείρισης της ενέργειας.

Στην Ελλάδα εγκαταστάθηκε η πρώτη πλωτή ανεμογεννήτρια (30kW) για παροχή ηλεκτρικού ρεύματος σε σύστημα αφαλάτωσης με ΑΩ (70m³/d). Εφεδρικά και επικουρικά έχει εγκατασταθεί και φωτοβολταϊκό σύστημα, ενώ η μονάδα είναι αυτόνομη και δεν είναι απαραίτητη η σύνδεσή της με το δίκτυο της ΔΕΗ. Επιπλέον, η πλωτή ανεμογεννήτρια έχει το πλεονέκτημα ότι τοποθετείται σε μεγάλη απόσταση από τη στεριά, όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι πολύ μεγαλύτερη και σταθερή (Νικητάκος, 2008).

Οι Liuetal. (2007), εγκατέστησαν ένα σύστημα αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού με μεμβράνη χαμηλής πίεσης που τροφοδοτείται απευθείας με μηχανική ενέργεια από μια πολυπτέρυγο ανεμογεννήτρια. Η σταθεροποίηση της πίεσης πραγματοποιείται με χρήση δεξαμενής σταθεροποίησης της πίεσης.

Μια άλλη εφαρμογή αφαλάτωσης με τη μέθοδο VC σε συνδυασμό με ανεμογεννήτρια πραγματοποιήθηκε στη Γερμανία, στο νησί Ruegen το 1995. Η ανεμογεννήτρια ήταν ονομαστικής ισχύος 300 KWκαι συνδέθηκε με μονάδα δυναμικότητας 300 m³/d, η οποία επεξεργαζόταν θαλασσινό νερό. Η κατανάλωση ενέργειας ήταν 9-20 KWh/m³(Tzen, 2010).

3.3.3.3 Συστήματα αφαλάτωσης με θερμική ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί μια αστείρευτη ενεργειακή πηγή του πλανήτη μας, καθώς ανά πάσα χρονική στιγμή περίπου 173.000 TW ηλιακής ισχύος διασχίζουν τα όρια της γήινης ατμόσφαιρας. Παράλληλα η ηλιακή ενέργεια είναι η πλέον αξιοποιούμενη από τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας στον τομέα κάλυψης των θερμικών αναγκών, ενώ η αντίστοιχη τεχνολογία εξελίσσεται συνεχώς, επιδιώκοντας να καταστεί πλήρως ανταγωνιστική εν σχέση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας.

Μια μορφή αξιοποίησης της ηλιακής θερμικής ενέργειας είναι οι ηλιακοί αποστακτήρες οι οποίοι είναι απλές συσκευές, κατασκευάζονται εύκολα και τοποθετούνται επίσης εύκολα σε οποιαδήποτε επίπεδη ή κεκλιμένη επιφάνεια, ανάλογα με τον τύπο του αποστακτήρα. Αποτελούνται, στην απλούστερη μορφή τους, από μια λεκάνη η οποία περιέχει το προς εξάτμιση νερό και από ένα διαφανές κάλυμμα το οποίο επιτρέπει τη διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας. Διαφανές κάλυμμα και λεκάνη σχηματίζουν έναν αεροστεγή χώρο όπου επιτελείται η διεργασία της εξάτμισης και συμπύκνωσης, όπως αναφέρουν οι Belessiotis et al. (1995) και Mohamed (2009).

3.3.3.4 Υβριδικά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για αφαλάτωση

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτόνομους σταθμούς, μπορεί να στηρίζεται στη συνεργασία ηλεκτρικών πηγών διαφόρων ειδών, όπου η μια πηγή να δρα συμπληρωματικά προς την άλλη, ώστε να μειώνεται το συνολικό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος. Οι σταθμοί αυτού του τύπου ονομάζονται «υβριδικοί», αφού αποτελούνται από τμήματα διαφορετικών τεχνολογιών. Ειδικότερα, στα αυτόνομα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα, η συνεργασία της Φ/Β γεννήτριας γίνεται συνήθως με ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη ντίζελ ή με ανεμογεννήτριες ή και με τα δύο (Mohamed, 2009).

Τα υβριδικά συστήματα πλεονεκτούν έναντι των άλλων γιατί σε περίπτωση αδυναμίας παροχής ενέργειας από την πρώτη πηγή, χρησιμοποιείται η εφεδρική οπότε το σύστημα δεν τίθεται εύκολα εκτός λειτουργίας. Η επιλογή αυτή έχει αυξημένο κόστος επένδυσης και εγκατάστασης της μονάδας, παρόλα αυτά όμως τα υβριδικά συστήματα αποτελούν συμφέρουσες λύσεις για εγκαταστάσεις μικρού και μεσαίου μεγέθους. Απαιτούν να γίνει ακριβής υπολογισμός της συμμετοχής κάθε μιας πηγής στην παραγωγή ενέργειας, καθώς και προσεκτική σχεδίαση της στρατηγικής λειτουργίας του συστήματος.

Το υβριδικό σύστημα σχεδιάζεται και υπολογίζεται βάσει του αιολικού και ηλιακού δυναμικού, του αρχικού κόστους και του κόστους διαχείρισης και λειτουργίας. Τα φωτοβολταϊκά έχουν υψηλό αρχικό κόστος, αλλά έχουν μικρές απαιτήσεις κατά τη λειτουργία τους και μεγάλη διάρκεια ζωής. Όσο πιο υψηλό είναι το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας κάποιας ΑΠΕ τόσο πιο μικρό είναι το ποσοστό συμμετοχής της στο υβριδικό σύστημα. Το κόστος για το εργατικό δυναμικό επίσης είναι σημαντικό και γι' αυτό προτιμάται η λύση της πλήρως αυτοματοποιημένης λειτουργίας της μονάδας, ώστε να μην είναι απαραίτητη η παρουσία εξειδικευμένου προσωπικού.

Ο καλύτερος συνδυασμός είναι αυτός που δίνει το μικρότερο κόστος παραγόμενου νερού, όπως αναφέρουν οι Mohamed and Papadakis (2003), Tzen et al. (2008) και Sigalos (2004).

4. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1 Ενεργειακές απαιτήσεις κατά την αφαλάτωση νερού

Όλες οι τεχνολογίες αφαλάτωσης του νερού καταναλώνουν σημαντικά ποσά ενέργειας:

- Μεγάλες μονάδες παραγωγής με την τεχνολογία αντίστροφης ώσμωσης, χωρίς σύστημα ανάκτησης ενέργειας, καταναλώνουν 5-9 kWh/m³, ενώ με σύστημα ανάκτησης ενέργειας η κατανάλωση μειώνεται στα 3-4 kWh/m³. Οι μικρές μονάδες καταναλώνουν 15 kWh/m³, ενώ αν το νερό είναι υφάλμυρο η κατανάλωση είναι 1-3 kWh/m³ (Tzen and Morris, 2003).
- Μονάδες παραγωγής με τη μέθοδο ηλεκτροδιάλυσης καταναλώνουν 1,22 kWh/m³ (για αλατότητα του νερού τροφοδοσίας 3000ppm και αλατότητα του παραγόμενου νερού 500 ppm). Η κατανάλωση της μονάδας αυξάνεται με το χρόνο λειτουργίας και μετά από 2,5 χρόνια παρουσιάζει αύξηση 50%. Μονάδες παραγωγής με εξάτμιση επανασυμπύεση ατμών καταναλώνουν 8,5 έως 16 kWh/m³, ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης (Tzen and Morris., 2003).
- Μονάδες παραγωγής με πολυβάθμια εκτόνωση μπορεί να ξεπεράσουν τις 20 kWh/m³ (θερμική και ηλεκτρική ενέργεια) (Τζεν, 2008).

Στον πίνακα 4.1 δίνεται για τις κυριότερες μεθόδους η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, η θερμική ενέργεια από ατμό και η ισοδύναμη ηλεκτρική ενέργεια. Η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης είναι η μέθοδος που καταναλώνει πολύ λιγότερη ενέργεια για την επεξεργασία θαλασσινού και την παραγωγή πόσιμου νερού από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο και αποκτά σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των άλλων τεχνολογιών.

Πίνακας 4.1: Κατανάλωση ενέργειας των κυριότερων μεθόδων αφαλάτωσης (Πηγή: Loupasis, 2002)

Διαδικασία αφαλάτωσης	Θερμική ενέργεια kWh/m ³	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας kWh/m ³	Ισοδύναμη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας kWh/m ³
MSF	7,5 – 11	2,5 – 3,5	10 – 14,5
MED	4 – 7	~2	6 – 9
VC	-	7 – 15	7 – 15
SWRO	-	4-6 με ανάκτηση ενέργειας	4-6 με ανάκτηση ενέργειας
		7-13 χωρίς ανάκτηση ενέργειας	7-13 χωρίς ανάκτηση ενέργειας
BWRO	-	0,5 – 2,5	0,5 – 2,5
ED	-	0,7 – 2,5	0,7 – 2,5

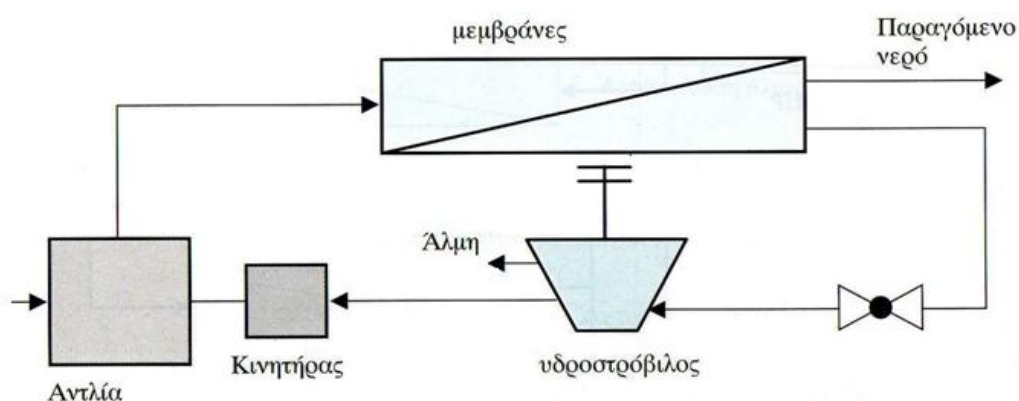
4.2 Εξοικονόμηση ενέργειας στα συστήματα ΑΩ (αναμμήκτες ενέργειας)

Η ενεργειακή κατανάλωση στις μονάδες αφαλάτωσης με την τεχνολογία της αντίστροφης ώσμωσης, μπορεί να μειωθεί σημαντικά προσθέτοντας στο σύστημα μία συσκευή ανάκτησης ενέργειας. Η συσκευή αυτή εκμεταλλεύεται την ενέργεια που εμπεριέχεται στην άλμη επειδή έχει υψηλή πίεση όταν βγαίνει από τις μεμβράνες και μπορεί να μειώσει το μέγεθος της αντλίας υψηλής πίεσης, μειώνοντας τελικά την κατανάλωση ενέργειας της μονάδας αφαλάτωσης. Αν θεωρήσουμε την ειδική κατανάλωση ενέργειας που είναι δαπανώμενη ενέργεια ανά m^3 παραγόμενου νερού, τότε η μείωση της τιμής της τα τελευταία χρόνια έχει προέλθει και από τη χρήση των συστημάτων ανάκτησης ενέργειας (Αυλωνίτης, 2006).

Στη μέθοδο αντίστροφης ώσμωσης, το προς επεξεργασία θαλασσινό νερό εισέρχεται στις μεμβράνες με υψηλή πίεση και από τις μεμβράνες βγαίνει φρέσκο νερό με χαμηλή πίεση και θαλασσινό νερό με υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα (άλμη), με υψηλή πίεση. Η άλμη λόγω της υψηλής πίεσης εμπεριέχει ενέργεια και αν γίνει απόρριψη της άλμης όπως βγαίνει από τις μεμβράνες, τότε η ενέργεια αυτή μένει ανεκμετάλλευτη. Με μια συσκευή ανάκτησης ενέργειας μπορεί να γίνει αξιοποίηση της ενέργειας αυτής. Η συσκευή τοποθετείται πριν τις μεμβράνες στη γραμμή τροφοδοσίας με θαλασσινό νερό (Water Reverse Osmosis Energy Recovery Systems, 2012).

4.2.1 Συμβατικά συστήματα ανάκτησης ενέργειας

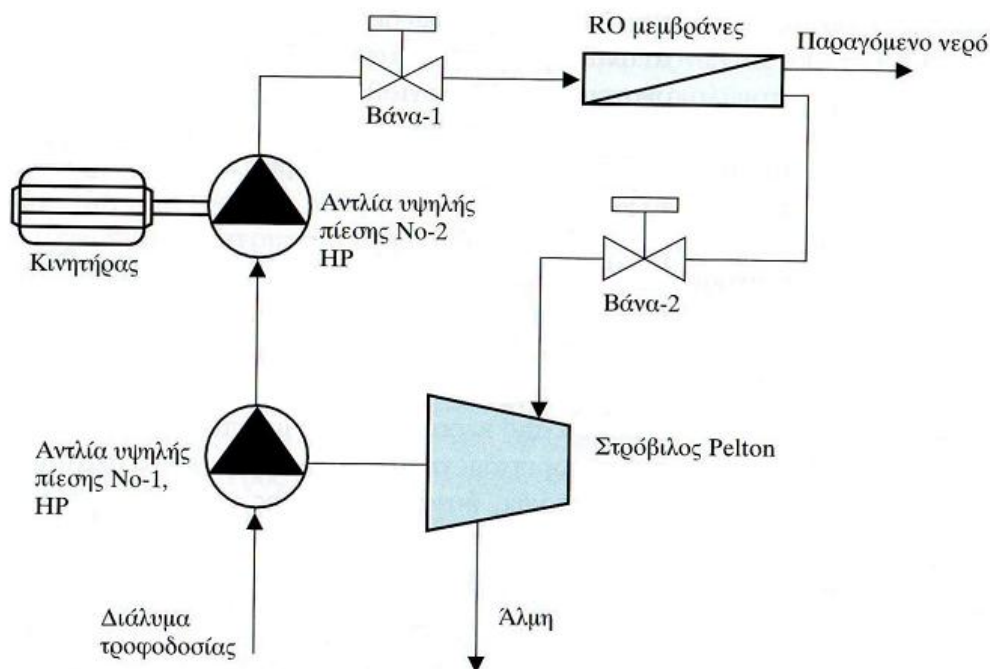
Αποτελούνται από έναν υδροστρόβιλο ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τον κινητήρα της αντλίας υψηλής πίεσης μέσω ιμάντα έτσι ώστε να μειώνεται η δαπάνη ηλεκτρικής ενέργειας. Στην Εικόνα 4.1 φαίνεται σχηματικά η λειτουργία του στρόβιλου ανάκτησης ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο η εξοικονόμηση ενέργειας φτάνει το 40% της δαπανώμενης ενέργειας στην αντλία υψηλής πίεσης (Mohamed, 2009).



Εικόνα 4.1: Συμβατικό σύστημα ανάκτησης ενέργειας. (Πηγή: Mohamed, 2009)

Η εξοικονόμηση ενέργειας οφείλεται στη μείωση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας του κινητήρα της αντλίας υψηλής πίεσης, λόγω μηχανικής βοήθειάς του από το στρόβιλο. Η ασκούμενη υψηλή πίεση ελέγχεται από τη βάννα που υπάρχει στην άλμη. Κλείσιμο της βάννας αυξάνει την ασκούμενη πίεση αλλά και το λόγο ανάκτησης, παράμετροι που στο συγκεκριμένο σχεδιασμό είναι αλληλένδετες. Η εταιρεία Grundfos έχει σχεδιάσει σύστημα δημιουργίας υψηλής πίεσης για μονάδες αφαλάτωσης, στο οποίο χρησιμοποιούνται περιστροφική πολυβάθμια αντλία και στρόβιλος Pelton, ο οποίος κινεί μία άλλη πολυβάθμια αντλία σε σειρά με την πρώτη (Εικόνα 4.2).

Σε αυτή την περίπτωση η εξοικονόμηση ενέργειας προέρχεται από το γεγονός της χρήσης μίας μόνο αντλίας που κινείται με ηλεκτρική ενέργεια και η οποία δεν αποδίδει την απαιτούμενη πίεση αλλά μέρος αυτής. Η υπόλοιπη απαιτούμενη πίεση παράγεται από το στρόβιλο. Για την αύξηση της ασκούμενης πίεσης θα πρέπει να ανοίξει η βάννα 2. Αυτό σημαίνει ότι αύξηση της ασκούμενης πίεσης επιτυγχάνεται με τη μείωση του ποσοστού ανάκτησης (Mohamed, 2009).



Εικόνα 4.2: Σύστημα υψηλής πίεσης με ανάκτηση ενέργειας της Grundfos. (Πηγή: Mohamed, 2009)

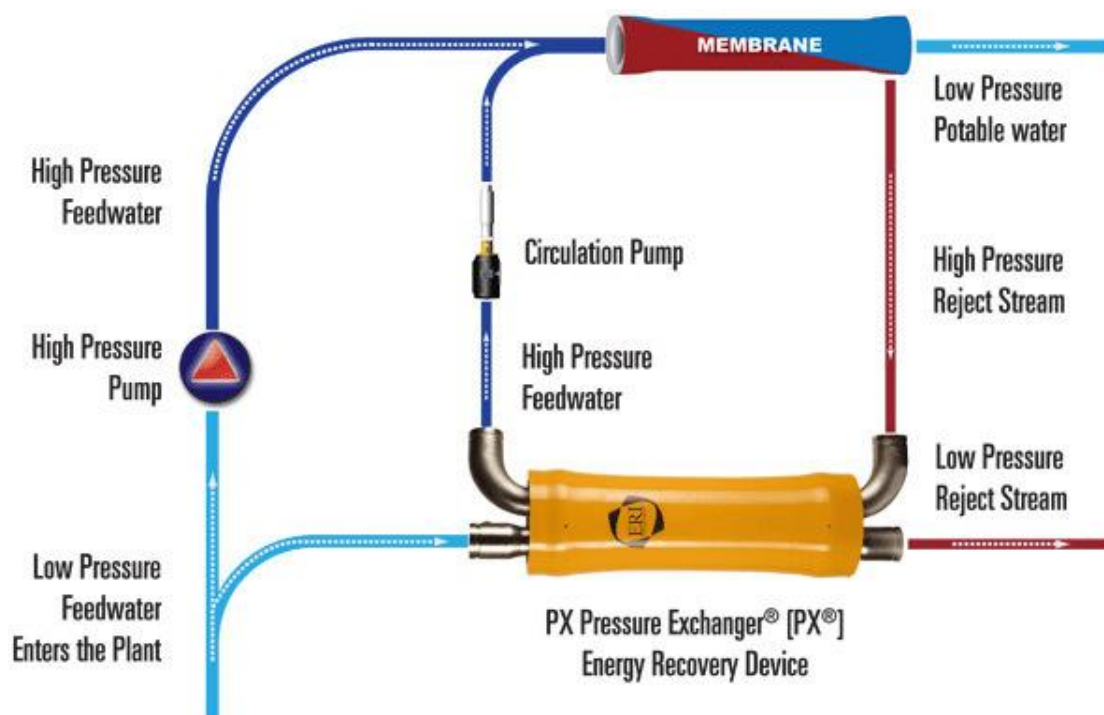
4.2.2 Νέες τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας

Η ανάγκη μείωσης ακόμη περισσότερο της δαπάνης ενέργειας για αφαλάτωση έχει οδηγήσει στην εφαρμογή καινοτόμων συστημάτων ανάκτησης ενέργειας. Τα συστήματα αυτά οδηγούν σε ακόμη μεγαλύτερο ποσοστό ανάκτησης ενέργειας και η απόσβεση της δαπάνης τους μπορεί να επιτευχθεί ακόμη και σε ένα χρόνο λειτουργίας. Η επιλογή συνεπώς του συστήματος ανάκτησης ενέργειας που θα εφαρμοσθεί θα πρέπει να εξετασθεί κατά περίπτωση. Γενικώς τέτοια συστήματα ανάκτησης εφαρμόζονται για μονάδες αφαλάτωσης δυναμικότητας μεγαλύτερης των 100m³/day.

4.2.2.1 Εναλλάκτης πίεσης (Pressure Exchanger PX)

Ένα από τα νέα συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας είναι ο εναλλάκτης πίεσης (Pressure Exchanger PX) (MacHarg, 2002). Η συσκευή τοποθετείται πριν τις μεμβράνες, στη γραμμή τροφοδοσίας των μεμβρανών με θαλασσινό νερό και χρησιμοποιεί την αρχή της θετικής μετατόπισης για τη μεταφορά ενέργειας από την απορριπτόμενη άλμη υψηλής πίεσης στο εισερχόμενο θαλασσινό νερό χαμηλής πίεσης (Water Reverse Osmosis Energy Recovery Systems, 2012).

Από τη συσκευή PX το υπό πίεση θαλασσινό νερό ενώνεται με αυτό που προέρχεται από την αντλία υψηλής πίεσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3 και οδηγείται στη μονάδα επεξεργασίας του νερού. Αυτή η διαδικασία μειώνει σημαντικά την ποσότητα του νερού που περνά από την αντλία υψηλής πίεσης. Η ανάκτηση ενέργειας φτάνει σε ποσοστό το 94%. Πειραματικά δεδομένα συνηγορούν ότι η ειδική κατανάλωση ενέργειας σε αυτή την περίπτωση μπορεί να φτάσει τα $2,4 \text{ kWh/m}^3$ (MacHarg, 2001).



Εικόνα 4.3: Συσκευή ανάκτησης ενέργειας PX σε μονάδα αντίστροφης ώσμωσης.
(Πηγή: Water reverse osmosis energy recovery systems, 2012)

4.2.2.2 Αντλίες APP

Άλλα συστήματα που η λειτουργία τους βασίζεται στη θετική εκτόπιση είναι οι αντλίες APP της Danfoss (Danfoss, 2012), οι οποίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.4. Η τεχνολογία αυτή είναι βασισμένη στην αρχή των αξονικών εμβόλων και εξασφαλίζει ελαφριά και στιβαρή κατασκευή. Προκειμένου να επιτευχθεί σύστημα ανάκτησης με τις αντλίες αυτές, δύο αντλίες πρέπει να συνδεθούν ομοαξονικά. Η μία εξ αυτών λειτουργεί αντίστροφα, ως στρόβιλος, εκμεταλλευόμενη την απορριπτόμενη ενέργεια της άλμης και παρέχοντας το αντίστοιχο μηχανικό έργο στην αντλία υψηλής πίεσης.



Εικόνα 4.4: Αντλίες APP της Danfoss. (Πηγή: Danfoss, 2012)

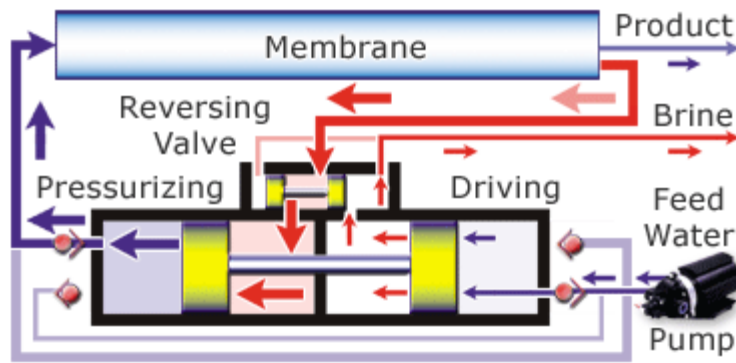
4.2.2.3 Clark Pump

Σε πολύ μικρότερα συστήματα αφαλάτωσης ΑΩ, χρησιμοποιούνται συστήματα ανάκτησης που η λειτουργία τους βασίζεται στην αρχή της παλινδρόμηση των εμβόλων που προκαλεί η πίεση της άλμης. Τέτοιο σύστημα είναι η Clark Pump, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.5 (Spectra water makers, 2012).



Εικόνα 4.5: Η αντλία Clark. (Πηγή: Spectra water makers, 2012)

Στην Εικόνα 4.6 φαίνεται η λειτουργία της αντλίας. Μια μικρή βοηθητική αντλία τροφοδοτεί με νερό υπό πίεση έναν από τους κυλίνδρους και αναγκάζει το έμβολο να κινηθεί. Καθώς κινείται το έμβολο, πιέζει την άλμη που υπάρχει στην άλλη πλευρά του κυλίνδρου και την αναγκάζει να βγει (τελικά απορριπτόμενη άλμη). Ο δεύτερος κύλινδρος, μετατοπίζεται με την κίνηση του κυρίως εμβόλου και επιτρέπει στο πρώτο τμήμα του να εισέλθει η απορριπτόμενη άλμη υψηλής πίεσης από τις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης. Η υψηλή πίεση της άλμης κινεί το κυρίως έμβολο και αναγκάζει το θαλασσινό νερό που βρίσκεται στην άλλη πλευρά του κυλίνδρου να οδηγηθεί στις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης με υψηλή πίεση. Όταν το έμβολο φτάσει στην άκρη του κυλίνδρου, η διαδικασία αντιστρέφεται. Ουσιαστικά γίνεται μεταφορά της ενέργειας που περιέχει η απορριπτόμενη άλμη λόγω της υψηλής της πίεσης, στο θαλασσινό νερό που έχει χαμηλή πίεση.



Εικόνα 4.6: Λειτουργία αντλίας Clark. (Πηγή: EcoHydro solutions, 2012)

4.3 Αποθήκευση ενέργειας

Τα συστήματα αφαλάτωσης είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν με σταθερή ισχύ. Όταν αναγκάζονται να λειτουργήσουν με απρόβλεπτη και μη σταθερή ισχύ, τότε η μονάδα αφαλάτωσης λειτουργεί σε μη ιδανικές συνθήκες προκαλώντας λειτουργικά προβλήματα, διαφορετικά σε κάθε μέθοδο αφαλάτωσης.

Η ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που τροφοδοτεί ενεργειακά την εγκατάσταση αφαλάτωσης, μπορεί να λειτουργεί με δύο τρόπους:

- Συνδεδεμένη με το ηλεκτρικό δίκτυο
- Εκτός δικτύου (standalone – αυτόνομο σύστημα).

Εάν υπάρχει διαθέσιμο τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο, η ΑΠΕ συνδέεται με αυτό και η μονάδα αφαλάτωσης μπορεί να λειτουργεί συνεχώς σαν μια συμβατική μονάδα, με την ανανεώσιμη πηγή ενέργειας απλώς να λειτουργεί ως υποκατάστατο καύσιμο.

Όταν δεν υπάρχει διαθέσιμο ηλεκτρικό δίκτυο, τότε σχεδιάζεται αυτόνομο σύστημα, το οποίο πρέπει να αντιμετωπίσει τη μεταβλητή ισχύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας όπως είναι οι συσσωρευτές (Εικόνα 4.7) που μπορεί να του παρέχει σταθερή ισχύ και να του εξασφαλίζει τη συνεχή λειτουργία (Miranda et al., 2002).

Η κάθε μέθοδος παρουσιάζει διαφορετικά προβλήματα ανάλογα με το πόσο ευαίσθητη είναι. Μια μονάδα αντίστροφης ώσμωσης όταν λειτουργεί χωρίς σταθερή ισχύ, έχει προβλήματα με την ευαισθησία των μεμβρανών και εμφανίζονται στη λειτουργία της απρόβλεπτα φαινόμενα που οφείλονται σε κύκλους (start-stop) και τη λειτουργία της μονάδας υπό μερικό φορτίο. Μια μονάδα συμπίεσης ατμών έχει σημαντική θερμική αδράνεια και απαιτεί πολλή ενέργεια για να μπορέσει να φτάσει ξανά, στο σημείο της ονομαστικής της λειτουργίας.



Εικόνα 4.7: Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με συσσωρευτές. (Πηγή: Παπαδάκης, 2009)

Η εγκατάσταση συσσωρευτών σε μια εφαρμογή, έχει σημαντικά μειονεκτήματα καθώς αυξάνουν το κόστος, απαιτούν αντικατάσταση μετά από κάποια χρόνια και επιπλέον επιβαρύνουν το περιβάλλον. Έχουν γίνει προσπάθειες για την αποφυγή της χρήσης τους και την απευθείας σύνδεση της μονάδας αφαλάτωσης με την ΑΠΕ, όμως τα συστήματα που αναπτύχθηκαν και λειτούργησαν χωρίς συσσωρευτές ακόμη εξετάζονται ως προς την επίδοση και τη βιωσιμότητά τους.

Το χαμηλό ετήσιο κόστος αποθήκευσης πόσιμου νερού σε δεξαμενή (1%), συγκρινόμενο με το κόστος αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές (12%) αποδεικνύει ότι είναι πιο συμφέρον οικονομικά να αποθηκεύεις πόσιμο νερό παρά ηλεκτρική ενέργεια (Mohamed and Papadakis, 2003). Η κατασκευή μεγαλύτερης δεξαμενής πόσιμου νερού μπορεί να καλύπτει την κατανάλωση, όταν η μονάδα αφαλάτωσης δεν παράγει ενέργεια. Το σύστημα αποθήκευσης σ' αυτή την περίπτωση είναι μικρότερου μεγέθους, συγχρόνως όμως πρέπει το μέγεθος των μπαταριών να είναι κατάλληλο ώστε να παρέχει σταθερές συνθήκες λειτουργίας (παροχή και πίεση) στη μονάδα αντίστροφης ώσμωσης και τη συντήρηση των μεμβρανών σε περιόδους μηδενικής παραγωγής ενέργειας από την ΑΠΕ. Επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί μικρότερο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, εάν υπάρχει δεξαμενή νερού που μπορεί να καλύψει τις ανάγκες σε περιόδους που ΑΠΕ δεν παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.

Η αποθήκευση δεν είναι πάντα με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας. Στα θερμικά συστήματα μπορεί να γίνει αποθήκευση θερμότητας με τη μορφή ζεστού λαδιού ή ζεστού νερού που αποτελεί ακριβή λύση.

5. ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ

Ένα μεγάλο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται σήμερα σε όλο τον κόσμο, παράγεται στα κεντρικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας όπως τους σταθμούς ορυκτών καυσίμων ή τους πυρηνικούς σταθμούς. Τα συστήματα αυτά είναι συχνά ισχυρά και αξιόπιστα αλλά η αποτελεσματικότητα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή, με αποτέλεσμα να αποβάλλουν μεγάλα ποσά θερμότητας, (Markvart, 2006). Νέες ανανεώσιμες και αποδοτικές πηγές ενέργειας προσφέρουν μια εναλλακτική λύση: την παραγωγή ενέργειας από μικρής κλίμακας συστήματα παραγωγής που έχουν άμεση σχέση με τους καταναλωτές αυτής της ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούμενες από φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες και συσσωρευτές έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε απομακρυσμένες περιοχές τις τελευταίες δεκαετίες για την κάλυψη των αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας στις περιοχές αυτές. Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά ως μικροδίκτυα. Μπορούν να καλύψουν συγκεκριμένες ανάγκες και χρειάζονται ελάχιστη συντήρηση, (Kyriakarakos, et al., 2011).

Ο συνδυασμός φωτοβολταϊκών, ανεμογεννητριών και μικρής χωρητικότητας μπαταριών, αποτελεί ένα μικροδίκτυο που είναι ανεξάρτητο από το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Ο συνδυασμός αυτός έχει ιδιαίτερα οφέλη για απομακρυσμένες, κυρίως περιοχές. Τα μικροδίκτυα θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τους ήδη υπάρχοντες πυρηνικούς σταθμούς και τους σταθμούς καύσης άνθρακα που χρησιμοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας σημαντικά την απαίτηση στην μεταφορά και στην διανομή του δικτύου, (Markvart, 2006).

Το γενικό πρόβλημα των συστημάτων με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ότι δεν μπορεί να συμπέσει πάντα η προσφορά με τη ζήτηση. Δεδομένου ότι η μακροχρόνια αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνήθως ακριβή (οι συσσωρευτές είναι ακριβές, έχουν διάρκεια ζωής περίπου 5 χρόνια, και είναι ευαίσθητες κατά την χρήση τους, διότι περιέχουν τοξικά στοιχεία) τέτοια συστήματα έχουν υψηλές ενεργειακές απώλειες σε ετήσια βάση, (Kyriakarakos, et al., 2011).

5.1 Η έννοια του μικροδικτύου

Το μικροδίκτυο είναι ένα δίκτυο παροχής ηλεκτρικού ρεύματος μικρής κλίμακας που έχει σχεδιαστεί για να παρέχει ενέργεια για μια μικρή κοινότητα. Η "μικρή κοινότητα" μπορεί να είναι ένα τυπικό συγκρότημα κατοικιών, μια απομονωμένη αγροτική περιοχή, μια περιβαλλοντική περιοχή στα προάστια, ένα ακαδημαϊκό ή ένα δημόσιο κτήριο, όπως ένα πανεπιστήμιο ή ένα σχολείο, μια εμπορική περιοχή ή βιομηχανική ζώνη κ.α. Η βασική ιδέα, που διαφοροποιεί αυτήν την προσέγγιση από ένα συμβατικό δίκτυο ηλεκτροδότησης, είναι ότι η ενέργεια καταναλώνεται στην περιοχή όπου παράγεται, (Markvart, 2006).

Τα μικροδίκτυα μπορούν να λειτουργήσουν είτε αυτόνομα είτε διασυνδεδεμένα στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης. Στα μικροδίκτυα οι διάφορες ενεργειακές πηγές και συσκευές αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να διανεμηθούν σε οποιαδήποτε θέση που καλύπτεται από το δίκτυο. Προσφέρουν μεγαλύτερη αξιοπιστία από τα συμπαγή συστήματα, δεδομένου ότι μπορούν να λειτουργούν σε χαμηλότερα επίπεδα ενέργειας, εάν υπάρχει μια αποτυχία στην σύνδε-

ση μιας ενεργειακής πηγής, αντί να διακοπεί εντελώς η λειτουργία του. Τα μικροδίκτυα, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται αυτόνομα, απαιτούν έξυπνη διαχείριση και αποτελεσματική σχεδίαση, ώστε να είναι σε θέση να ικανοποιήσουν τις ανάγκες της περιοχής που καλύπτουν, (Kyriakarakos, et al., 2011).

5.2 Τεχνικές και ρυθμιστικές προδιαγραφές μικροδικτύου

Αν και υπάρχουν πολλά παραδείγματα δικτύων που μπορούν να χαρακτηριστούν σαν μικροδίκτυα, υπάρχουν κάποια τεχνικά και ρυθμιστικά θέματα που θα πρέπει να εξετάζονται πριν από την εφαρμογή τους σε ευρύτερη κλίμακα. Τα σημαντικότερα από αυτά αναφέρονται παρακάτω (Markvart, 2006):

- Η ακριβής ενέργεια και το ισοζύγιο ισχύος που παρέχονται μέσα στο μικροδίκτυο, σε χρονικά διαστήματα που κυμαίνονται από κλάσματα δευτερολέπτου μέχρι αρκετά χρόνια. Στα μικρής χρονικής κλίμακας διαστήματα το ισοζύγιο ισχύος συνδέεται με τα θέματα *ελέγχου* και *συχνότητας*. Για μεγαλύτερα διαστήματα θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν η σχέση μεταξύ της παρεχόμενης ενέργειας, της ζήτησης και της αποθήκευσης. Στις περιπτώσεις, που το μικροδίκτυο σχεδιάζεται για αυτόνομη λειτουργία, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιείται ποικιλία συστημάτων παραγωγής, που θα συνδέονται στο φορτίο.
- Η φύση της σύνδεσης με την επιχείρηση παραγωγής (σύνδεση με το δίκτυο). Το μικροδίκτυο μπορεί να υπάρχει ως ένα απομακρυσμένο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής σε περιοχές όπου η τροφοδοσία δεν είναι διαθέσιμη. Μπορεί, από την άλλη πλευρά, να ενσωματωθεί σε μια μεγαλύτερη ηλεκτρική τροφοδοσία, αυτή θα είναι η τυπική κατάσταση, για παράδειγμα, σε χώρες με παρωχημένα συστήματα τροφοδοσίας. Μια ρύθμιση, η οποία θα επέτρεπε στον χειριστή του μικροδικτύου την επιλογή να το λειτουργήσει στην «διασυνδεδεμένη» ή «αυτόνομη» λειτουργία, μπορεί να ήταν συμφέρουσα, για παράδειγμα, στην περίπτωση μιας μεγάλης χρονικά διακοπής ηλεκτροδότησης του δικτύου. Σε άλλες περιπτώσεις ίσως να είναι πιο οικονομική η εισαγωγή ενέργειας, αντί η παραγωγή της, ή το μικροδίκτυο να λειτουργήσει ως γεννήτρια παραγωγής ισχύος στην επιχείρηση παραγωγής ισχύος έτσι ώστε να αυξηθούν τα δημόσια έσοδα. Η ευελιξία και υψηλή ενεργειακή απόδοση του μικροδικτύου θα γίνουν όλο και περισσότερο οικονομικά αντιληπτές εάν η τιμή των ορυκτών καυσίμων παραμένει σε υψηλά επίπεδα ή οι ποινές για τις εκπομπές ρύπων είναι αυξημένες. Σε τεχνικό και ρυθμιστικό επίπεδο όμως, το θέμα αυτό παραμένει άγνωστο στους τεχνικούς των συμβατικών επιχειρήσεων παραγωγής ενέργειας.
- Η αποθήκευση ενέργειας. Η συμβατική πηγή παραγωγής ενέργειας λειτουργεί με βάση την αρχή ότι η ενέργεια παράγεται όταν απαιτείται. Η αποθήκευση ενέργειας εισάγει ένα νέο στοιχείο σε μια τροφοδοσία και διευρύνει τα κριτήρια σχεδιασμού, που συνδέει το μέγεθος της αποθήκης ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο και με την απαιτούμενη ασφάλεια τροφοδοσίας που παρέχεται από το μικροδίκτυο. Οι συσσωρευτές μολύβδου μπορεί να είναι η άμεση λύση για την αποθήκευση ενέργειας, αλλά υπάρχουν και άλλες εναλλακτικές λύσεις όπως οι συσσωρευτές οξειδοαναγωγής, οι σφόνδυλοι και ίσως τελικά το υδρογόνο

μπορεί να είναι διαθέσιμο σε ένα όχι πολύ μακρινό μέλλον. Άλλοι καινοτόμοι τρόποι αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να περιλαμβάνουν οικιακό ζεστό νερό ή τηλεθέρμανση. Το μέγεθος της αποθήκης ενέργειας μπορεί επίσης να μειωθεί με τη διαχείριση της ζήτησης, μειώνοντας τη στιγμιαία ανισοκατανομή μεταξύ παραγωγής και φορτίου.

5.3 Μικροδίκτυο και αφαλάτωση

Σε πολλές περιοχές του κόσμου η έλλειψη πόσιμου νερού είναι ένα συχνό φαινόμενο. Συνήθως τα μέρη τα οποία έχουν σπάνιες πηγές πόσιμου νερού, επίσης αντιμετωπίζουν δυσκολίες στην παροχή ηλεκτροδότησης. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα σε νησιά και σε απομακρυσμένες περιοχές. Συστήματα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση ΑΩ που τροφοδοτούνται από φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις περιοχές αυτές, για την παραγωγή πόσιμου νερού. Τα κύρια πλεονεκτήματα της ΑΩ είναι η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και οι λίγες απαιτήσεις για συντήρηση. Η προσέγγιση αυτή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και σε περιπτώσεις υφάλμυρου νερού, (Kyriakarakos, et al., 2011).

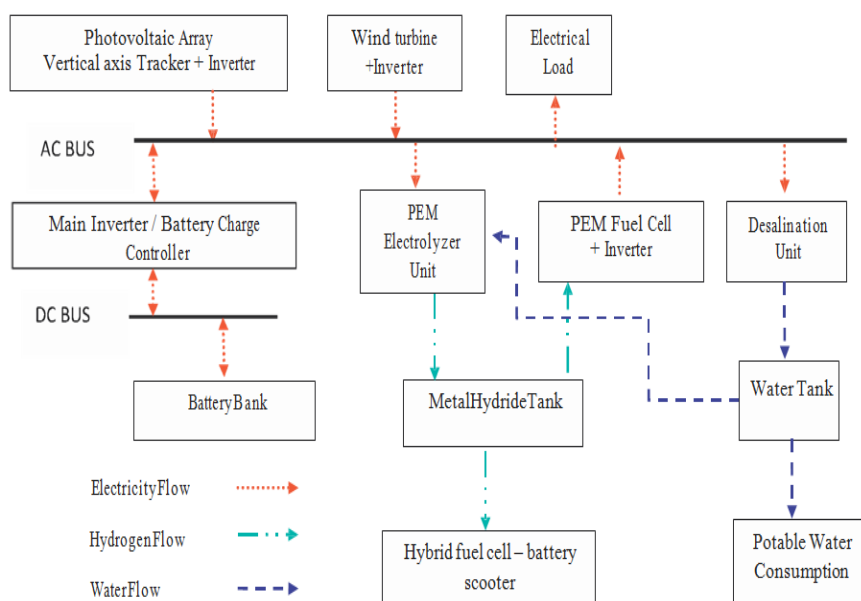
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία, θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν ως προς την δυνατότητα των συνθηκών, ποιότητας παραγομένου νερού και της απόδοσης λειτουργίας μιας μονάδας ΑΩ, με στόχο την σκοπιμότητα ένταξής της σε ένα μικροδίκτυο.

5.3.1 Εφαρμογή μικροδικτύου για τροφοδοσία μονάδας αφαλάτωσης ΑΩ

Σήμερα συναντάμε συνήθως ξεχωριστά συστήματα που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, και ξεχωριστά συστήματα για την παραγωγή νερού. Τα συστήματα συμπαραγωγής και τριπαραγωγής έχουν προταθεί κυρίως για την κάλυψη αναγκών της ηλεκτρικής ενέργειας, της θέρμανσης και της ψύξης, ενώ οι διαδικασίες της πολυπαραγωγής έχουν μελετηθεί για διάφορα συστήματα και προϊόντα. Η ιδέα της επί τόπου παραγωγής καυσίμων για τα συστήματα μεταφοράς είναι σχετικά καινούρια. Με το σχεδιασμό και τη χρήση ενός συστήματος πολυπαραγωγής το οποίο μπορεί να δημιουργήσει περισσότερα από ένα προϊόντα μπορούμε να διαχειριστούμε καλύτερα τις ροές ενέργειας στο σύστημα καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, και επομένως επιτυγχάνουμε μια πολύ υψηλή χρήση της διαθέσιμης ενέργειας του συστήματος μειώνοντας τις απώλειες.

Για την κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια, νερό και καύσιμα για δύο σπίτια σε μία απομακρυσμένη περιοχή σχεδιάστηκε ένα τέτοιο σύστημα όπως αναφέρουν ο Kyriakarakos et al., (2011). Η εφαρμογή μικροδικτύου εναλλασσομένου ρεύματος (AC) που παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.1 προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι:

- Δυνατότητα χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Εύκολη μελλοντική επέκταση του συστήματος.
- Σε περίπτωση που το κεντρικό δίκτυο καταφέρει να φθάσει στο μέλλον το μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργήσει είτε αυτόνομο είτε σε διασύνδεση με το κεντρικό δίκτυο.
- Λόγω της χρήσης συστήματος AC bus, ένα τέτοιο σύστημα μπορεί επίσης να αναπτυχθεί σε μικρά χωριά, με διάσπαρτες κατοικίες καθιστώντας τη χρήση της κατανεμημένης παραγωγής ικανή.



Εικόνα 5.1: Σχηματική παρουσίαση του πολυπαραγωγικού συστήματος

Τα πραγματικά στοιχεία του συστήματος είναι:

- **Φωτοβολταϊκή συστοιχία (Φ/Β):** Μια τυπική συστοιχία φωτοβολταϊκών μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι εγκατεστημένη σε έναν κατακόρυφο άξονα tracker που προσαρμόζεται συνεχώς. Συστήματα άξονα tracker υπάρχουν στην αγορά πολλά χρόνια τώρα, και έχει αποδειχθεί ότι είναι αξιόπιστα και το κόστος τους είναι σήμερα συγκρίσιμο με τα σταθερά συστήματα πλαισίου. Με την χρήση ενός tracker η εγκατεστημένη ισχύς των απαιτούμενων φωτοβολταϊκών γεννητριών του συστήματος μπορεί να μειωθεί, ώστε να έχει μια θετική επίδραση στο κόστος του συστήματος.
- **Ανεμογεννήτριες (ΑΓ):** Μια συνεχούς ρεύματος (ΣΡ) ανεμογεννήτρια.
- **Μονάδα αφαλάτωσης:** Μια εμπορικά διαθέσιμη μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού, σύμφωνα με ένα σύστημα που έχει κατασκευαστεί και δοκιμαστεί εκτενώς στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο της Αθήνας. Η μονάδα είναι εξοπλισμένη με έναν ανακτητή υδραυλικής ενέργειας. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας του συστήματος είναι $6,25 \text{ kWh/m}^3$, (Mohamed and Papadakis, 2004).
- **Κυψέλη καυσίμου:** Μια χαρακτηριστική μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) κυψέλη καυσίμου.
- **Συσκευή ηλεκτρόλυσης:** Μια τυπική συσκευή ηλεκτρόλυσης. Είναι σε θέση να παρέχει υδρογόνο σε υψηλή πίεση (15 bar).
- **Μεταλλική δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου:** Μια τυπική δεξαμενή αποθήκευσης υδριδίου μετάλλου.

- **Όχημα υδρογόνου:** Ένα όχημα (σκούτερ) με υβριδική κυψέλη καυσίμου - συσσωρευτή.
- **Συστοιχία συσσωρευτών:** Ένας τυπικός συσσωρευτής μολύβδου βαθιάς εκφόρτισης. Η συστοιχία είναι συνδεδεμένη στα 48V.
- **Ελεγκτής:** Είναι η συσκευή που είναι υπεύθυνη για τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος. Ελέγχει συνεχώς τις ροές ενέργειας στο σύστημα και αποφασίζει ποιες συσκευές πρέπει να ενεργοποιήσει και ποιες να απενεργοποιήσει.

Ο ελεγκτής που χρησιμοποιείται είναι ένας ON / OFF controller (ελεγκτής) που βασίζεται σε τέσσερα παράλληλα συστήματα ελέγχου:

1. Διπλό σύστημα ελέγχου υστέρησης.
 2. Πρόβλεψη φορτίου.
 3. Ιεράρχηση των καταναλώσεων.
 4. Ασφαλής υποστήριξη στο σύστημα ελέγχου.
- **Μετατροπείς συχνότητας (Inverters):** Εμπορικά διαθέσιμοι μετατροπείς συχνότητας που μπορούν να λειτουργήσουν σε μία εφαρμογή μικροδικτύου για την συστοιχία φωτοβολταϊκών, τις ανεμογεννήτριες και την κυψέλη καυσίμου.

6. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ

6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται τα διάφορα υποσυστήματα που χρησιμοποιούνται στις συμβατικές μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης. Με τον όρο «συμβατικές» εννοούνται μικρές μονάδες αφαλάτωσης ΑΩ, χωρίς συσκευή ανάκτησης ενέργειας, οι οποίες υποστηρίζονται ενεργειακά από συμβατική πηγή ενέργειας (δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ή ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος) (Mohamed et al., 2006).

Συζητούνται αρχικά οι παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία των μεμβρανών, όπως η θερμοκρασία, η πίεση λειτουργίας, η συγκέντρωση αλάτων του νερού τροφοδοσίας, η ανάκτηση του αφαλατωμένου νερού και ο βαθμός pH.

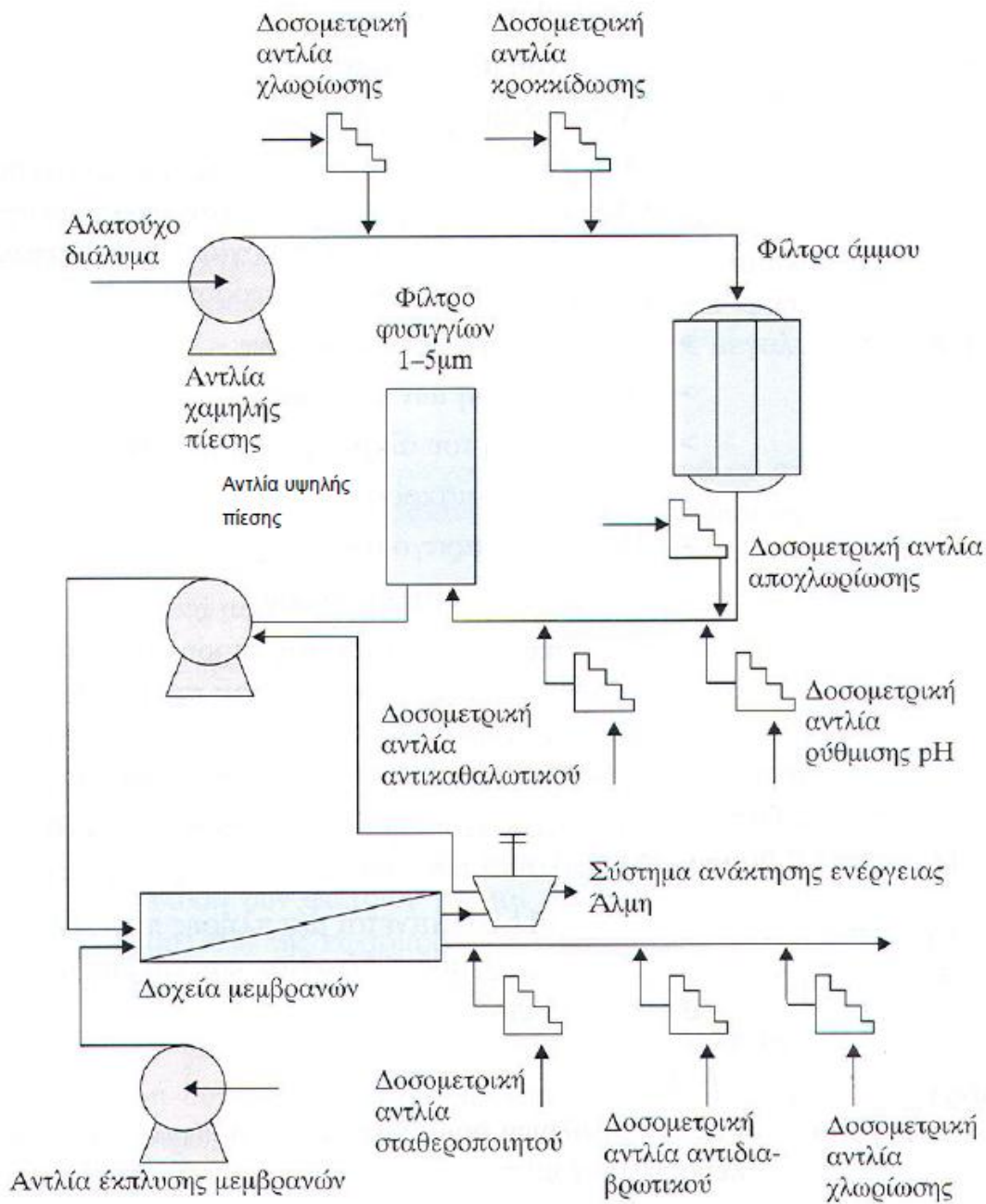
Στη συνέχεια διερευνάται η λειτουργία της αντλίας Clark, η οποία είναι μια αντλία θετικής μετατόπισης που σκοπό έχει την αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας της άλμης.

6.2 Περιγραφή συμβατικών συστημάτων ΑΩ

Ένα σύστημα αφαλάτωσης νερού με αντίστροφη ώσμωση, αποτελείται από τρία κυρίως μέρη:

- Το σύστημα προ-επεξεργασίας του νερού
- Το κυρίως σύστημα της αφαλάτωσης
- Το σύστημα μετ-επεξεργασίας του νερού

Το μονογραμμικό διάγραμμα μιας τυπικής συμβατικής εγκατάστασης αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης φαίνεται στην Εικόνα 6.1 (Αυλωνίτης, 2006).



Εικόνα 6.1: Διάγραμμα συμβατικής μονάδας αφαλάτωσης ΑΩ. (Πηγή: Αυλωνίτης, 2006)

6.2.1 Σύστημα προ-επεξεργασίας

Για να διατηρηθεί η αποδοτικότητα και η διάρκεια ζωής ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης, απαιτείται η προ-επεξεργασία του νερού τροφοδοσίας. Η επιλογή της κατάλληλης προ-επεξεργασίας θα μεγιστοποιήσει την αποδοτικότητα της διεργασίας και την αξιόπιστη λειτουργία των μεμβρανών, μειώνοντας τις επικαθίσεις αλάτων, καθώς και τη μόλυνση και την αποικοδόμηση των μεμβρανών (Mohamed, 2009).

Το σύστημα προ-επεξεργασίας θα πρέπει να εξετάζεται τόσο από χημικής απόψεως (είδος χημικών σε κάθε στάδιο), όσο και από υδροδυναμικής απόψεως (πίεση και παροχή δοσομετρικών αντλιών) έτσι ώστε να αποφεύγεται η ανεπαρκής προ-επεξεργασία και το υψηλό κόστος λειτουργίας. Κάθε κατάλληλο σύστημα προ-κατεργασίας προϋποθέτει στοιχεία που αφορούν την κατασκευή των μεμβρανών, διαμόρφωση των μεμβρανών, προέλευση του νερού τροφοδοσίας, τη χημική και μακροσκοπική σύσταση του νερού τροφοδοσίας (δείκτης πυκνότητας λάσπης – SiltDensityIndex, SDI), την ποιότητα αφαλατωμένου νερού και το ποσοστό ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού.

Το σύστημα προ-επεξεργασίας περιλαμβάνει τα εξής στάδια (Mohamed, 2009):

Χλωρίωση: Για την πρόληψη δημιουργίας επιστρώματος μόλυνσης οργανικής κυρίως προέλευσης το νερό προς αφαλάτωση χλωριώνεται, είτε με αέριο χλώριο, είτε συνήθως με υποχλωριώδες νάτριο ή, λιγότερο συχνά, με υποχλωριώδες ασβέστιο. Η χλωρίωση γίνεται με δοσομετρικές αντλίες συνεχώς ώστε στο νερό τροφοδοσίας η συγκέντρωση σε ενεργό χλώριο να φτάνει μέχρι 10 ppm.

Θρόμβωση – Κροκίδωση: Για χρησιμοποιούμενο νερό με υψηλό ποσοστό αιωρούμενων στερεών, χρησιμοποιούνται ουσίες που προκαλούν τη συσσωμάτωση των αιωρούμενων στερεών και τελικά τον διαχωρισμό τους από το νερό προς επεξεργασία σε επόμενο στάδιο. Τα συσσωματώματα ή γενικώς τα αιωρούμενα στερεά διέρχονται από δύο είδη φίλτρων. Τα φίλτρα άμμου, που περιλαμβάνουν στρώσεις από αδρανή υλικά διαφορετικού μεγέθους και από τα φίλτρα φυσιγγίων όπου συγκρατούνται όλα τα αιωρούμενα στερεά μεγέθους μεγαλύτερου των 1-5 μm.

Πολυστρωματικά φίλτρα: Τα πολυστρωματικά φίλτρα περιέχουν αδρανή υλικά σε στρώματα, και λειτουργούν ως φίλτρα. Περιλαμβάνουν στρώσεις διαφόρων μεγεθών από τον πυθμένα προς τα επάνω χαλαζιακά μικρά χαλίκια, αδρανή πυριτική άμμο και ανθρακίτη.

Η πυκνότητα αυτών των υλικών είναι τέτοια ώστε διατηρείται η διαστρωμάτωσή τους ακόμα και σε ισχυρές αναδεύσεις λόγω μεγάλης ταχύτητας του διερχόμενου θαλασσινού νερού.

Ο καθαρισμός του νερού επιτυγχάνεται με δύο τρόπους: 1) Με τη μη δυνατότητα των αιωρούμενων σωματιδίων να διαπεράσουν το ανώτατο στρώμα λόγω μεγέθους και 2) με την καθίζησή τους λόγω βάρους στα κατώτερα στρώματα. Τα φίλτρα περιλαμβάνουν τις κατάλληλες σωληνώσεις και βάνες ώστε να είναι δυνατή η έκπλυσή τους.

Αποχλωρίωση: Το υπολειπόμενο χλώριο που έχει χρησιμοποιηθεί είναι καταστροφικό για το υλικό των μεμβρανών. Έτσι θα πρέπει να υπάρχει στάδιο αποχλωρίωσης. Με δοσομετρική αντλία τροφοδοτείται το νερό με αναγωγικά μέσα κατάλληλης δοσολογίας ώστε να μην υπάρχει καμία περίπτωση να παραμείνει χλώριο στο διάλυμα. Η αποχλωρίωση μπορεί να γίνει και με φίλτρα ενεργού άνθρακα. Τα φίλτρα αυτά συγκρατούν επίσης αιωρούμενη οργανική ύλη και χλωραμίνες.

Ρύθμιση pH: Για την αποφυγή επικαθίσεων αλάτων χρησιμοποιούμε οξέα για τη μείωση του pH του διαλύματος. Τα οξέα που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι το υδροχλωρικό και το θειικό οξύ. Η δοσολογία τους καθορίζεται από τη σύσταση του κατεργαζόμενου νερού.

Προσθήκη αντικαθαλωτικού: Η παρεμπόδιση των επικαθίσεων αλάτων μπορεί να γίνει και με την προσθήκη ειδικών αντικαθαλωτικών ουσιών που παρεμποδίζουν την επικάθιση αλάτων. Απαιτούνται μικρές ποσότητες αντικαθαλωτικού. Η δράση τους οφείλεται στο γεγονός ότι

προσροφούνται επιφανειακά στο αρχικό στάδιο σχηματισμού των αλάτων, έτσι ώστε δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη των κρυστάλλων και συνεπώς το σχηματισμό επικαθίσεων αλάτων.

Φίλτρο φυσιγγίων: Για την ολοκλήρωση της προ-κατεργασίας, το νερό τροφοδοσίας διέρχεται από τα φίλτρα φυσιγγίων. Ο αριθμός και οι διαστάσεις των φυσιγγίων που χρησιμοποιούνται εξαρτάται από την παροχή της θάλασσας. Γενικά χρησιμοποιούνται φίλτρα από πολυμερές υλικό. Το δοχείο στο οποίο τοποθετούνται τα φυσιγγία θα πρέπει να είναι από ανοξειδωτο υλικό ή κατάλληλο πολυμερές ή χάλυβα επενδυμένο εσωτερικά με κατάλληλη επίστρωση ανθεκτική στη διάβρωση.

6.2.2 Το κυρίως σύστημα αφαλάτωσης ΑΩ

Το κυρίως σύστημα αφαλάτωσης περιλαμβάνει τα εξής τμήματα (Mohamed, 2009):

Αντλία χαμηλής πίεσης ή τροφοδοσίας: Η αντλία χαμηλής πίεσης είναι συνήθως φυγόκεντρη ή περιστροφική αντλία κατάλληλης ισχύος για την τροφοδοσία των φίλτρων και της αντλίας υψηλής πίεσης. Είναι κατασκευασμένη από υλικό ανθεκτικό στη διάβρωση. Λαμβάνει το νερό τροφοδοσίας, απευθείας από την πηγή τροφοδοσίας ή από δεξαμενή εξισορρόπησης. Γενικά εγκαθίστανται δύο παράλληλες αντλίες τροφοδοσίας, μία σε λειτουργία και μία εφεδρική.

Αντλία υψηλής πίεσης: Η αντλία υψηλής πίεσης είναι εμβολοφόρα αντλία με τρία ή περισσότερα έμβολα, κατασκευασμένα από ανοξειδωτο χάλυβα και ειδικό κεραμικό υλικό για μείωση του βάρους της. Χρησιμοποιούνται επίσης και πολυβάθμιες περιστροφικές αντλίες από κατάλληλο υλικό. Το νερό τροφοδοσίας εξερχόμενο από την αντλία υψηλής πίεσης διοχετεύεται στα στοιχεία αντίστροφης ώσμωσης που βρίσκονται στα δοχεία πίεσης.

Στοιχεία αντίστροφης ώσμωσης: Αποτελούνται από ειδικά δοχεία πίεσης εντός των οποίων τοποθετούνται σε σειρά 1-7 στοιχεία μεμβρανών. Ο έλεγχος της ποιότητας παραγωγής κάθε μεμβράνης γίνεται με ειδικό σωλήνα που τοποθετείται εσωτερικά των μεμβρανών στο σωλήνα παραγόμενου νερού.

Κάθε σύστημα αφαλάτωσης μπορεί να περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα στοιχεία αντίστροφης ώσμωσης (μεμβρανοθήκη και στοιχεία μεμβρανών) διαταγμένα παράλληλα σχηματίζοντας μία ή περισσότερες συστοιχίες. Το νερό τροφοδοσίας εισέρχεται σε κάθε στοιχείο αντίστροφης ώσμωσης από το ένα άκρο, ενώ από το άλλο άκρο εξέρχονται το αφαλατωμένο νερό και η άλμη. Εάν είναι επιθυμητή μεγαλύτερη ανάκτηση αφαλατωμένου νερού, η άλμη μπορεί να ανακυκλώνεται ή να χρησιμοποιηθεί δεύτερο πέρασμα σε άλλη συστοιχία μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης. Η πίεση λειτουργίας μπορεί να καθορίζεται από βάνα στραγγαλισμού που τοποθετείται στην έξοδο της γραμμής της άλμης. Οι μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης θεωρούνται η καρδιά της μονάδας αφαλάτωσης, όπου όλα τα άλλα υποσυστήματα έχουν σκοπό ότι η μεμβράνη ΑΩ να λειτουργεί σε βέλτιστες συνθήκες (πίεσης, αλμυρότητας και ροής).

Τα δοχεία πίεσης είναι κατασκευασμένα έτσι, ώστε να αντέχουν σε υψηλές πιέσεις, εφόσον το διάλυμα τροφοδοσίας είναι θαλασσινό, και φέρουν ειδικές πλάκες στα άκρα του με τα κατάλληλα εξαρτήματα ώστε να είναι δυνατή η συναρμολόγησή τους χωρίς να υπάρχουν διαρροές θάλασσας ή παραγόμενου νερού στο περιβάλλον, αλλά και να διασφαλίζουν τη στεγανότητα μεταξύ της θάλασσας και του παραγόμενου νερού.

6.2.3 Σύστημα μετ-επεξεργασίας

Το αφαλατωμένο νερό της αφαλάτωσης παρουσιάζει γενικά πολύ μικρή σκληρότητα και σχετικά χαμηλό pH. Έτσι, πριν διατεθεί στην κατανάλωση θα πρέπει να προστεθούν κάποια χημικά που θα το κάνουν κατάλληλο για κατανάλωση. Ακόμα, το αφαλατωμένο νερό, στη μορφή που παράγεται παρουσιάζει ισχυρά διαβρωτικές ιδιότητες. Έτσι είναι ιδιαίτερα επιθετικό σε σωληνώσεις που αποτελούνται από απλό, γαλβανισμένο ή ακόμα και ανοξείδωτο χάλυβα. Το σύστημα μετ-επεξεργασίας περιλαμβάνει τα εξής στάδια (Mohamed, 2009):

Ρύθμιση pH: Το pH αυξάνεται, με προσθήκη υδροξειδίου του νατρίου ή όξινου ανθρακικού νατρίου. Η δοσολογία ρυθμίζεται ανάλογα με το pH του παραγόμενου νερού και την επιθυμητή τιμή. Για να μειωθούν οι διαβρωτικές ιδιότητες του αφαλατωμένου νερού, προστίθεται αντιδιαβρωτικό όπως είναι διάφορες πολυφωσφωρικές ενώσεις.

Ρύθμιση σκληρότητας: Η αύξηση της σκληρότητας μπορεί να γίνει με προσθήκη μέσω δοσομετρικής αντλίας CaCl_2 και MgCl_2 ή διαβίβαση του νερού μέσα από ειδικές στήλες που περιέχουν άλατα μαγνησίου και ασβεστίου. Η δεύτερη λύση κρίνεται πλέον ικανοποιητική διότι με την αύξηση της σκληρότητας δεν αυξάνεται η συγκέντρωση ιόντων χλωρίου.

Χλωρίωση: Η χλωρίωση του νερού γίνεται με διάλυμα υποχλωριώδους νατρίου, σύμφωνα με τις ισχύουσες διατάξεις για το πόσιμο νερό. Το υπολειπόμενο χλώριο στο πόσιμο νερό δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 0,2 ppm.

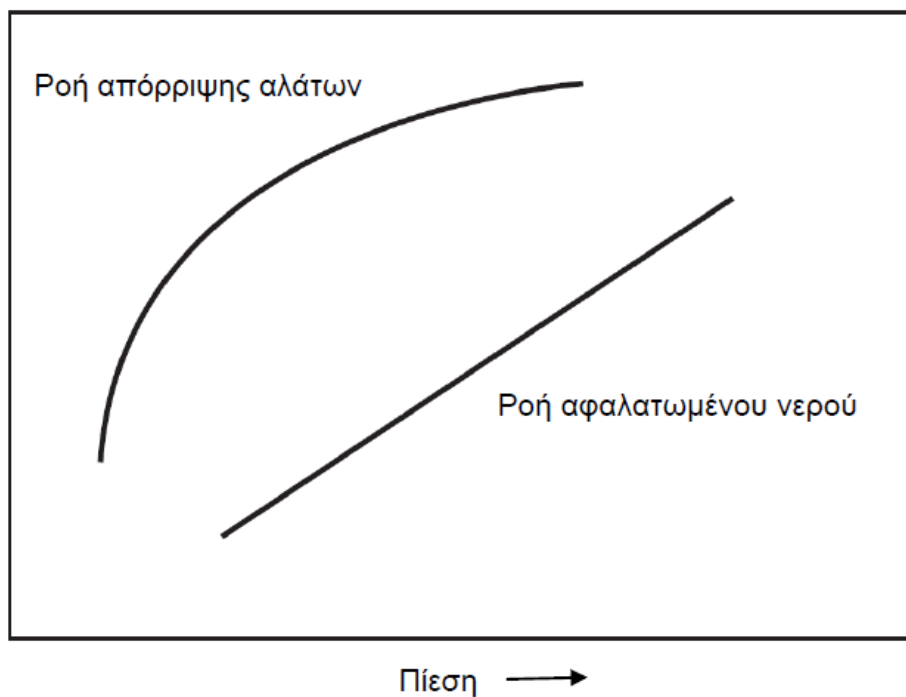
6.3 Παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία των μεμβρανών

Οι παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν τη λειτουργία των μεμβρανών είναι η πίεση λειτουργίας, η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας, η συγκέντρωση των αλάτων στο νερό τροφοδοσίας, και η ανάκτηση αφαλατωμένου νερού.

6.3.1 Επίδραση της πίεσης

Η πίεση στην είσοδο της μεμβράνης επηρεάζει τη ροή του αφαλατωμένου νερού και την απόρριψη των αλάτων. Με τον όρο πίεση εννοείται η δρούσα δύναμη που ασκείται στη μεμβράνη, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της ασκούμενης πίεσης και της ωμσωτικής πίεσης (Mohamed, 2009).

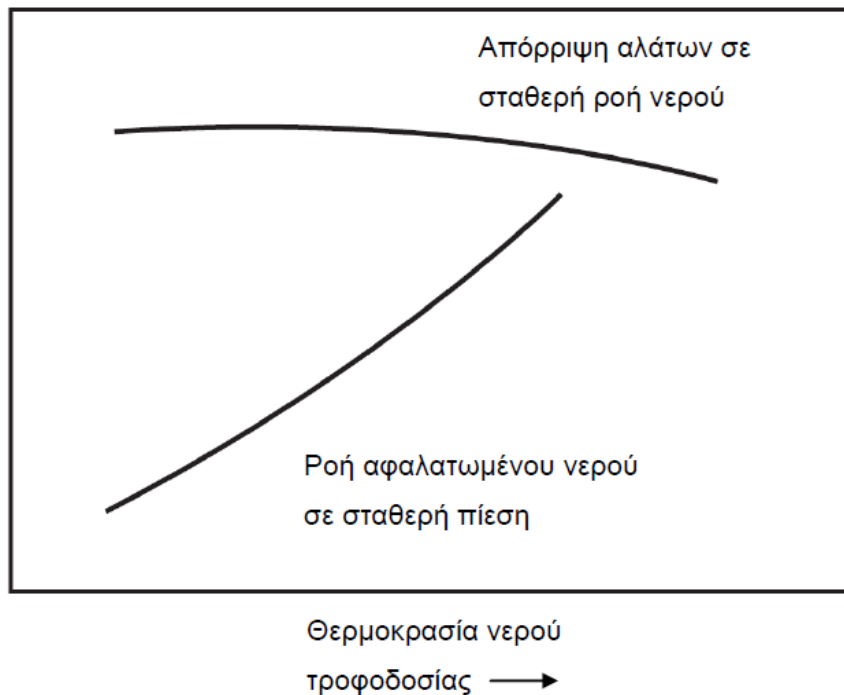
Στην Εικόνα 6.2 φαίνεται ότι η επίδραση της ασκούμενης πίεσης είναι γραμμική για τη ροή του αφαλατωμένου νερού. Επίσης στην Εικόνα 6.2 η αύξηση της ασκούμενης πίεσης αυξάνει την απόρριψη των αλάτων.



Εικόνα 6.2: Επίδραση της ασκούμενης πίεσης της μεμβράνης στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη των αλάτων. (Πηγή: DOW, 2012)

6.3.2 Επίδραση της θερμοκρασίας

Η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας αυξάνει τη ροή του αφαλατωμένου νερού κυρίως λόγω της μείωσης της πυκνότητας του νερού. Η αύξηση θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας μειώνει την απόρριψη των αλάτων άρα αυξάνει τη συγκέντρωση των αλάτων στο αφαλατωμένο νερό (Εικόνα 6.3).



Εικόνα 6.3: Επίδραση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη των αλάτων. (Πηγή: DOW, 2012)

6.3.3 Επίδραση της συγκέντρωσης των αλάτων του νερού τροφοδοσίας

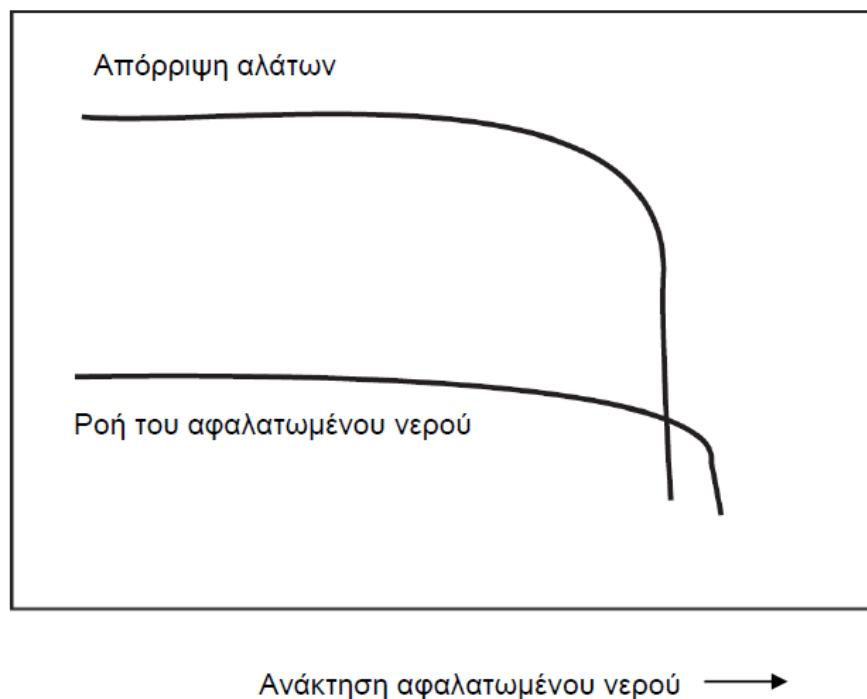
Η αύξηση της συγκέντρωσης των αλάτων στο νερό τροφοδοσίας αυξάνει την ωσμωτική πίεση του νερού τροφοδοσίας. Ταυτόχρονα, η αύξηση της ωσμωτικής πίεσης του νερού μειώνει την τελική ασκούμενη πίεση στη μεμβράνη. Όταν όμως σταθεροποιείται η πίεση εισόδου, η αύξηση της συγκέντρωσης των αλάτων μειώνει τη ροή του αφαλατωμένου νερού και μειώνει και την απόρριψη των αλάτων (Εικόνα 6.4).



Εικόνα 6.4: Επίδραση της συγκέντρωσης των αλάτων στο νερό τροφοδοσίας στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη των αλάτων. (Πηγή: DOW, 2012)

6.3.4 Επίδραση του βαθμού ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού

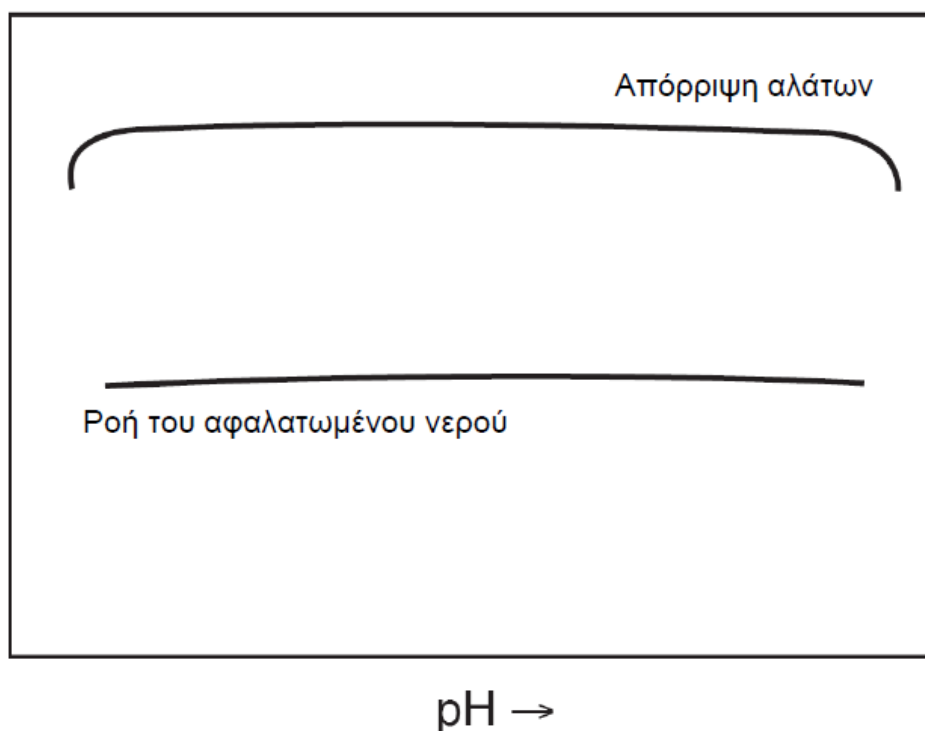
Η αύξηση του βαθμού ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού σε συνθήκες σταθερής πίεσης αυξάνει την ωσμωτική πίεση του νερού τροφοδοσίας. Η αύξηση της ωσμωτικής πίεσης αυξάνει την πιθανότητα δημιουργίας ανθρακικών επικαθίσεων (Scaling). Η συσσώρευση ανθρακικών επικαθίσεων εμποδίζει τη διέλευση του αφαλατωμένου νερού και μειώνει την απορριπτική ικανότητα της μεμβράνης, αυξάνοντας ταυτόχρονα την κατανάλωση ενέργειας από τη μεμβράνη. Η ανεξέλεγκτη όμως αύξηση μπορεί να σταματήσει τη διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης όπως αυτό φαίνεται στην Εικόνα 6.5 (Mohamed, 2009).



Εικόνα 6.5: Επίδραση του βαθμού ανάκτησης στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη των αλάτων. (Πηγή: DOW, 2012)

6.3.5 Επίδραση pH

Οι μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης έχουν μεγάλο εύρος λειτουργίας pH. Οι μεμβράνες οξικής κυτταρίνης, CA έχουν εύρος λειτουργίας pH 4 - 8, ενώ αντέχουν ένα εύρος 3 - 9. Οι μεμβράνες λεπτού υμένα έχουν εύρος λειτουργίας 2 - 11 ενώ αντέχουν εύρος 1 - 12. Το pH δεν επηρεάζει τη ροή του αφαλατωμένου νερού, τιμές όμως του pH που βρίσκονται εκτός των ορίων αντοχής της μεμβράνης, μπορεί να έχουν ως συνέπεια την καταστροφή του πολυμερούς υλικού της (Εικόνα 6.6) (Mohamed, 2009).



Εικόνα 6.6: Επίδραση του PH στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη των αλάτων.
(Πηγή: DOW, 2012)

6.4 Θεωρητική περιγραφή του ανακτητή υδραυλικής ενέργειας

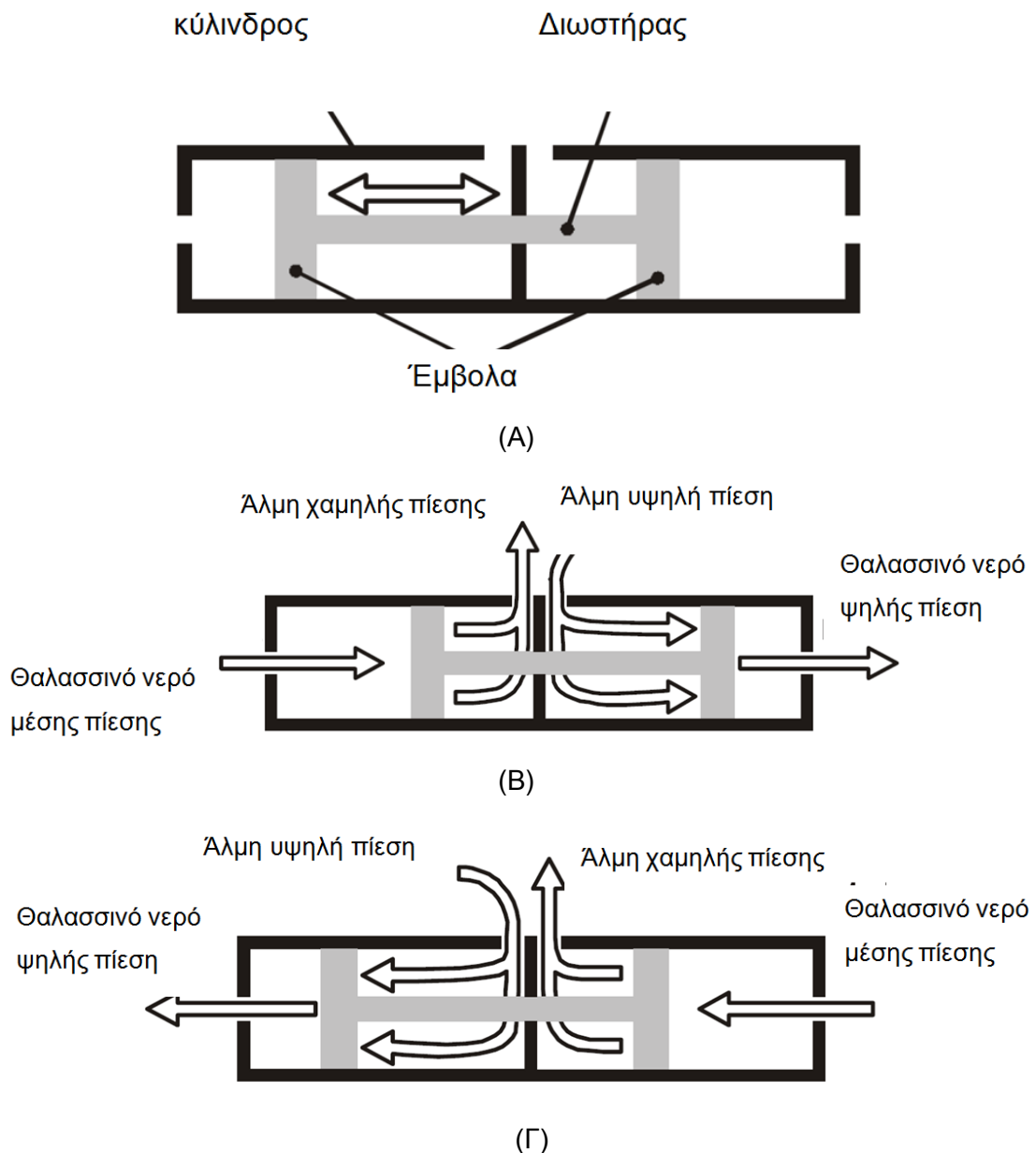
Η αντλία Clark είναι μια υδραυλική αντλία θετικής μετατόπισης που ανακτά μεγάλο μέρος της απορριπτόμενης υδραυλικής ενέργειας της άλμης, προσθέτοντάς την στο διερχόμενο νερό τροφοδοσίας (Mohamed 2009).

Ο μηχανισμός λειτουργίας της αντλίας Clark παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 6.7. Ο κύλινδρος περιλαμβάνει δύο έμβολα και έναν διωστήρα (Εικόνα 6.7(A)). Τα δύο έμβολα, τα οποία είναι συνδεδεμένα απο κοινού στον διωστήρα, κινούνται δεξιά και αριστερά δημιουργώντας, μέσα στον κύλινδρο, τέσσερις θαλάμους, δύο μπροστά από τα έμβολα για την είσοδο και έξοδο του θαλασσινού νερού και δύο πίσω από τα έμβολα για την είσοδο και έξοδο της άλμης (Εικόνα 6.7(B)).

Το θαλασσινό νερό μέσης πίεσης (περίπου 10 bar), που προέρχεται από την αντλία τροφοδοσίας εισέρχεται σε ένα από τους δύο μπροστινούς θαλάμους ενώ η υψηλής πίεσης άλμη

εισέρχεται σε έναν από τους δύο θαλάμους που βρίσκονται πίσω από τα έμβολα (Εικόνα 6.7(B)). Στο δεύτερο στάδιο αντιστρέφεται η λειτουργία μέσω μιας βαλβίδας για να προχωρήσει το θαλασσινό νερό υψηλής πίεσης προς τις μεμβράνες. Η άλμη υψηλής πίεσης αφού ανταλλάσσει την υδραυλική της ενέργεια με το θαλασσινό νερό εξέρχεται από την αντλία με χαμηλή πίεση (1 bar) (Εικόνα 6.7(Γ)), όπως αναφέρει ο Mohamed (2009).

Μια ιδανική λειτουργία της αντλίας Clark είναι η λειτουργία χωρίς τριβές, διαρροές, απώλειες στην πίεση και στιγμιαία αντιστρεπτή λειτουργία των εμβόλων.



Εικόνα 6.7: Λειτουργία της αντλίας Clark. (Πηγή: Thomson, 2003)

7. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ - ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αρχικά η πειραματική μονάδα ΑΩ καθώς και όλες οι συνιστώσες της. Η μικρή μονάδα ΑΩ εμπεριέχει συσκευή ανάκτησης υδραυλικής ενέργειας και τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο. Στην συνέχεια περιγράφονται όλα τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και το σύστημα συλλογής δεδομένων. Τέλος αναφέρονται και αναλύονται όλα τα πειραματικά αποτελέσματα.

Η μονάδα ΑΩ, η οποία είναι εγκατεστημένη στο εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, σχεδιάστηκε από τον Δρ. Essam Mohamed και ήταν εφοδιασμένη με κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Αρχικά έγινε αντικατάσταση του κινητήρα με κινητήρα εναλλασσομένου ρεύματος, ο οποίος εφοδιάστηκε με μετατροπέα συχνότητας για τον έλεγχο των στροφών του. Στην συνέχεια έγινε συντήρηση της μονάδας καθώς και έλεγχος ή αντικατάσταση στα διάφορα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν. Τέλος σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε σύστημα καταγραφής δεδομένων από τα οποία έγινε αξιολόγηση της λειτουργίας της μονάδας σε μερικό φορτίο.

7.2 Σκοπός πειραματικής διερεύνησης

Τα συστήματα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση αποτελούν μια πετυχημένη προσέγγιση στη λύση του προβλήματος πόσιμου νερού κυρίως σε νησιωτικές, αλλά και σε παραθαλάσσιες περιοχές. Τα συστήματα αυτά πολλές φορές διασυνδέονται με συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες παράγουν την ενέργεια που καταναλώνεται από τη μονάδα αφαλάτωσης. Οι μονάδες που βρίσκονται στην αιχμή της τεχνολογίας περιλαμβάνουν και συστήματα ανάκτησης της ενέργειας, που μπορούν να μειώσουν δραστικά την καταναλισκόμενη ενέργεια από τη μονάδα. Όπως αναφέρουν ο Kyriakarakos et al, (2012), η λειτουργία μιας μονάδας αφαλάτωσης σε μερικό φορτίο μπορεί να παρουσιάσει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης σε σχέση με τη λειτουργία στην ονομαστική ισχύ.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να πραγματοποιηθεί πειραματική αξιολόγηση της μονάδας αφαλάτωσης σε λειτουργία μερικού φορτίου με σκοπό την βέλτιστη ενσωμάτωσή της σε τοπολογία μικροδικτύου πολυπαραγωγής (Kyriakarakos et al, 2011). Με τη χρήση μετατροπέα συχνότητας γίνεται εφικτός ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα τροφοδοσίας και τελικά της αντλίας τροφοδοσίας. Κατά αυτό τον τρόπο μπορεί να διερευνηθεί η επίδραση των διαφόρων μεγεθών και παραμέτρων της μονάδας αφαλάτωσης (πίεση, παροχή και ηλεκτρική αγωγιμότητα αφαλατωμένου νερού καθώς και η ειδική κατανάλωση ενέργειας) σε διάφορες συχνότητες λειτουργίας του κινητήρα τροφοδοσίας. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διερεύνησης της μονάδας αφαλάτωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν με σκοπό τον βέλτιστο προγραμματισμό του εποπτικού συστήματος διαχείρισης της ενέργειας το οποίο ελέγχει

το σημείο λειτουργίας της μονάδος αφαλάτωσης στην τοπολογία αυτή (Kyriakarakos et al, 2012).

7.3 Περιγραφή της μονάδας Αντίστροφης ώσμωσης

7.3.1 Δεξαμενή Τροφοδοσίας

Η δεξαμενή τροφοδοσίας (Εικόνα 7.1) είναι κατασκευασμένη από μαύρο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, χωρητικότητας 1 m³. Στη δεξαμενή αυτή παρασκευάζεται το τεχνητό θαλασσινό νερό τροφοδοσίας, διαλύοντας χλωριούχο νάτριο (NaCl) στο νερό του δικτύου της πόλης.



Εικόνα 7.1: Η δεξαμενή τροφοδοσίας

Σημειώνεται ότι η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας κατά τη διάρκεια της πειραματικής διερεύνησης ήταν 15 °C και η συγκέντρωση αλάτων 25.000 ppm.

7.3.2 Αντλία Τροφοδοσίας

Η αντλία τροφοδοσίας Fluid – o – tech PO700 (Εικόνα 7.2) αντλεί το νερό από την δεξαμενή τροφοδοσίας και το οδηγεί προς την μονάδα Α.Ω. διαμέσου των φίλτρων. Ο κινητήρας της αντλίας είναι μονοφασικός, ασύγχρονος, τετραπολικός, ισχύος 0,75 kW. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας και του κινητήρα φαίνονται στον πίνακα 7.1.



Εικόνα 7.2: Η αντλία τροφοδοσίας Fluid – o – tech PO700

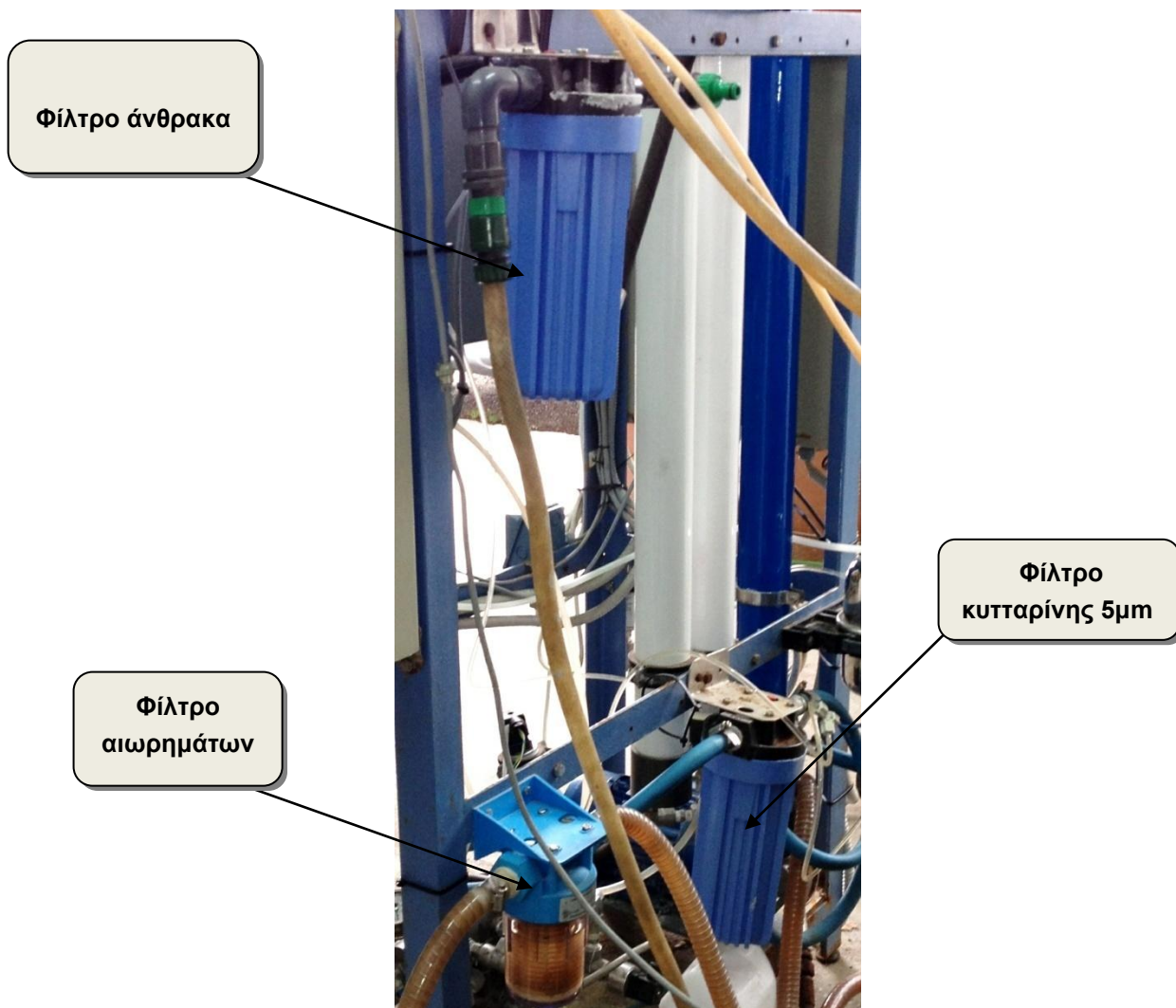
Πίνακας 7.1: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα και της αντλίας τροφοδοσίας

Αντλία τροφοδοσίας	
Τύπος αντλίας	Περιστροφική
Μοντέλο	Fluid - o - tech PO700
Μέγιστη πίεση	16 bar
Παροχή σε 1450 rpm	800 L/h
Κινητήρας τροφοδοσίας	
Τύπος κινητήρα	CEG 80b - 4
Φάσεις κινητήρα	AC Μονοφασικός ασύγχρονος
Τάση κινητήρα	220 V
Ονομαστική ισχύς	750 W

7.3.3 Σύστημα προ – επεξεργασίας του νερού τροφοδοσίας

Αφού το διάλυμα τροφοδοσίας προέρχεται από διάλυμα NaCl και νερό του δικτύου δεν χρειάζεται ιδιαίτερο σύστημα προ-επεξεργασίας. Το σύστημα προ-επεξεργασίας (Εικόνα 7.3) του νερού τροφοδοσίας αποτελείται από τα εξής μέρη:

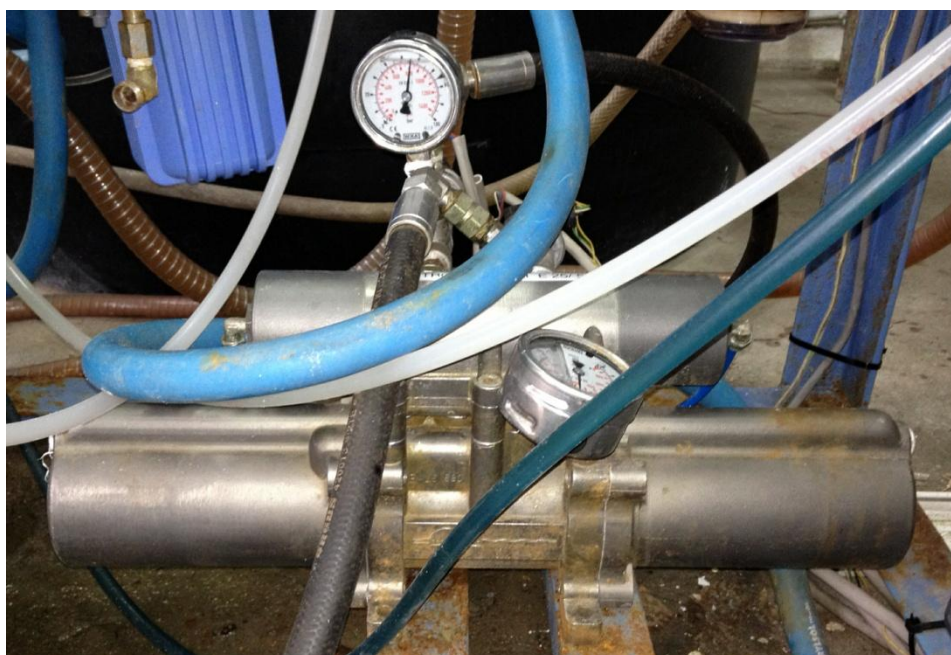
- Φίλτρο κυτταρίνης άνθρακα για συγκράτηση του ελεύθερου χλωρίου που υπάρχει στο νερό της πόλης.
- Φίλτρο αιωρημάτων για την συγκράτηση αιωρούμενων σωματιδίων.
- Φίλτρο κυτταρίνης 5 μm για την τελική φίλτραση πριν το νερό οδηγηθεί στην αντλία Clark και από εκεί στην μεμβράνη αντίστροφης ώσμωσης.



Εικόνα 7.3: Φίλτρα προ-επεξεργασίας του νερού

7.3.4 Ανακτητής υδραυλικής ενέργειας (Clark Pump)

Ο ανακτητής υδραυλικής ενέργειας της άλμης τύπου εναλλάκτη πίεσεως (Clark Pump) που απεικονίζεται στην Εικόνα 7.4, αντικαθιστά την αντλία υψηλής πίεσης σε μία συμβατική μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης. Ο ανακτητής ενέργειας (Ecosystems E-25/590) είναι μια εμβολοφόρος αντλία που ανυψώνει την πίεση του νερού στην κατάλληλη τιμή για να εισέλθει στην μεμβράνη. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας Clark παρουσιάζονται στον πίνακα 7.2



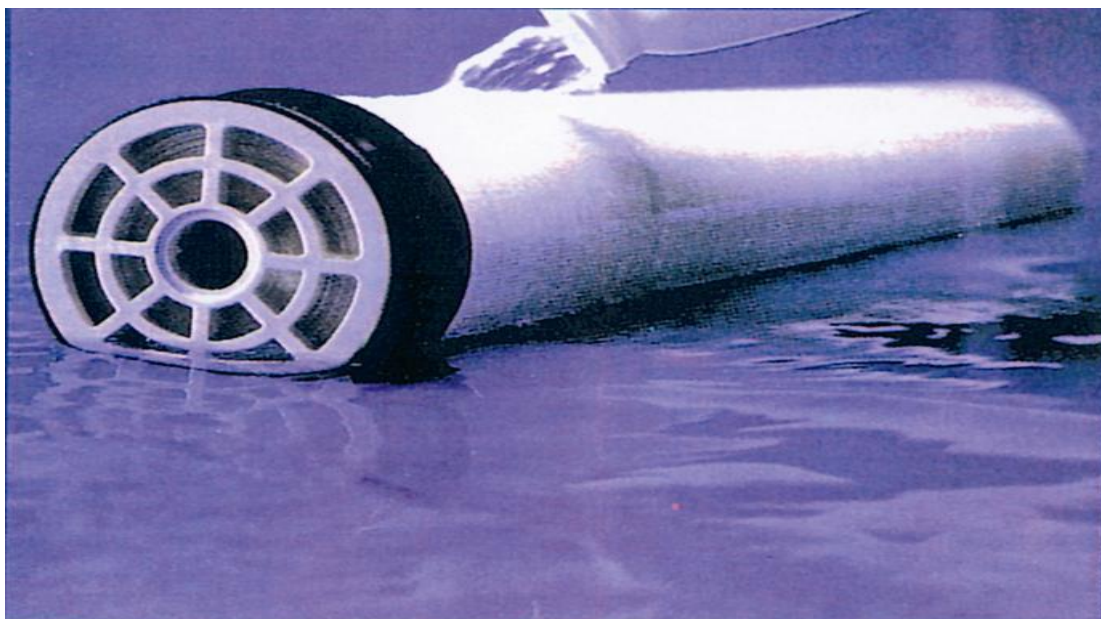
Εικόνα 7.4: Ο ανακτητής υδραυλικής ενέργειας (Clark pump)

Πίνακας 7.2: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ανακτητή ενέργειας

Μοντέλο	Eco systems E - 25/590
Ονομαστική παροχή τροφοδοσίας	760 L/h
Ονομαστική παραγωγή νερού	90 L/h
Ονομαστική πίεση λειτουργίας	50 bar
Ονομαστική πίεση τροφοδοσίας	12 bar

7.3.5 Μεμβράνη και μεμβρανοθήκη

Η μεμβράνη Filmtec SW30 – 2540 (Εικόνα 7.5) είναι η καρδιά της μονάδας ΑΩ και διαχωρίζει το εισερχόμενο νερό σε δύο ρεύματα, το αφαλατωμένο και το απορριπτόμενο (άλμη) νερό. Και τα δύο ρεύματα επιστρέφουν στην δεξαμενή τροφοδοσίας. Η μεμβρανοθήκη (δοχείο υψηλής πίεσης) Code Line είναι ο χώρος στον οποίο τοποθετείται η μεμβράνη (Εικόνα 7.6). Στην μονάδα αντίστροφης ώσμωσης χρησιμοποιήθηκαν δύο μεμβράνες με μεμβρανοθήκες συνδεδεμένες σε σειρά με σκοπό την αύξηση του ποσοστού ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μεμβράνης και της μεμβρανοθήκης φαίνονται στον πίνακα 7.3.



Εικόνα 7.5: Η μεμβράνη (σπειροειδούς περιέλιξης)



Εικόνα 7.6: Η μεμβρανοθήκη Code Line

Πίνακας 7.3: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μεμβράνης και της μεμβρανοθήκης

Τύπος μεμβρανοθήκης	Code line
Τύπος μεμβράνης	Filmtec SW 30-2540 σπειροειδούς περιέλιξης
Μέγιστη πίεση	69 bar
Μέγιστη θερμοκρασία νερού	45 °C
Μέγιστη παροχή τροφοδοσίας	1,4 m ³ /h
Παροχή παραγόμενου νερού	83 L/h
Ικανότητα απόρριψης αλάτων	99,2%
Ανάκτηση ενός στοιχείου	8%

7.3.6 Δοχείο έκπλυσης

Το δοχείο έκπλυσης (Εικόνα 7.7) της μονάδας αντίστροφης ώσμωσης είναι κατασκευασμένο από λευκό πολυαιθυλένιο χωρητικότητας 100 L. Το δοχείο αυτό πληρούται με αφαλατωμένο νερό που παράγεται από την μονάδα ΑΩ και χρησιμοποιείται για την έκπλυση της αντλίας Clark και των μεμβρανών.



Εικόνα 7.7: Το δοχείο έκπλυσης

7.3.7 Αντλία έκπλυσης

Η αντλία έκπλυσης ECOJET 120 που απεικονίζεται στην Εικόνα 7.8, αντλεί το αφραλατωμένο νερό από το δοχείο έκπλυσης και το οδηγεί προς την μονάδα ΑΩ για τον καθαρισμό των δι-αφόρων συστημάτων της μονάδας όπως η αντλία Clark και οι μεμβράνες. Το νερό μετά την έκπλυση επιστρέφει στην δεξαμενή τροφοδοσίας. Ο κινητήρας της αντλίας έκπλυσης είναι μονο-φασικός ασύγχρονος, ισχύος 1 kW. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας και του κινητήρα φαίνονται στον πίνακα 7.4.



Εικόνα 7.8: Η αντλία έκπλυσης ECOJET 120

Πίνακας 7.4: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα και της αντλίας έκπλυσης

Αντλία έκπλυσης	
Τύπος αντλίας	Φυγόκεντρη
Μοντέλο	ECOJET 120
Μέγιστο βάθος αναρρόφησης	7,6 m
Μέγιστη πίεση	5 bar
Μέγιστη παροχή	3,6 m ³ /h
Κινητήρας έκπλυσης	
Τύπος κινητήρα	TEFC (Totally Enclosed Fan Cooled)
Φάσεις κινητήρα	AC Μονοφασικός ασύγχρονος
Τάση κινητήρα	220 V
Ένταση ρεύματος	4,5 A
Ισχύς κινητήρα	1000 W

7.3.8 Πίνακας ελέγχου

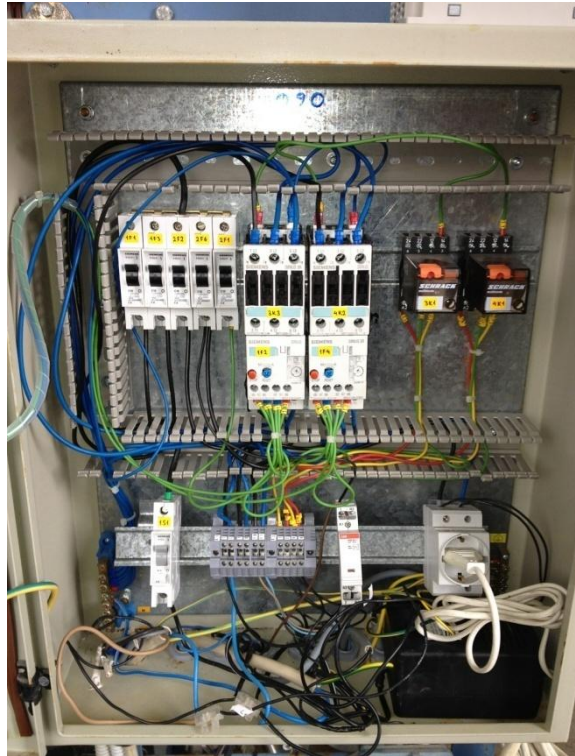
Είναι ένας ηλεκτρονικός πίνακας (Εικόνα 7.9) με μικροεπεξεργαστή. Περιέχει το αγωγιμόμετρο για την μέτρηση της ποιότητας του παραγόμενου νερού σε $\mu\text{S}/\text{cm}$. Επίσης ελέγχει συνεχώς, όταν το σύστημα είναι σε λειτουργία, αν η πίεση στην είσοδο της αντίστροφης ώσμωσης, η πίεση στην είσοδο της μεμβράνης καθώς και αν η αλατότητα του νερού είναι στα αποδεκτά επίπεδα αλλιώς ο πίνακας ελέγχου σταματάει την λειτουργία του κινητήρα τροφοδοσίας.



Εικόνα 7.9: Ο πίνακας ελέγχου

7.3.9 Πίνακας ισχύος

Ο πίνακας ισχύος (Εικόνα 7.10) περιλαμβάνει το κύκλωμα ισχύος της αντλίας τροφοδοσίας και της αντλίας έκπλυσης καθώς και τους διακόπτες αυτοματισμού των αντλιών και είναι σε θέση να επικοινωνεί με τον πίνακα ελέγχου.



Εικόνα 7.10: Ο πίνακας ισχύος

7.3.10 Ρυθμιστής στροφών

Ο ρυθμιστής στροφών HYUNDAI N50 που απεικονίζεται στην Εικόνα 7.11, είναι ένας μικρής τάσης αναλογικός inverter ο οποίος μεταβάλλει την συχνότητα και κατ' επέκταση τις στροφές λειτουργίας του κινητήρα της αντλίας τροφοδοσίας. Ο ρυθμιστής στροφών είναι συνδεδεμένος παράλληλα με τον κινητήρα τροφοδοσίας έτσι ώστε η συχνότητα λειτουργίας να μεταβάλλεται στο επιθυμητό επίπεδο. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ρυθμιστή στροφών φαίνονται στον πίνακα 7.5.



Εικόνα 7.11: Ο ρυθμιστής στροφών HYUNDAI N50.

Πίνακας 7.5: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ρυθμιστή στροφών.

Ονομαστική ισχύς	1500 W
Ονομαστική Τάση	200 ~ 230 V
Ένταση ρεύματος	7 A
Μέγιστη συχνότητα	400 Hz

7.3.11 Αισθητήρια της μονάδας αφαλάτωσης

- Αναλογικό μανόμετρο στην έξοδο της αντλίας τροφοδοσίας.
- Αναλογικό μανόμετρο στην είσοδο των μεμβρανών και στην είσοδο της αντλίας Clark.
- Ψηφιακό αγωγιμόμετρο στην γραμμή του αφαλατωμένου νερού.
- Αναλογικά ροόμετρα στη γραμμή του αφαλατωμένου νερού και στη γραμμή της άλμης.
- Πιεζοστάτης στην είσοδο της μεμβράνης. Προστατεύει τη μεμβράνη και τη μεμβρανοθήκη του συστήματος από λειτουργία σε πίεση μεγαλύτερη από τη μέγιστη επιτρεπτή.

Επιπλέον το σύστημα εξοπλίστηκε με διάφορα ηλεκτρονικά ψηφιακά όργανα μέτρησης όπως:

- **Μεταδότες πίεσης**

Υπάρχουν τρεις μεταδότες πίεσης (Εικόνα 7.12). Ένας στην έξοδο της αντλίας τροφοδοσίας (Πίνακας 7.6).

Πίνακας 7.6: Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη της πίεσης στην κατάθλιψη της αντλίας τροφοδοσίας

Τύπος	Wika Eco - Tronic
Περιοχή μέτρησης	0 - 60 bar
Σήμα εξόδου	4 - 20 mA
Ακρίβεια	<1%

Δύο στην είσοδο της μεμβράνης ΑΩ και στην είσοδο του ανακτητή υδραυλικής ενέργειας (Clark Pump) (Πίνακας 7.7).

Πίνακας 7.7: Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη υψηλής πίεσης

Τύπος	Wika Eco - Tronic
Περιοχή μέτρησης	0 - 100 bar
Σήμα εξόδου	4 - 20 mA
Ακρίβεια	<1%



Εικόνα 7.12: Μεταδότης πίεσης

- **Μεταδότες παροχής**

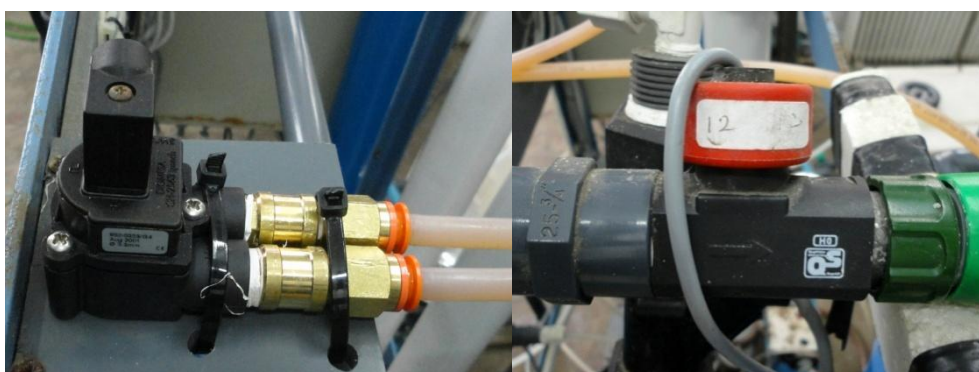
Για την μέτρηση της παροχής του αφαλατωμένου νερού και της άλμης (Εικόνα 7.13) χρησιμοποιήθηκαν δύο μεταδότες ροής νερού, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 7.8 και 7.9 αντίστοιχα.

Πίνακας 7.8: Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη παροχής αφαλατωμένου νερού

Τύπος	GREINSINGER FHKK - PVDF
Περιοχή μέτρησης	0,03 - 5 L/h
Σήμα εξόδου	Παλμοί
Ακρίβεια	±2%

Πίνακας 7.9: Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη παροχής της άλμης

Τύπος	SIKA VTH
Περιοχή μέτρησης	2 - 40 L/h
Σήμα εξόδου	Παλμοί
Ακρίβεια	±1%



A

B

Εικόνα 7.13: Μεταδότες ροής A) αφαλατωμένου νερού B) άλμης

- **Μεταδότες ηλεκτρικής αγωγιμότητας**

Για την μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του αφαλάτωμένου νερού και της άλμης χρησιμοποιήθηκαν μεταδότες ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού είναι συνάρτηση των ολικών διαλυμένων αλάτων στο νερό.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη ηλεκτρικής αγωγιμότητας του αφαλατωμένου νερού (Εικόνα 7.14A) παρουσιάζονται στον πίνακα 7.10.

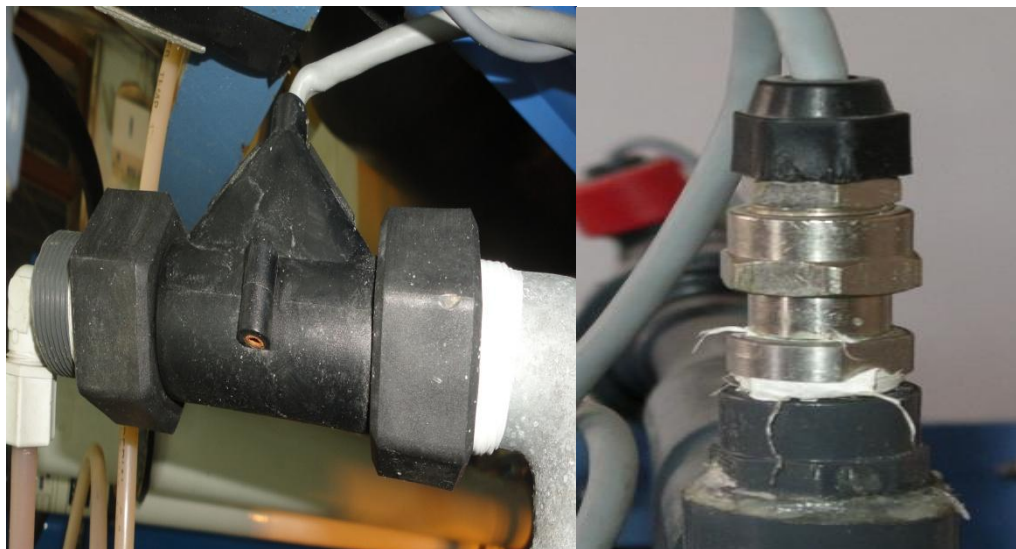
Πίνακας 7.10: Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη ηλεκτρικής αγωγιμότητας του αφαλατωμένου νερού

Τύπος	HANNA HI 8936C
Περιοχή μέτρησης	0 - 1999 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$
Σήμα εξόδου	4 - 20 mA
Ακρίβεια	$\pm 2\%$

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη ηλεκτρικής αγωγιμότητας της άλμης (Εικόνα 7.14B) παρουσιάζονται στον πίνακα 7.11.

Πίνακας 7.11: Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη ηλεκτρικής αγωγιμότητας της άλμης

Τύπος	HANNA HI 8931A
Περιοχή μέτρησης	0 - 199,9 mS/cm ²
Σήμα εξόδου	4 - 20 mA
Ακρίβεια	$\pm 2\%$



A

B

Εικόνα 7.14: Μεταδότες ηλεκτρικής αγωγιμότητας A) αφαλατωμένου νερού B) άλμης

- **Μεταδότες ισχύος**

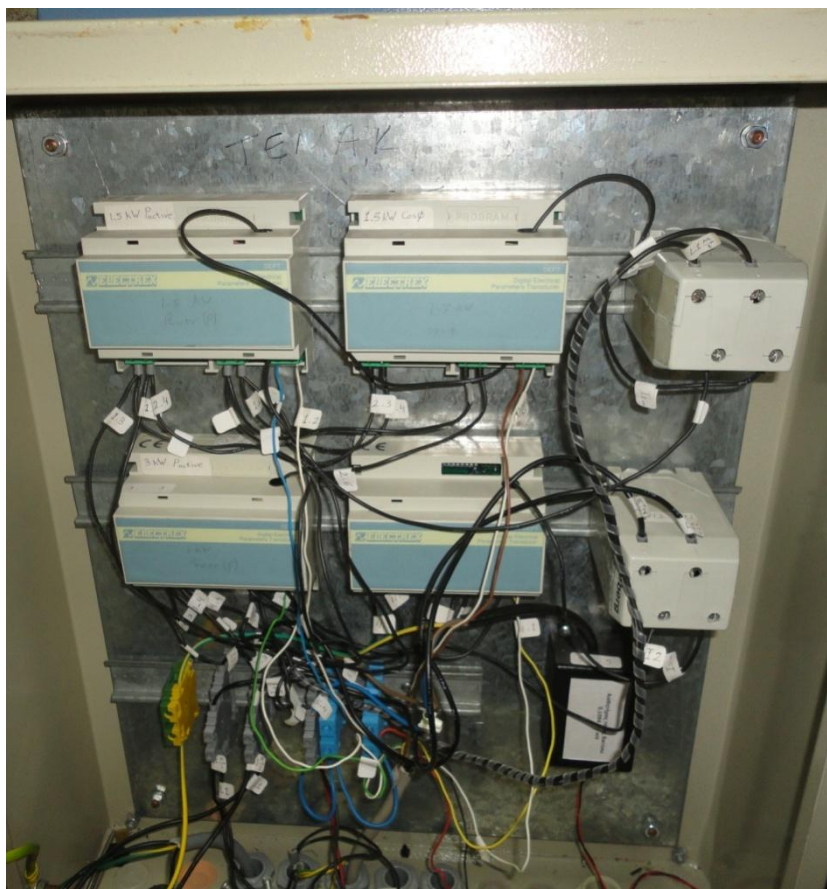
Για την μέτρηση της ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνει ο κινητήρας της αντλίας τροφοδοσίας χρησιμοποιήθηκαν δύο μεταδότες (Εικόνα 7.15). Ένας στην μέτρηση της ενεργού ισχύος και ένας στην μέτρηση του συντελεστού ισχύος ($\cos\phi$), τα τεχνικά χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον πίνακα 7.12 και 7.13 αντίστοιχα.

Πίνακας 7.12: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη ενεργού ισχύος του κινητήρα τροφοδοσίας

Τύπος	DEPT ELECTREX
Περιοχή μέτρησης	0 - 1,5 kW
Σήμα εξόδου	4 - 20 mA
Ακρίβεια	0,4%

Πίνακας 7.13: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη συντελεστού ισχύος του κινητήρα τροφοδοσίας

Τύπος	DEPT ELECTREX
Περιοχή μέτρησης	0 - 1 cosφ
Σήμα εξόδου	4 - 20 mA
Ακρίβεια	0,4%



Εικόνα 7.15: Μεταδότες ισχύος

- **Μετρητής στροφών**

Για την μέτρηση της συχνότητας λειτουργίας του κινητήρα τροφοδοσίας χρησιμοποιήθηκε ο μετρητής του ρυθμιστή στροφών (inverter).

7.3.12 Καταγραφικό δεδομένων (Data Logger)

Όλα τα μετρούμενα μεγέθη καταγράφονται από ψηφιακό σύστημα συλλογής δεδομένων που συνδέεται με υπολογιστή για την τελική αποθήκευση των δεδομένων. Τα συστήματα συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

- Το CR10X της Campbell SCIENTIFIC (Εικόνα 7.16) το οποίο κατέγραφε τα δεδομένα από τους μεταδότες παροχής και
- Το ADC – 24 της Pico – Technology (Εικόνα 7.17) το οποίο κατέγραφε τα δεδομένα όλων των υπολοίπων ψηφιακών οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν.



Εικόνα 7.16: Το καταγραφικό δεδομένων CR10X της Campbell SCIENTIFIC



Εικόνα 7.17: Το καταγραφικό δεδομένων ADC - 24 της Pico - Technology

7.4 Λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης

Αρχικά γίνεται προετοιμασία του τεχνητού θαλασσινού νερού, διαλύοντας 25 kg NaCl σε 1 m³ νερό του δικτύου, αφού περάσει πρώτα από το φίλτρο κυτταρίνης άνθρακα. Από το φίλτρο αυτό αφαιρούνται η θολότητα, το χλώριο και το οργανικό φορτίο του νερού.

Η περιστροφική αντλία τροφοδοσίας αντλεί το διάλυμα NaCl από την δεξαμενή τροφοδοσίας προς τον ανακτητή υδραυλικής ενέργειας (Clark Pump) μέσω των φίλτρων προεπεξεργασίας του νερού. Καθώς συνεχίζεται η άντληση με 10 bar, η πίεση εισόδου της μεμβράνης αυξάνεται σταδιακά με την βοήθεια της πίεσης της άλμης. Η πίεση της άλμης προστίθεται στην πίεση της αντλίας τροφοδοσίας και η μονάδα ΑΩ φτάνει σε ισορροπημένη πίεση λειτουργίας. Η τιμή της πίεσης λειτουργίας εξαρτάται από την συγκέντρωση των αλάτων στο διάλυμα τροφοδοσίας καθώς και από την θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας.

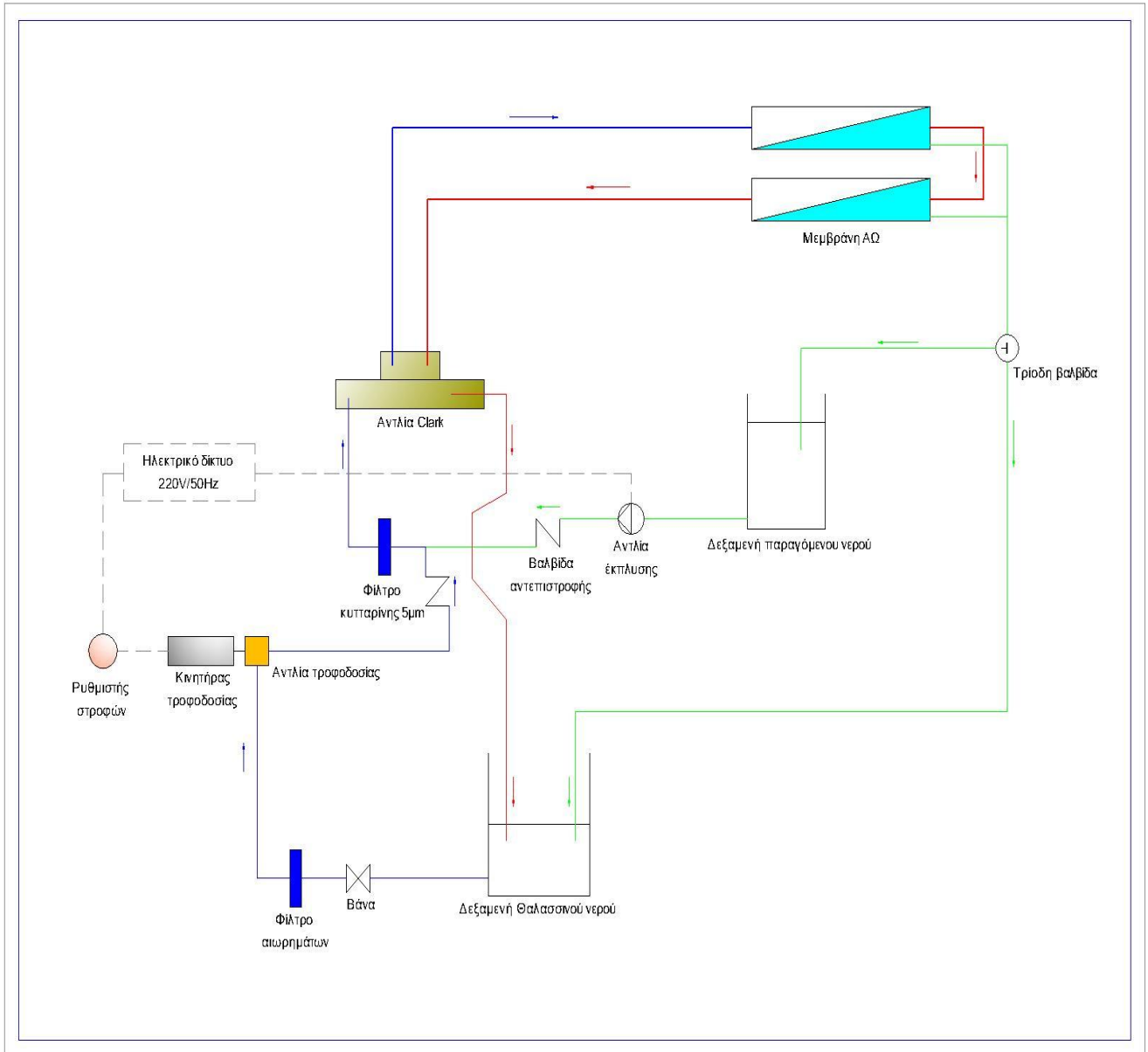
Μια τρίοδη βαλβίδα κατευθύνει το αφαλατωμένο νερό από τις μεμβράνες στο δοχείο έκπλυσης και όταν το δοχείο γεμίσει κατευθύνει το παραγόμενο νερό στην δεξαμενή τροφοδοσίας για την παρασκευή νέου διαλύματος NaCl. Μια δεύτερη τρίοδη βαλβίδα, η οποία λειτουργεί αυτόματα με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού, κατευθύνει το νερό στην γραμμή του παραγόμενου νερού ή στην γραμμή της άλμης, όταν αυτό ξεπερνά τα 1000 μS/cm (προκαθορισμένο από το χρήστη).

Στο τέλος της λειτουργίας σταματάει η αντλία τροφοδοσίας και ξεκινάει να λειτουργεί, για λίγα λεπτά, η αντλία έκπλυσης έτσι ώστε να γίνει πλύση της αντλίας Clark και των μεμβρανών με το παραγόμενο νερό που έχει αποθηκευτεί στο δοχείο έκπλυσης.

Οι δύο κινητήρες του συστήματος τροφοδοτούνται με μονοφασικό ηλεκτρικό ρεύμα από το δίκτυο. Το σύστημα αφαλάτωσης ΑΩ φαίνεται στην Εικόνα 7.18 και το σχηματικό του διάγραμμα στην Εικόνα 7.19.



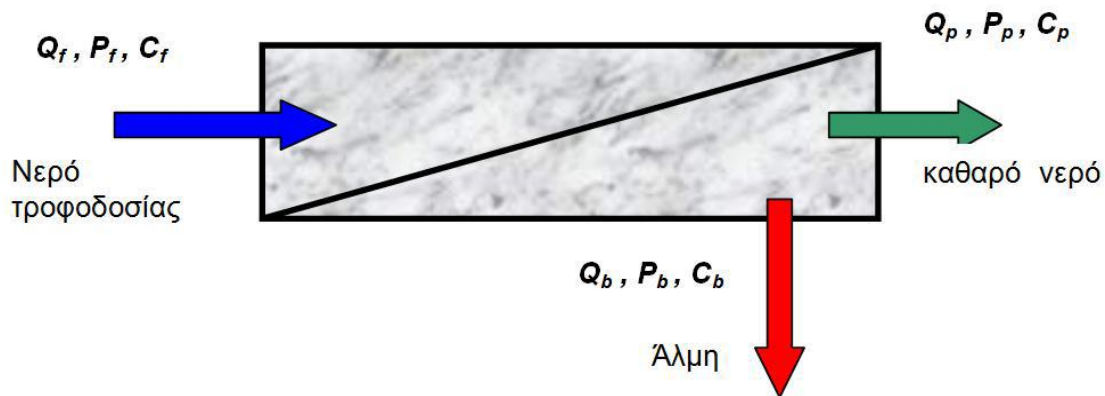
Εικόνα 7.18: Η μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης



Εικόνα 7.19: Σχηματικό διάγραμμα την μονάδας αφαλάτωσης

7.5 Θεωρητική διερεύνηση - μεθοδολογία

Όταν είναι επιθυμητή η μελέτη της συμπεριφοράς των στοιχείων μεμβρανών ΑΩ ως ανεξάρτητο μεμονωμένο στοιχείο, μπορούν να εφαρμοστούν πολύπλοκα μοντέλα ή να υιοθετηθούν προσεγγιστικές μέθοδοι βασισμένες στη χρήση μέσων τιμών. Στην περίπτωση πολλών στοιχείων μεμβρανών συνδεδεμένων στη σειρά, εξετάζεται κάθε στοιχείο μεμβράνης ξεχωριστά (Εικόνα 7.20) και εφαρμόζονται απλά ισοζύγια μάζας (Mohamed, 2009).



Εικόνα 7.20: Σχηματικό διάγραμμα της μεμβράνης ΑΩ. (Πηγή: Mohamed, 2009)

Στην Εικόνα 7.20 Q είναι η παροχή του νερού (L/h), P είναι η πίεση νερού (bar) και C είναι η συγκέντρωση αλάτων (ppm). Οι δείκτες f, p, b χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία, την παραγωγή αφαλατωμένου νερού και την άλμη αντίστοιχα.

7.5.1 Ισοζύγιο μάζας

Ακολουθώντας την αρχή διατήρησης της μάζας παρατηρούμε στην Εικόνα 7.20 ότι η ροή του νερού τροφοδοσίας (θαλασσινό νερό ή υφάλμυρο νερό), διαχωρίζεται σε δύο ροές, το καθαρό νερό και την άλμη. Αυτό μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση 1 (Mohamed, 2009):

$$Q_f = Q_p + Q_b \quad \text{εξ. (1)}$$

Όπου, Q_f είναι η παροχή του νερού τροφοδοσίας (L/h), Q_p είναι η παροχή του αφαλατωμένου νερού (L/h) και Q_b είναι η παροχή της άλμης (L/h).

Η παροχή του αφαλατωμένου νερού καθώς και η παροχή της άλμης μετρήθηκαν από τα ηλεκτρονικά ψηφιακά όργανα μέτρησης της παροχής που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 7.3

7.5.2 Ανάκτηση αφαλατωμένου νερού

Ο συντελεστής ανάκτησης $R(\%)$ του αφαλατωμένου νερού είναι μια χαρακτηριστική τιμή της μεμβράνης και υποδηλώνει το ποσοστό του αφαλατωμένου νερού από το διάλυμα τροφοδοσίας και ορίζεται από την εξίσωση 2 (Wilf, 2007).

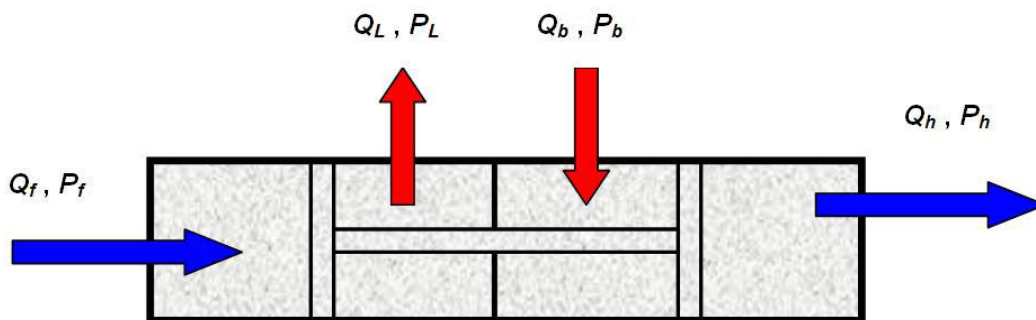
$$R \% = \frac{Q_p}{Q_f} \times 100 \quad \text{εξ. (2)}$$

7.5.3 Η ωσμωτική πίεση

Η ωσμωτική πίεση Π είναι η απαιτούμενη πίεση για να σταματήσει το φαινόμενο της ώσμωσης. Η ωσμωτική πίεση είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης των αλάτων C στο διάλυμα και της θερμοκρασίας T του διαλύματος. Η ωσμωτική πίεση για διάλυμα NaCl μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 3 του Dupont (1992), ως εξής:

$$\Pi = \frac{0.0385 \times C \times T + 273.15}{1000 - \frac{C}{1000}} \quad \text{εξ. (3)}$$

7.5.4 Ο μηχανικός βαθμός απόδοση της αντλίας Clark



Εικόνα 7.21: Σχηματικό διάγραμμα της αντλίας Clark. (Πηγή: Mohamed, 2009)

Η μηχανική απόδοση της αντλίας είναι ο λόγος της πίεσης εξόδου της αντλίας (υψηλή πίεση προς τη μεμβράνη ΑΩ) προς την πίεση εισόδου σε αυτήν (μέση πίεση τροφοδοσίας και πίεση άλμης) (Thomson and Miranda, 2000):

$$n_m = \frac{P_h}{P_f + P_b} \quad \text{εξ. (4)}$$

Όπου, n_m είναι ο μηχανικός βαθμός απόδοσης της αντλίας Clark, P_h είναι η πίεση στην είσοδο της μεμβράνης ΑΩ (bar), P_b είναι η πίεση της άλμης (bar) και P_f είναι η πίεση της αντλίας τροφοδοσίας (bar).

Και τα τρία παραπάνω μεγέθη μετρήθηκαν από τους μεταδότες πίεσης που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 7.3

7.5.5 Ειδική κατανάλωση ενέργειας

Η ειδική κατανάλωση ενέργειας μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση 5 (Mohamed, 2009):

$$S_{EC} = \frac{E_m}{Q_p} \quad \text{εξ. (5)}$$

Όπου, S_{EC} είναι η ειδική κατανάλωση ενέργειας (kWh/m³), E_m είναι η καταναλισκόμενη ενέργεια από τον κινητήρα τροφοδοσίας (kW) και Q_p είναι παραγόμενη ποσότητα αφαλατωμένου νερού (m³).

Η τιμή E_m μετρήθηκε από το μεταδότη ενέργειας και η τιμή Q_p μετρήθηκε από τον μεταδότη παροχής του αφαλατωμένου νερού που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 7.3.

7.5.6 Η φαινόμενη ισχύς

Η ισχύς που καταναλώνει ο κινητήρας της αντλίας τροφοδοσίας είναι η ενεργός ισχύς. Η ισχύς που πληρώνουμε στην ΔΕΗ όμως είναι η φαινόμενη ισχύς και η τιμή της εξαρτάται τόσο από την ενεργό ισχύ όσο και από τον συντελεστή ισχύος (cosφ). Η φαινόμενη ισχύς μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση 6.

$$S = \frac{P}{\cos \varphi}$$

εξ. (6)

Όπου, S είναι η φαινόμενη ισχύς που καταναλώνει ο κινητήρας τροφοδοσίας (kVA), P είναι η ενεργός ισχύς που καταναλώνει ο κινητήρας τροφοδοσίας (kW) και $\cos \varphi$ είναι ο συντελεστής ισχύος του κινητήρα τροφοδοσίας.

Τόσο η ενεργός ισχύς όσο και ο συντελεστής ισχύος μετρήθηκαν από τους μεταδότες ισχύος που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 7.3.

7.5.7 Στροφές του κινητήρα τροφοδοσίας

Η ρύθμιση των στροφών ενός ασύγχρονου κινητήρα μπορεί να γίνει με ποικίλους τρόπους. Ο τρόπος που προσφέρει τα περισσότερα πλεονεκτήματα είναι η μεταβολή της συχνότητας και της τάσης τροφοδοσίας του στάτη. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή ο ασύγχρονος κινητήρας τροφοδοτείται με τάση μεταβλητής συχνότητας, που έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή του σύγχρονου αριθμού στροφών του, οποίος δίνεται από την εξίσωση 7 και είναι ανάλογος της συχνότητας λειτουργίας.

$$n_s = \frac{f}{p} \times 120$$

εξ. (7)

Όπου, n_s είναι ο σύγχρονος αριθμός στροφών του κινητήρα τροφοδοσίας (rpm), f είναι η συχνότητα λειτουργίας του κινητήρα (Hz) και p είναι ο αριθμός των πόλων του κινητήρα. Ο κινητήρας τροφοδοσίας της μονάδας ΑΩ είναι τετραπολικός.

8. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

8.1 Συμπεριφορά της μονάδας ΑΩ σε συνθήκες μεταβλητής συχνότητας του κινητήρα της αντλίας τροφοδοσίας

Σκοπός της πειραματικής διερεύνησης ήταν να διερευνηθεί η επίδραση της μεταβολής της συχνότητας λειτουργίας του κινητήρα της περιστροφικής αντλίας τροφοδοσίας στις διάφορους παραμέτρους της μονάδας ΑΩ (πίεση, παροχή αφαλατωμένου νερού, ηλεκτρική αγωγιμότητα του παραγόμενου νερού και ειδική κατανάλωση ενέργειας). Η συχνότητα λειτουργίας είναι μια χαρακτηριστική παράμετρος σε μονάδες ΑΩ που τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια απευθείας από πηγές που χαρακτηρίζονται με διακυμάνσεις όπως είναι τα συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και πιο συγκεκριμένα τα υβριδικά συστήματα καθώς και σε τοπολογίες μικροδικτύου πολυπαραγωγής.

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με την χρήση του ρυθμιστή στροφών (inverter) που περιγράφηκε παραπάνω. Το πείραμα ξεκίνησε με συχνότητα λειτουργίας υπό πλήρες φορτίο στα 60 Hz και ακολούθησαν μετρήσεις με μειωμένες, σταδιακά, τιμές συχνότητας στα 55, 50, 45, 40, 35, 30, 25, 20, 15, 14, 13, 12, 11 και 10 Hz. Σε κάθε επίπεδο συχνότητας καταγράφηκαν οι παράμετροι λειτουργίας της μονάδας ΑΩ, όπως η πίεση της αντλίας τροφοδοσίας, η πίεση στην είσοδο των μεμβρανών, η πίεση της άλμης, η παροχή αφαλατωμένου νερού, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού, η ενεργός ισχύς και ο συντελεστής ισχύος του κινητήρα της περιστροφικής αντλίας τροφοδοσίας.

8.1.1 Οι πιέσεις της μονάδας αφαλάτωσης

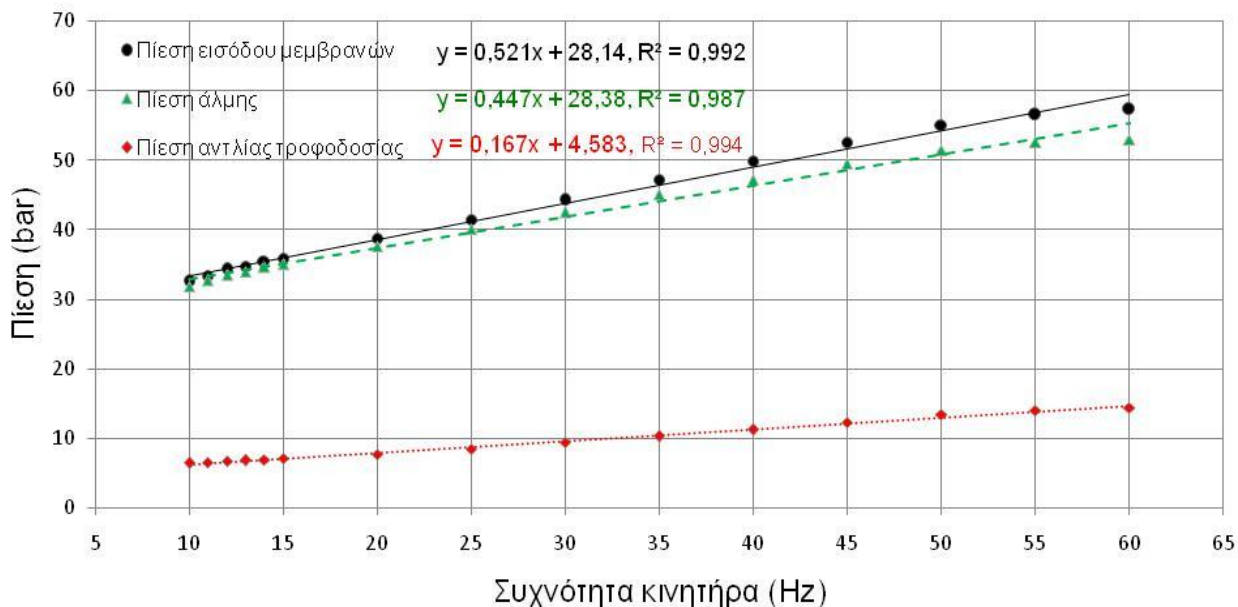
Η αύξηση στην συχνότητας τροφοδοσίας και κατά συνέπεια η αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος του κινητήρα, είναι ευθέως ανάλογη με την πίεση λειτουργίας της αντλίας τροφοδοσίας. Στην Εικόνα 8.1 απεικονίζεται η γραμμική σχέση μεταξύ της συχνότητας του κινητήρα και της πίεσης της αντλίας τροφοδοσίας με συντελεστή γραμμικής συσχέτισης 99,4%. Επίσης στην ίδια εικόνα (Εικόνα 8.1) απεικονίζονται οι γραμμικές σχέσεις μεταξύ της συχνότητας του κινητήρα και της πίεσης στην είσοδο των μεμβρανών καθώς και της πίεσης της άλμης με συντελεστές γραμμικής συσχέτισης 99,2% και 98,7% αντίστοιχα.

Στην Εικόνα 8.1 παρατηρείται ότι η πίεση της αντλίας τροφοδοσίας μαζί με την πίεση της άλμης αυξάνουν την πίεση στην είσοδο των μεμβρανών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην παρουσία του ανακτητή υδραυλικής ενέργειας (Clark rump), κατά την λειτουργία του οποίου, η πίεση του νερού στη είσοδο των μεμβρανών ανυψώνεται με την βοήθεια της άλμης.

Η διαφορά πίεσης που παρατηρείται μεταξύ της πίεσης στην είσοδο των μεμβρανών και της πίεσης της αντλίας τροφοδοσίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.1, δεν είναι σταθερή και κυμαίνεται μεταξύ 26,1 και 42,9 bar. Αυτό οφείλεται στις απώλειες της αντλίας Clark που προκαλούνται λόγω τριβών και εξαρτημάτων δικτύου, καθώς και λόγω του γεγονότος μη στιγμιαίας αντιστρεπτής λειτουργίας των εμβόλων. Η απόκλιση της διαφοράς αυτής που παρατηρείται με

την αύξηση της συχνότητας οφείλεται στην γραμμική μεταβολή των αντίστοιχων πιέσεων σε σχέση με την συχνότητα.

Ομοίως η διαφορά μεταξύ της πίεσης στην είσοδο των μεμβρανών και της πίεσης της άλμης κυμαίνεται μεταξύ 0,7 και 4,2 bar. Αυτή η διαφορά αντιπροσωπεύει τις απώλειες πίεσης μέσα στην μεμβράνη και στην μεμβρανοθήκη, καθώς και πρόσθετες απώλειες λόγω τριβών και υδραυλικών συνδέσεων του δικτύου, (Mohamed, 2009).



Εικόνα 8.1: Επίδραση της συχνότητας του κινητήρα στις πιέσεις της μονάδας ΑΩ

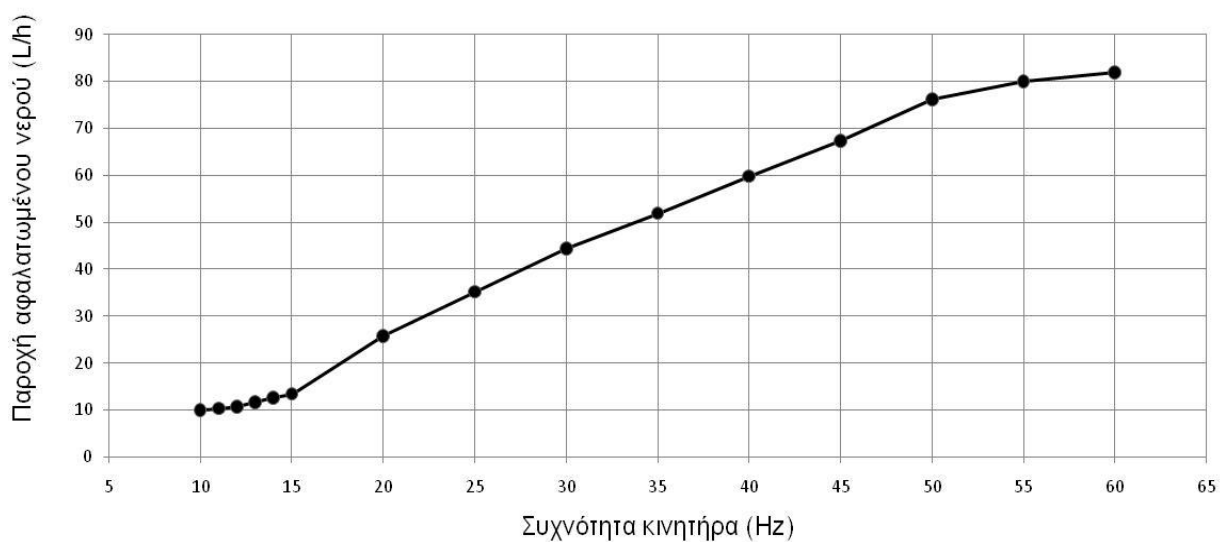
8.1.2 Η παροχή αφαλατωμένου νερού

Οι περιστροφικές αντλίες θετικής μετατόπισης απομονώνουν μια ποσότητα υγρού ανάμεσα στα αντλητικά στοιχεία και την ωθούν προς το σωλήνα κατάθλιψης. Έτσι η παροχή της αντλίας τροφοδοσίας είναι ευθέως ανάλογη με τον αριθμό των στροφών του κινητήρα. Κάτω από σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, η παροχή του αφαλατωμένου νερού είναι ανάλογη με την παροχή του νερού τροφοδοσίας (Mohamed, 2009).

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6, η αύξηση της πίεσης στην είσοδο της μεμβράνης επηρεάζει την ροή του αφαλατωμένου νερού και η επίδραση της ασκούμενης πίεσης στην ροή του αφαλατωμένου νερού είναι γραμμική (Εικόνα 6.2).

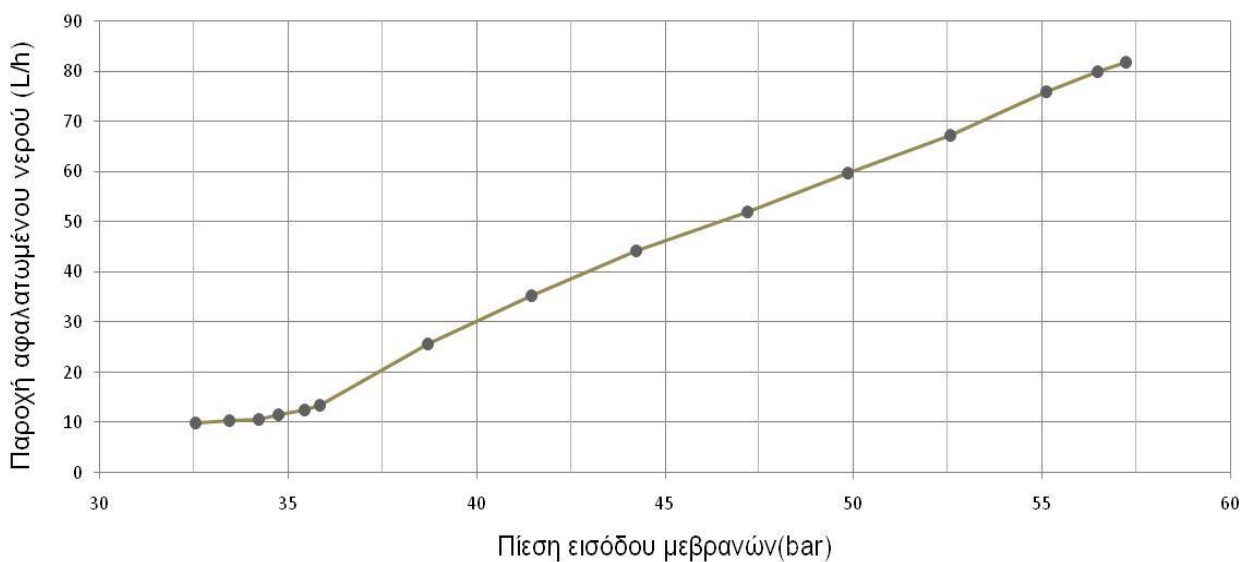
Στην Εικόνα 8.2 απεικονίζεται η επίδραση της μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην παροχή του αφαλατωμένου νερού. Στην εικόνα αυτή φαίνεται ότι η παροχή του αφαλατωμένου νερού ακολουθεί μια γραμμική μεταβολή μέχρι την συχνότητα των 50 Hz, το οποίο ήταν αναμενόμενο όπως προαναφέρθηκε.

Επίσης παρατηρείται στην Εικόνα 8.2 ότι η παροχή του αφαλατωμένου νερού από την συχνότητα των 50 Hz και πάνω τείνει να σταθεροποιηθεί. Το γεγονός αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μεμβρανών (όρια αντοχής).



Εικόνα 8.2: Επίδραση της μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην παροχή του αφαλατωμένου νερού

Στην Εικόνα 8.3 εμφανίζεται η μεταβολή της πίεσης στην είσοδο των μεμβρανών σε σχέση με την παροχή του αφαλατωμένου νερού για την ευκολία παρατήρησης των δεδομένων των μετρήσεων.



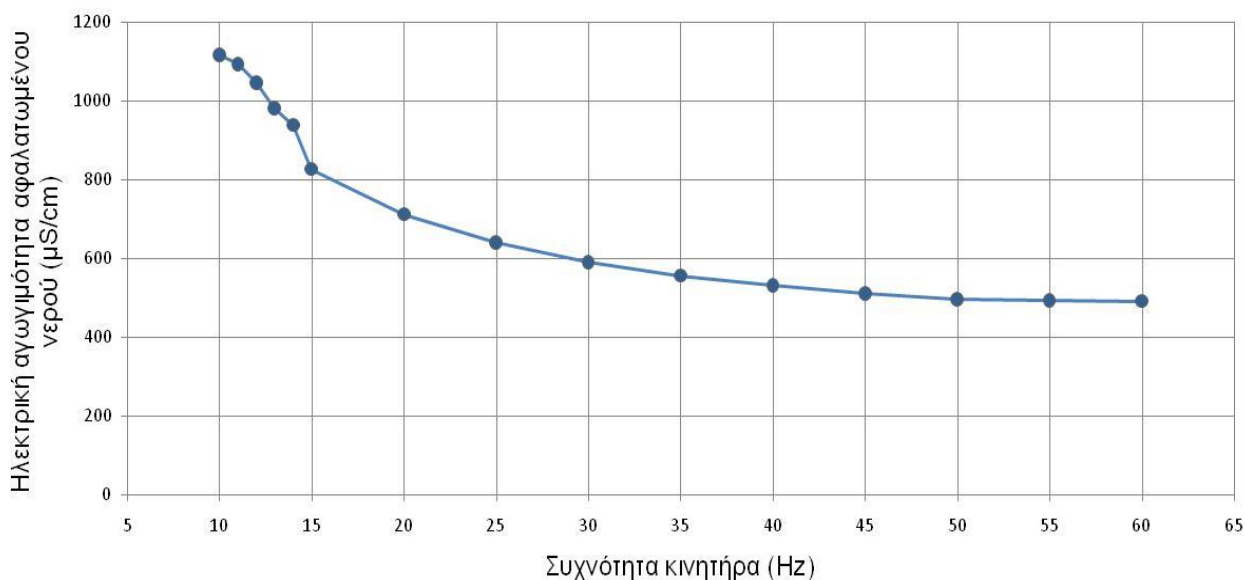
Εικόνα 8.3: Μεταβολή της πίεσης στην είσοδο των μεμβρανών σε σχέση με την παροχή του αφαλατωμένου νερού

8.1.3 Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού

Στην Εικόνα 8.4 απεικονίζεται η μεταβολή της συχνότητας του κινητήρα στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η αγωγιμότητα του νερού μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας του κινητήρα τροφοδοσίας και κατ' επέκταση με την αύξηση της πίεσης στην είσοδο των μεμβρανών.

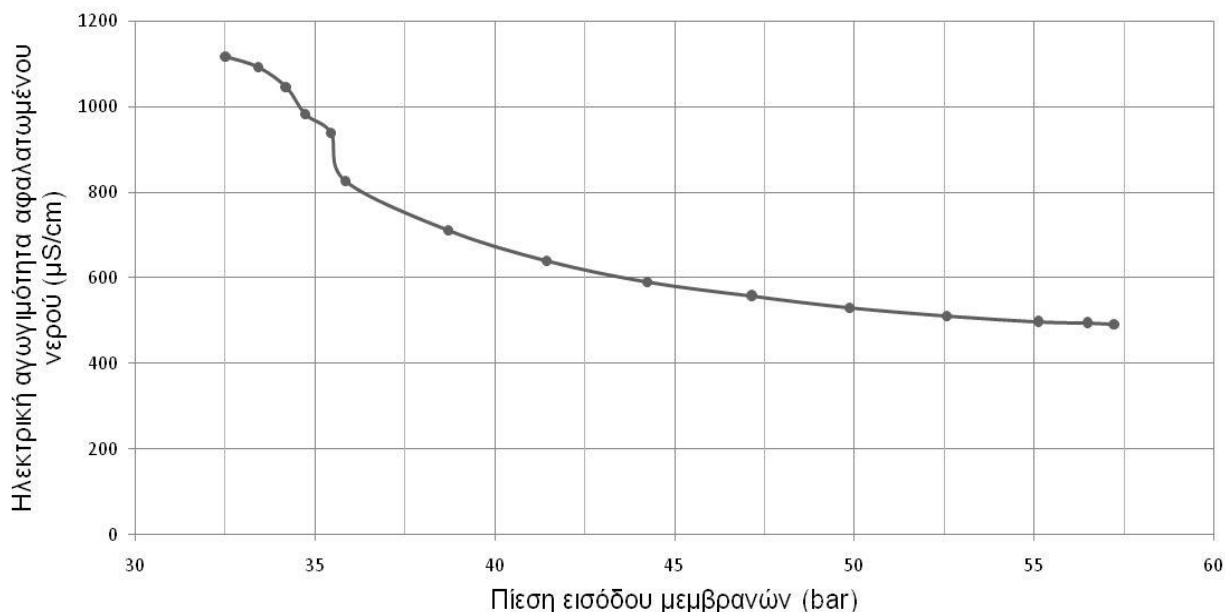
Η μορφή της καμπύλης αυτής (Εικόνα 8.4) συμφωνεί με όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 6, δηλαδή η αύξηση της πίεσης στην είσοδο της μεμβράνης αυξάνει την απόρριψη των αλάτων και μειώνει συνακόλουθα την ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.3 η αύξηση της ασκούμενης πίεσης αυξάνει την απόρριψη των αλάτων, δηλαδή μειώνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού.

Στην Εικόνα 8.4 φαίνεται ότι η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού τείνει να σταθεροποιηθεί καθώς αυξάνεται η συχνότητα του κινητήρα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά των μεμβρανών.



Εικόνα 8.4: Επίδραση της μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού

Στην Εικόνα 8.5 εμφανίζεται η μεταβολή της πίεσης στην είσοδο των μεμβρανών σε σχέση με την ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού, για την ευκολία παρατήρησης των δεδομένων.



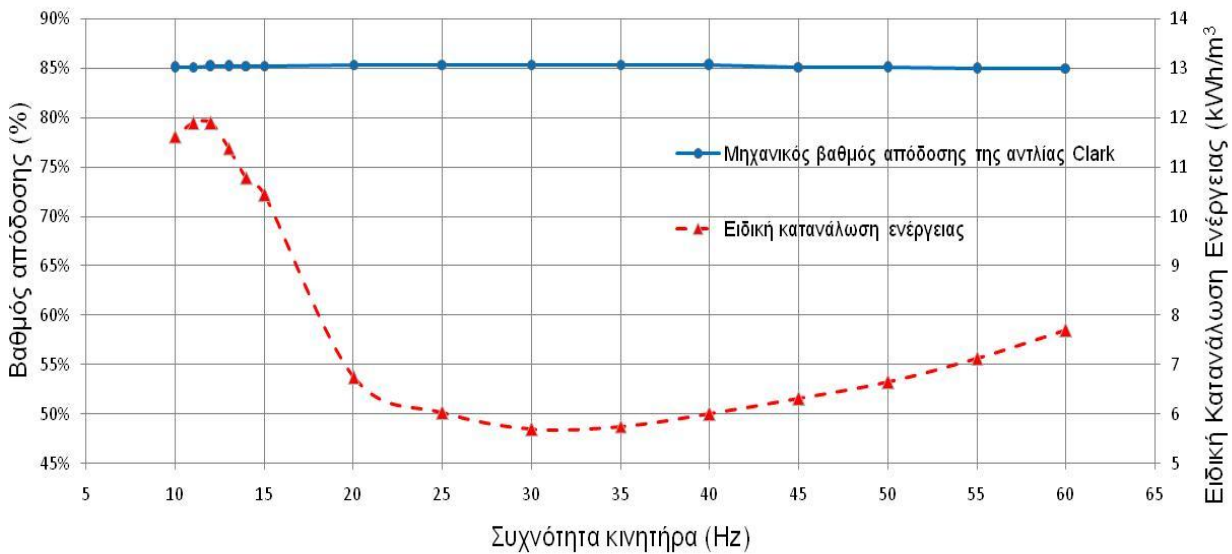
Εικόνα 8.5: Μεταβολή της πίεσης στην είσοδο των μεμβρανών σε σχέση με την ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού

8.1.4 Ο Μηχανικός βαθμός απόδοσης της αντλίας Clark και η ειδική κατανάλωση ενέργειας

Στην Εικόνα 8.6 παρουσιάζεται ο μηχανικός βαθμός απόδοσης της αντλίας Clark όπως αυτός έχει οριστεί στην εξίσωση 4. Παρατηρείται ότι ο μηχανικός βαθμός απόδοσης παραμένει σχεδόν σταθερός στο 85%, όπως είναι αναμενόμενο για όλους του τύπους αντλιών θετικής μετατόπισης.

Στην Εικόνα 8.6 απεικονίζεται επίσης η ειδική κατανάλωση ενέργειας της μονάδας ΑΩ, η οποία υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση 5. Στην εικόνα αυτή παρατηρείται ότι η ειδική κατανάλωση ενέργειας παρουσιάζει ελάχιστο στην περιοχή των 25 έως 45 Hz. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η παροχή του αφαλατωμένου νερού στο συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων εμφανίζει ανοδική πορεία, ενώ οι αντίστοιχες καταναλώσεις της αντλίας τροφοδοσίας δεν είναι υψηλές. Κατά συνέπεια η περιοχή αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί ως βέλτιστη για την λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης υπό μερικό φορτίο.

Στην ίδια εικόνα (Εικόνα 8.6), οι μέγιστες τιμές της ειδικής κατανάλωσης παρουσιάζονται στην περιοχή κάτω των 20 Hz, το οποίο είναι αναμενόμενο εξαιτίας του γεγονότος ότι στην περιοχή αυτή η μονάδα αφαλάτωσης παράγει την μικρότερη ποσότητα νερού με ταυτόχρονη υψηλή κατανάλωση της αντλίας.

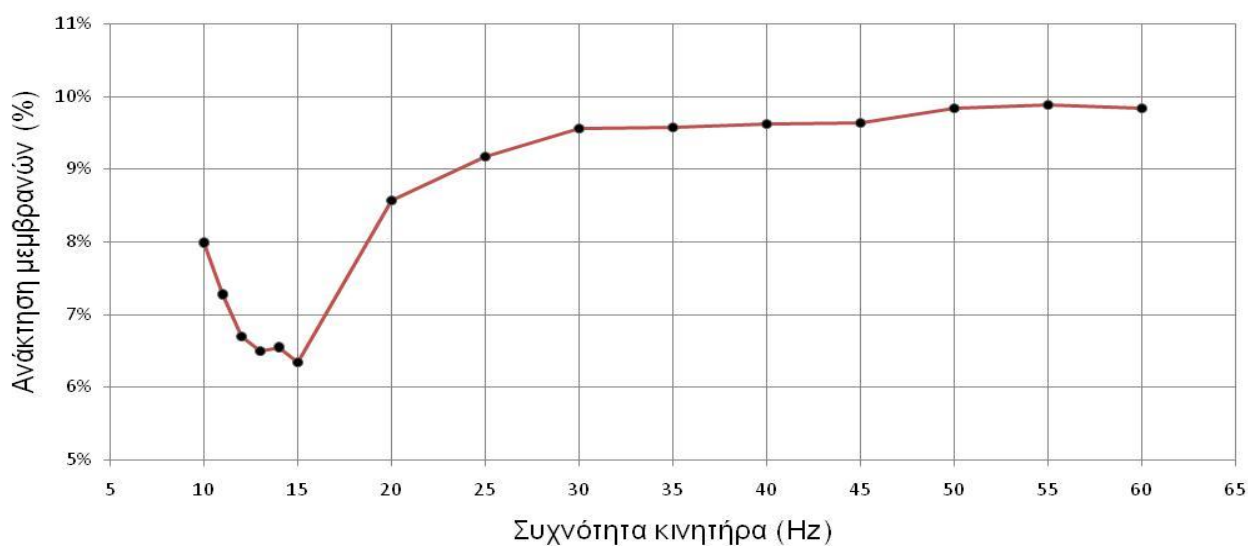


Εικόνα 8.6: Επίδραση μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στον μηχανικό βαθμό απόδοσης της αντλίας Clark και στην ειδική κατανάλωση ενέργειας

8.1.5 Το ποσοστό ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού

Ο συντελεστής ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού, ο οποίος περιγράφηκε στην εξίσωση 2, υπολογίστηκε για κάθε μεταβολή της συχνότητας του κινητήρα και παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.7. Στην εικόνα αυτή παρατηρείται ότι ο συντελεστής ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού παίρνει τις μέγιστες τιμές του από 9,5 έως 10% σε συχνότητες μεγαλύτερες των 25 Hz. Το γεγονός αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μεμβρανών.

Επίσης στην Εικόνα 8.7 φαίνεται ότι το ποσοστό ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού είναι πολύ χαμηλό στην περιοχή κάτω των 15 Hz, όπου αυξάνεται ραγδαία εξαιτίας του γεγονότος ότι η ωσμωτική πίεση αποκτά την απαιτούμενη τιμή της για να ξεκινήσει το φαινόμενο της αντίστροφης ώσμωσης. Η πίεση στην είσοδο των μεμβρανών στην περιοχή αυτή είναι κάτω από 38 bar.

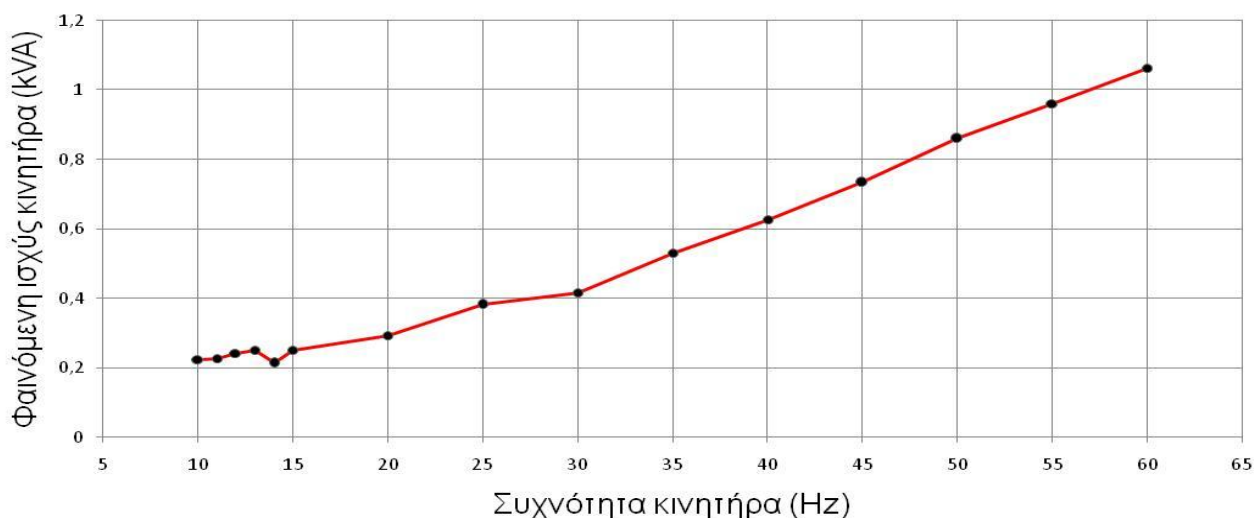


Εικόνα 8.7: Επίδραση της μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στο ποσοστό ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού.

8.1.6 Η φαινόμενη ισχύς και η ειδική κατανάλωση ενέργειας

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η ισχύς που καταναλώνει ο κινητήρας της αντλίας τροφοδοσίας είναι η ενεργός ισχύς. Η ισχύς που πληρώνουμε στην ΔΕΗ όμως είναι η φαινόμενη ισχύς και η τιμή της εξαρτάται τόσο από την ενεργό ισχύ όσο και από τον συντελεστή ισχύος ($\cos\phi$).

Στην Εικόνα 8.8 παρουσιάζεται η φαινόμενη ισχύς που καταναλώνει ο κινητήρας τροφοδοσίας, η οποία υπολογίστηκε από την εξίσωση 6 για κάθε μεταβολή της συχνότητας του κινητήρα. Στην Εικόνα 8.8 παρατηρείται επίσης ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα του κινητήρα τροφοδοσίας αυξάνεται και η φαινόμενη ισχύς, όπως είναι αναμενόμενο.

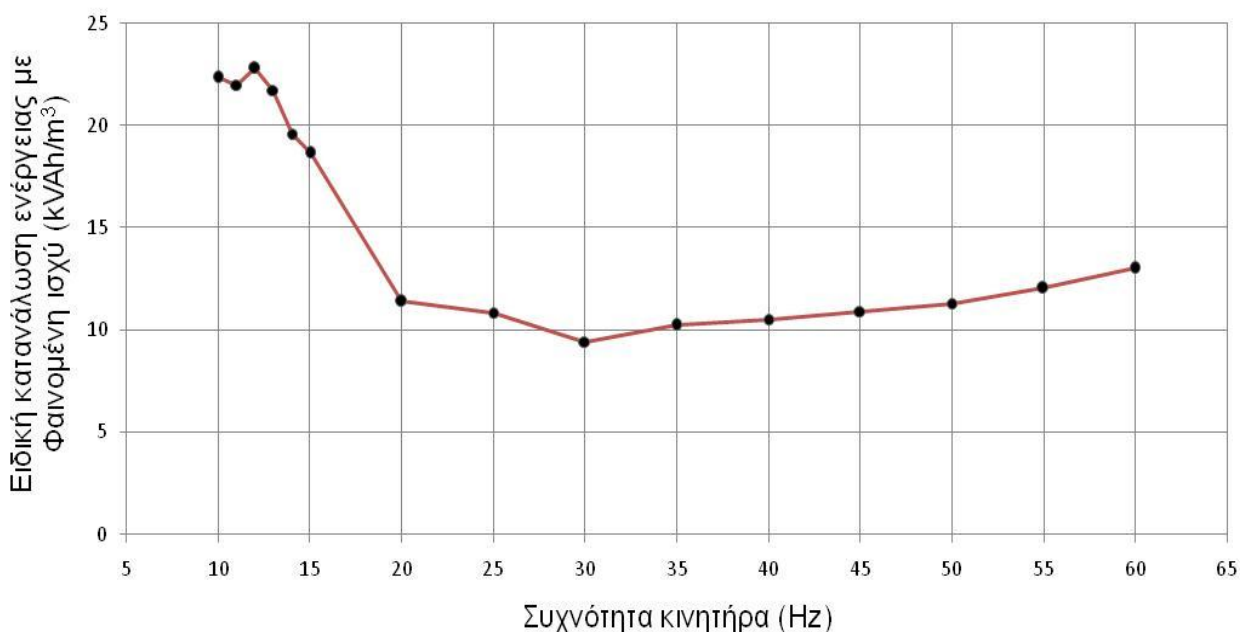


Εικόνα 8.8: Επίδραση της μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην κατανάλωση φαινόμενης ισχύος του κινητήρα τροφοδοσίας

Στην Εικόνα 8.9 απεικονίζεται η επίδραση της μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην ειδική κατανάλωση ενέργειας της μονάδας ΑΩ που προκύπτει με βάση την φαινόμενη ισχύ. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας αυτή υπολογίστηκε με βάση τις σχέσεις της φαινόμενης ισχύος (εξίσωση 6) και της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας (εξίσωση 5).

Όπως και στην καμπύλη της Εικόνας 8.6, έτσι και στην Εικόνα 8.9 φαίνεται ότι η ειδική κατανάλωση ενέργειας παρουσιάζει ελάχιστο στην περιοχή των 25 έως 45 Hz. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η παροχή του αφαλατωμένου νερού στο συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων εμφανίζει ανοδική πορεία, ενώ οι αντίστοιχες καταναλώσεις της αντλίας τροφοδοσίας δεν είναι υψηλές.

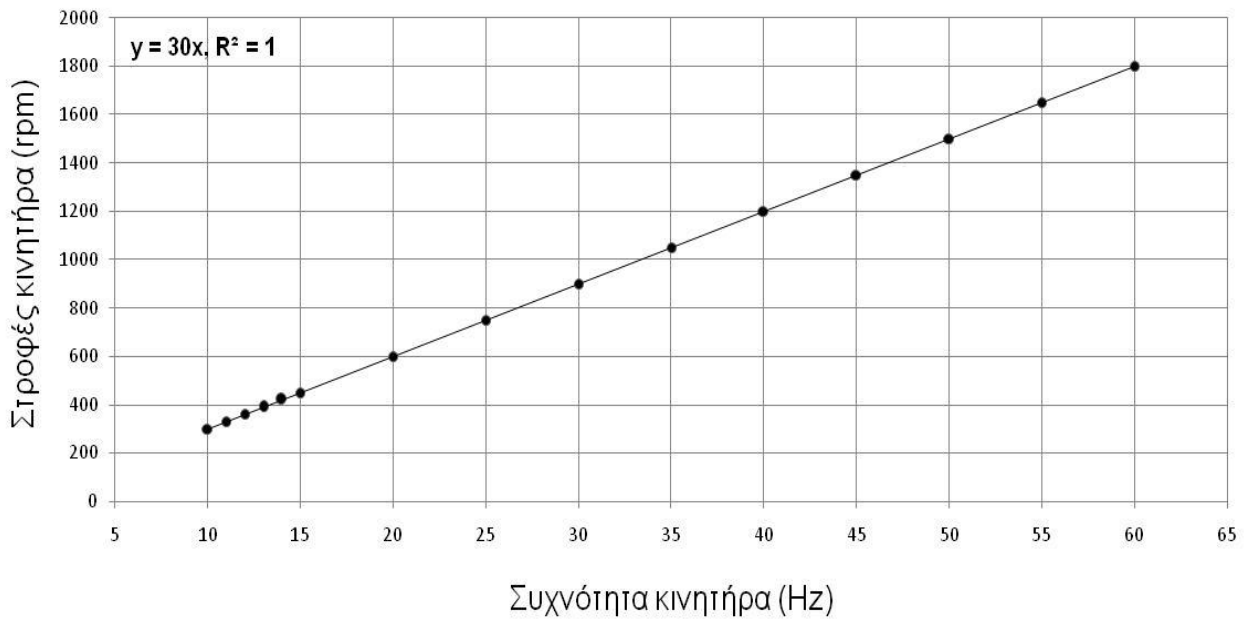
Παρατηρείται επίσης ότι οι τιμές της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας της Εικόνας 8.9 είναι υψηλότερες σε σχέση με τις τιμές της ειδικής κατανάλωσης της Εικόνας 8.6. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον χαμηλό συντελεστή ισχύος του κινητήρα τροφοδοσίας (~ 0,65). Κατά συνέπεια η χρήση ενός καλύτερου κινητήρα στην αντλία τροφοδοσίας μπορεί να μειώσει την καταναλισκόμενη ενέργεια (φαινόμενη ισχύ), μειώνοντας ταυτόχρονα και την ειδική κατανάλωση ενέργειας, λόγω του καλύτερου συντελεστή ισχύος που θα επιτευχθεί (~ 0,95).



Εικόνα 8.9: Επίδραση της μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην ειδική κατανάλωση ενέργειας φαινόμενης ισχύος

8.1.7 Στροφές του κινητήρα τροφοδοσίας

Στην Εικόνα 8.10 απεικονίζεται η επίδραση της συχνότητας στις στροφές του κινητήρα τροφοδοσίας. Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα τροφοδοσίας και τελικά της αντλίας τροφοδοσίας υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση 7 και είναι ευθέως ανάλογη με την συχνότητα λειτουργίας. Επομένως αναμένεται μια γραμμική σχέση μεταξύ της συχνότητας του κινητήρα και της ταχύτητας περιστροφής του όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.10, όπου καταγράφηκε ένας συντελεστής συσχέτισης 100%.



Εικόνα 8.10: Επίδραση της συχνότητας στις στροφές του κινητήρα τροφοδοσίας

8.2 Συμπεριφορά της μονάδας ΑΩ σε συνθήκες μεταβλητής συχνότητας του κινητήρα της αντλίας, υπό διαφορετικές θερμοκρασίες νερού τροφοδοσίας

Η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας, όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 6, είναι μία παράμετρος που επηρεάζει την λειτουργία των μεμβρανών και κατ' επέκταση την λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης.

Για τον λόγο αυτό η πειραματική διερεύνηση επεκτάθηκε με σκοπό να εξεταστεί η συμπεριφορά των διάφορων παραμέτρων λειτουργίας (πίεση, παροχή αφαλατωμένου νερού, ηλεκτρική αγωγιμότητα αφαλατωμένου και ειδική κατανάλωση ενέργειας) της μονάδας ΑΩ, σε διαφορετικές θερμοκρασίες του νερού τροφοδοσίας.

Η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας πραγματοποιήθηκε με την χρήση ενός υδατόλουτρου ως δεξαμενή τροφοδοσίας (Εικόνα 8.11). Τα πειραματικά δεδομένα, όπως η πίεση της αντλίας τροφοδοσίας, πίεση στην είσοδο των μεμβρανών, η πίεση της άλμης, η παροχή του αφαλατωμένου νερού, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού, η κατανάλωση ισχύος και ο συντελεστής ισχύος του κινητήρα τροφοδοσίας, καταγράφηκαν για θερμοκρασίες νερού τροφοδοσίας 25 °C και 30 °C αντίστοιχα και συγκρίθηκαν μεταξύ τους σε κάθε επίπεδο συχνότητας του κινητήρα τροφοδοσίας 60, 55, 50, 45, 40, 35, 30, 25, 20, 15, 14, 13, 12, 11 και 10 Hz.

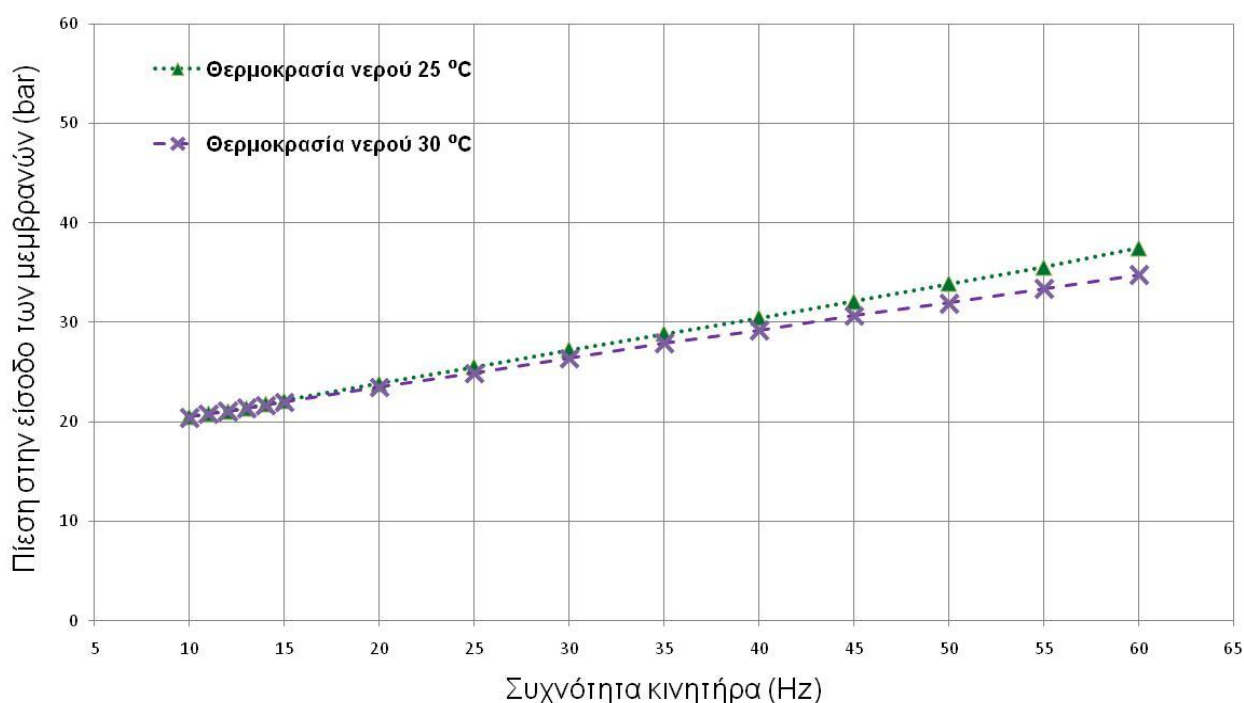


Εικόνα 8.11: Υδατόλουτρο για την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας.

8.2.1 Η πίεση στην είσοδο των μεμβρανών

Στην Εικόνα 8.12 απεικονίζονται η επίδραση μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα τροφοδοσίας στην πίεση εισόδου των μεμβρανών υπό διαφορετικές θερμοκρασίες του νερού τροφοδοσίας.

Στην Εικόνα 8.12 παρατηρείται ότι η πίεση του νερού στην είσοδο των μεμβρανών σε θερμοκρασία 30 °C είναι μικρότερη από την αντίστοιχη πίεση σε θερμοκρασία 25 °C. Το γεγονός αυτό εξηγείται με βάση την εξίσωση 3, σύμφωνα με την οποία η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την ωσμωτική πίεση του νερού τροφοδοσίας. Ταυτόχρονα, η αύξηση της ωσμωτικής πίεσης του νερού μειώνει την τελική ασκούμενη πίεση στην μεμβράνη, (Mohamed 2009).



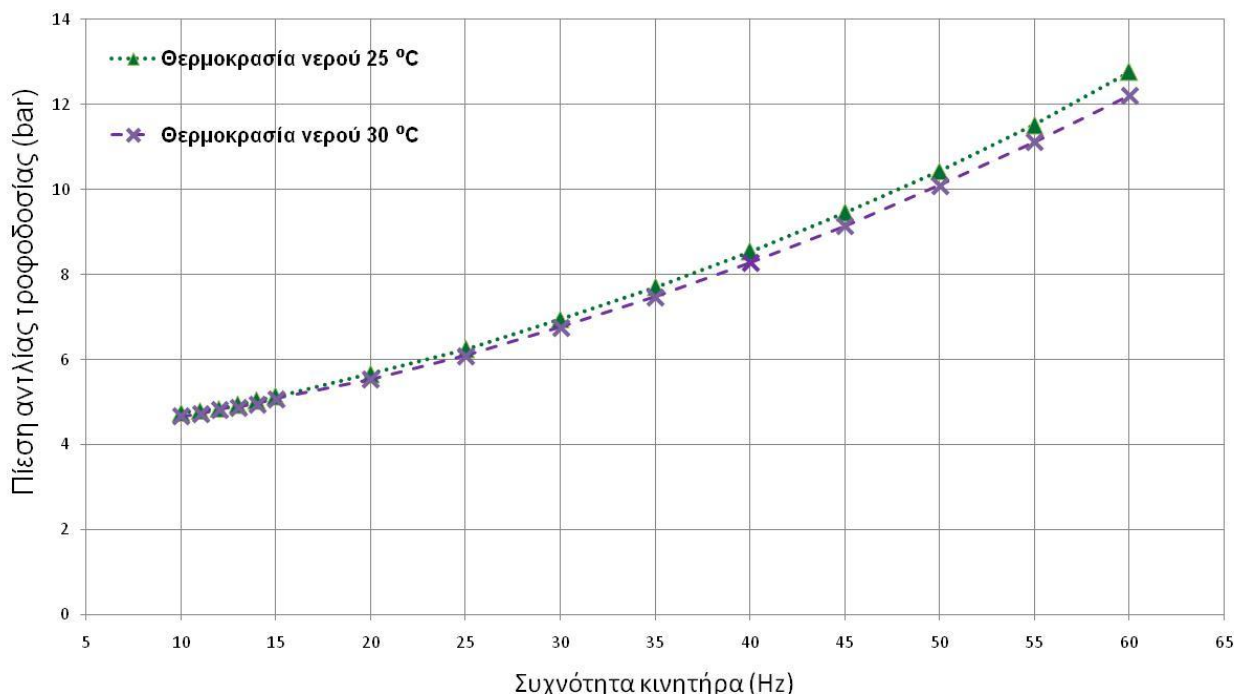
Εικόνα 8.12: Επίδραση μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην πίεση εισόδου των μεμβρανών της μονάδας ΑΩ υπό διαφορετικές θερμοκρασίες νερού τροφοδοσίας

8.2.2 Η πίεση της αντλίας τροφοδοσίας

Στην Εικόνα 8.13 απεικονίζεται η επίδραση της μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην πίεση της αντλίας τροφοδοσίας, υπό διαφορετικές θερμοκρασίες νερού.

Στην Εικόνα 8.13 παρατηρείται ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού, η πίεση της αντλίας τροφοδοσίας μειώνεται. Το γεγονός αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί με βάση το ιξώδες του νερού. Το ιξώδες ή αλλιώς ο συντελεστής εσωτερικής τριβής αποτελεί την ιδιότητα του ρευστού που αντιπροσωπεύει αντίσταση στην ροή. Αποτελεί μια χαρακτηριστική σταθερά του υλικού, της οποίας το μέτρο εξαρτάται από το είδος του ρευστού, τις διαμοριακές δυνάμεις που αναπτύσσονται ανάμεσα στα στρώματα του, τη σύστασή του και την θερμοκρασία. Κατά κανόνα στα υγρά με την άνοδο της θερμοκρασίας, το ιξώδες μειώνεται.

Ως εκ τούτου, στην Εικόνα 8.13 με την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού το ιξώδες μειώνεται και κατ' επέκταση η πίεση στην αντλία τροφοδοσίας μειώνεται.



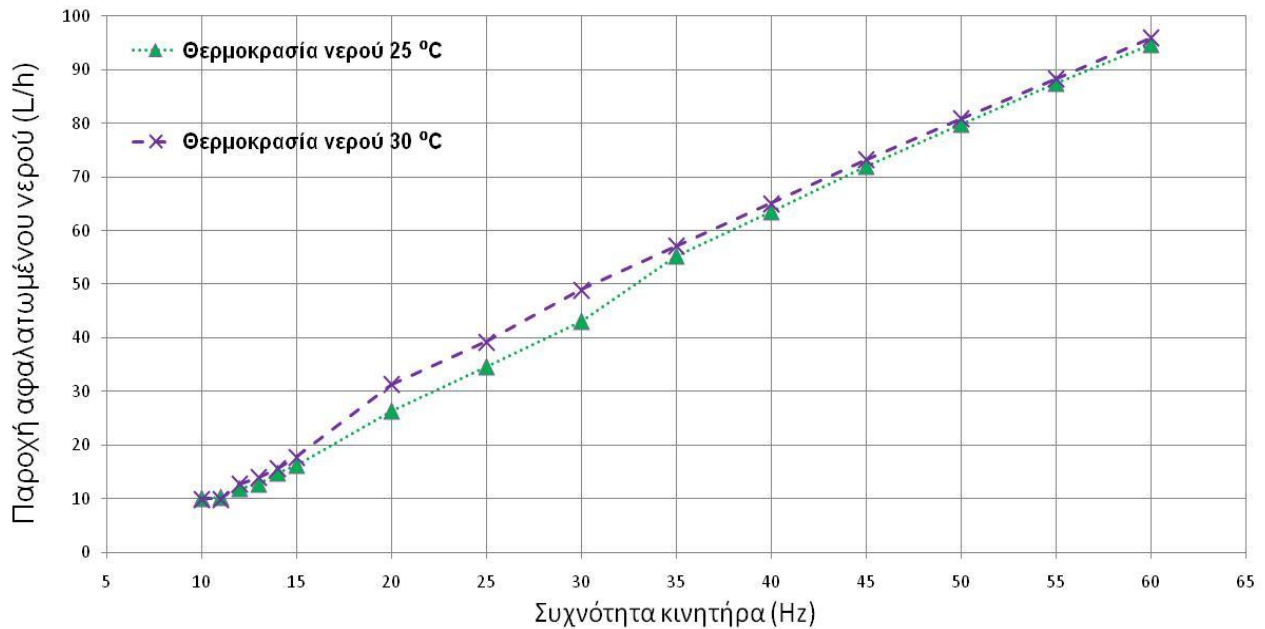
Εικόνα 8.13: Επίδραση μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην πίεση της αντλίας τροφοδοσίας της μονάδας ΑΩ υπό διαφορετικές θερμοκρασίες νερού τροφοδοσίας

8.2.3 Η παροχή του αφαλατωμένου νερού

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6 η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας αυξάνει τη ροή του αφαλατωμένου νερού κυρίως λόγω της μείωσης της πυκνότητας του νερού, (Mohamed 2009). Στην Εικόνα 6.4 απεικονίζεται η επίδραση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας στη ροή του αφαλατωμένου νερού.

Στην Εικόνα 8.14 παρουσιάζεται η επίδραση μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην παροχή του αφαλατωμένου νερού υπό διαφορετικές θερμοκρασίες του νερού τροφοδοσίας.

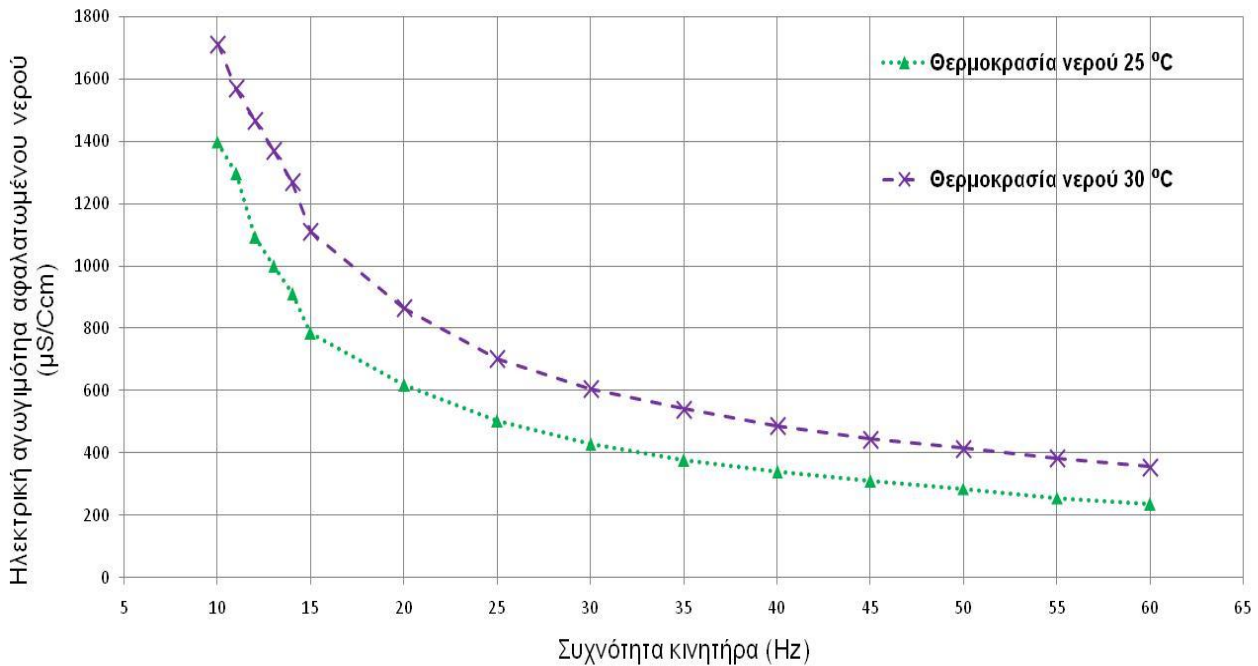
Στην εικόνα αυτή φαίνεται ότι η παροχή του αφαλατωμένου νερού στην θερμοκρασία των 30 °C είναι μεγαλύτερη από αυτή των 25 °C το οποίο είναι αναμενόμενο, όπως προαναφέρθηκε.



Εικόνα 8.14: Επίδραση μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην παροχή του αφαλατωμένου νερού υπό διαφορετικές θερμοκρασίες νερού τροφοδοσίας

8.2.4 Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού.

Στην Εικόνα 8.15 απεικονίζεται η μεταβολή της συχνότητας του κινητήρα τροφοδοσίας στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού, υπό διαφορετικές θερμοκρασίες του νερού τροφοδοσίας. Στην εικόνα αυτή παρατηρείται ότι οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην θερμοκρασία των 30 °C είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες τιμές στην θερμοκρασία των 25 °C. Το γεγονός αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί με βάση τα προαναφερόμενα στο κεφάλαιο 6, ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας μειώνει την απόρριψη των αλάτων, άρα αυξάνει την συγκέντρωση των αλάτων στο αφαλατωμένο νερό. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.4 η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας μειώνει την απόρριψη των αλάτων, δηλαδή αυξάνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού.



Εικόνα 8.15: Επίδραση μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού υπό διαφορετικές θερμοκρασίες νερού τροφοδοσίας

8.2.5 Η ειδική κατανάλωση ενέργειας

Στην Εικόνα 8.16 απεικονίζεται η επίδραση, υπό διαφορετικές θερμοκρασίες νερού τροφοδοσίας, της μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην ειδική κατανάλωση ενέργειας της μονάδας ΑΩ που προκύπτει με βάση την ενεργό ισχύ που καταναλώνει ο κινητήρας τροφοδοσίας. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση 5.

Στην Εικόνα 8.16 παρατηρείται ότι όσο η θερμοκρασία του νερού αυξάνεται η ειδική κατανάλωση ενέργειας μειώνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας αφενός αυξάνεται η παροχή του αφαλατωμένου νερού και αφετέρου μειώνεται η απορροφούμενη ενέργεια, λόγω μείωσης της πίεσης της αντλίας τροφοδοσίας (Εικόνα 8.13).

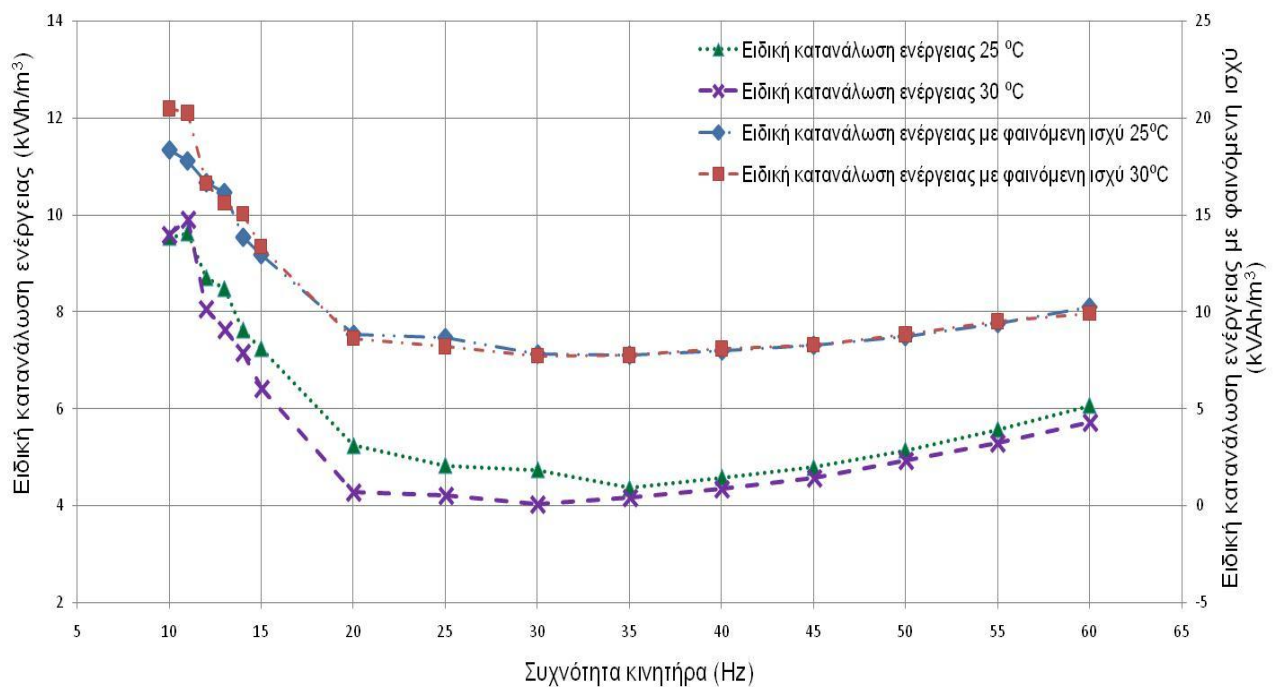
Στην ίδια εικόνα φαίνεται ότι η ειδική κατανάλωση ενέργειας εμφανίζει ελάχιστες τιμές στην περιοχή των 25 έως 45 Hz. Το γεγονός αυτό, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως (Εικόνα 8.6), οφείλεται λόγω του ότι η παροχή του αφαλατωμένου νερού στο συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων εμφανίζει ανοδική πορεία, ενώ οι αντίστοιχες καταναλώσεις του κινητήρα δεν είναι υψηλές. Κατά συνέπεια η περιοχή αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί ως βέλτιστη για την λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης υπό μερικό φορτίο.

Στην Εικόνα 8.16 εμφανίζεται επίσης η αντίστοιχη μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας της μονάδας ΑΩ που προκύπτει με βάση την φαινόμενη ισχύ που καταναλώνει ο κινητήρας τροφοδοσίας για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας νερού τροφοδοσίας. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας στην περίπτωση αυτή υπολογίστηκε με βάση τους τύπους των εξισώσεων 5 και 6.

Για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι καμπύλες της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας που προκύπτει με βάση την φαινόμενη ισχύ εμφανίζουν βέλτιστη περιοχή στις συχνότητες 25 έως 45 Hz.

Η μετατόπιση των καμπυλών της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας (με βάση την φαινόμενη ισχύ) σε σχέση με τις αντίστοιχες καμπύλες της ειδικής κατανάλωσης (με βάση την ενεργό ισχύ), που παρατηρείται στην Εικόνα 8.16, προκύπτει λόγω του χαμηλού συντελεστή ισχύος του κινητήρα (~0,65).

Από την σύγκριση των καμπυλών ειδική κατανάλωση – συχνότητα παρατηρείται ότι η ειδική κατανάλωση ενέργειας είναι μικρότερη στην βέλτιστη περιοχή λειτουργίας συχνοτήτων 25 έως 45 Hz στις θερμοκρασίες νερού 25 °C & 30 °C (Εικόνα 8.16) σε σχέση με την θερμοκρασία στους 15 °C (Εικόνες 8.6 και 8.9).



Εικόνα 8.16: Επίδραση μεταβολής της συχνότητας του κινητήρα στην ειδική κατανάλωση ενέργειας με βάση την ενεργό και την φαινόμενη ισχύ που καταναλώνει ο κινητήρας υπό διαφορετικές θερμοκρασίες νερού τροφοδοσίας

8.3 Συμπεράσματα

- Η πίεση έναρξης για την λειτουργία της μονάδας ΑΩ είναι γύρω στα 38 bar. Στο σημείο αυτό η ωσμωτική πίεση αποκτά την απαιτούμενη τιμή της για να ξεκινήσει το φαινόμενο της αντίστροφης ώσμωσης.
- Η κατώτερη θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας, για την λειτουργία μιας μονάδας ΑΩ, είναι γύρω στους 11 °C. Σημειώνεται ότι, στην θερμοκρασία αυτή θα πρέπει ο κινητήρας της αντλίας τροφοδοσίας να λειτουργεί αρχικά σε πλήρες φορτίο έτσι ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη πίεση τροφοδοσίας για την ομαλή λειτουργία της μονάδας.
- Η λειτουργία της μονάδας ΑΩ σε απομακρυσμένες περιοχές, οι οποίες εξυπηρετούνται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή από συνδυασμό αυτών, όπως μία τοπολογία μικροδικτύου πολυπαραγωγής, ενδείκνυται να γίνεται υπό μερικό φορτίο με την χρήση ρυθμιστή στροφών (inverter).
- Κατά την λειτουργία υπό μερικό φορτίο της μονάδας ΑΩ, η οποία τροφοδοτείται από ένα μικροδίκτυο, παρατηρείται μια βέλτιστη περιοχή λειτουργίας, κατά την οποία το παραγόμενο νερό είναι αποδεκτής ποιότητας (<1000 μS/cm) και ταυτόχρονα απαιτείται μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Η βέλτιστη αυτή περιοχή κυμαίνεται από 25 έως 45 Hz. Οι πιέσεις στην περιοχή αυτή κυμαίνονται από 41 έως 52 bar αντίστοιχα.
- Η μονάδα αφαλάτωσης με νερό τροφοδοσίας 25 °C παράγει πόσιμο νερό καλύτερης ποιότητας και μεγαλύτερης παροχής. Ομοίως η ειδική κατανάλωση ενέργειας είναι μικρότερη στην βέλτιστη περιοχή λειτουργίας συχνοτήτων 25 έως 45 Hz.
- Η χρήση ενός πιο σύγχρονου κινητήρα στην αντλία τροφοδοσίας μπορεί να μειώσει την καταναλισκόμενη ενέργεια (φαινόμενη ισχύ), μειώνοντας ταυτόχρονα και το κόστος του παραγόμενου νερού, λόγω του καλύτερου συντελεστή ισχύος που θα επιτευχθεί (~ 0,95).
- Σε μία απομακρυσμένη περιοχή που οι ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας και πόσιμου νερού καλύπτονται από ένα μικροδίκτυο, η μονάδα ΑΩ θα μπορεί να λειτουργεί σε μερικό φορτίο (25 ~ 45 Hz) τις ώρες αιχμής της ηλεκτρικής ενέργειας και σε πλήρες φορτίο τις υπόλοιπες ώρες που η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από την περιοχή είναι περιορισμένη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abdul - Fattah, A. F. (1987), Use of low grade in driving small freezing units for desalination, *Desalination*, 61, 169.
- Al - Mutaz, I. S. (2003), Coupling of a nuclear reactor to hybrid RO - MSF desalination plants, *Desalination*, 157, 259.
- Ameri, M., S. S. Mohammadi, M. Hosseini, and M. Seifi (2009), Effect of design parameters on multi – effect desalination system specifications, *Desalination*, 245, 266.
- A.M.K. El – Ghonemy (2012), Water Desalination systems powered by renewable energy sources: Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 1537 – 1556.
- Aybar, H. S. (2002), Analysis of a mechanical vapor compression desalination system, *Desalination*, 142, 181.
- Bahar, R., M. N. A. Hawlader, and L. S. Woei (2004), Performance evaluation of a mechanical vapor compression desalination system, *Desalination*, 166, 123.
- Belessiotis, V., K. Voropoulos, and E. Delyannis (1995), Experimental and theoretical method for the determination of the daily output of a solar still: input – output method, *Desalination*, 100, 99.
- Cheng, C. Y., W. C. Cheng, and M. D. Yang (1987), The vacuum freezing multiple phase transformation process, *Desalination*, 67, 139.
- Danfoss (2012), Danfoss high pressure pumps for RO systems, <http://www.danfoss.com/>, (Access date: May 2012).
- DOW (2012), FILMTEC Membranes Design Equations and Parametrs, <http://www.dow.com/>, (Access date: April 2012).
- Dupont (1992), Permasep Products Engineering Manual, Wilmington.
- EcoHydro Solutions (2012), Desalination systems for industries and Green Energy products, <http://www.ecohydrosolutions.com/>, (Access date: May 2012)

- Fournier, J., J. L. Grange, and S. Vergara (1974), Water desalination by natural freezing, *Desalination*, 15, 167.
- Hellmann, D. H., H. Rosenberger, and E. F. Tusel (2001), Saving of energy and cost in seawater desalination with speed controlled pumps, *Desalination*, 139, 7.
- Kyriakarakos, G., I. Dounis, K. Arvanitis, and G. Papadakis (2012), A fuzzy cognitive maps – perti nets energy management system for autonomous polygeneration microgrids, *Applied Soft Computing*, Available online 27 February 2012.
- Kyriakarakos, G., I. Dounis, S. Rozakis, and K. Arvanitis (2011), Polygeneration microgrids: A viable solution in remote areas for supplying power, potable water and hydrogen as transportation fuel, *Applied Energy*, 88, 4517 – 4526.
- Liu, C. C. K., W. Xia, and J. W. Park (2007), A wind – driven reverse osmosis system for aquaculture wastewater reuse and nutrient recovery, *Desalination*, 202, 24.
- Loupassis, S. (2002), Technical analysis of exciting RES desalination systems. Renewable energy driven desalination systems.
- MacHarg, J. P. (2001), Exchanger Tests Verify 2.0 kWh/m³ SWRO Energy use., *International Desalination and Water Reuse Quarterly*, 11, 42 – 46.
- MacHarg, J. P. (2002), The Evolution of SWRO Energy - Recovery Systems. , *International Desalination and Water Reuse Quarterly*, 11, 48 – 53.
- Markvart, T. (2006), Microgrids: Power Systems for the 21st Century?, *Refocus*, 7, 44 – 48.
- Mathioulakis, E., V. Belessiotis, and E. Delyannis (2007), Desalination by using alternative energy: Review and state – of – th – art, *Desalination*, 203, 346.
- Miranda, M., and D. Infield (2002), A wind – powered seawater reverse osmosis system without batteries, *Desalination*, 153, 9 – 16.
- Mohamed, E. S., and G. Papadakis (2003), Design simulation and economic analysis of a stand – alone reverse osmosis desalination unit powered by wind turbines and photovoltaics, *Desalination*, 164, 87 – 97.

- Mohamed, E. S., G. Papadakis, E. Mathioulakis, and V. Belessiotis (2005), The effect of hydraulic energy recovery in a small sea water reverse osmosis desalination system; experimental and economical evaluation, *Desalination*, 184, 241 – 246.
- Mohamed, E. S., G. Papadakis, E. Mathioulakis, and V. Belessiotis (2006), An experimental comparative study of the technical and economic performance of a small reverse osmosis desalination system equipped with an hydraulic energy recovery unit, *Desalination*, 194, 239-250.
- Mohamed, E. S., G. Papadakis, E. Mathioulakis, and V. Belessiotis (2008), A direct coupled photovoltaic seawater reverse osmosis desalination system toward battery based systems – a technical and economical experimental comparative study, *Desalination*, 221, 17-22.
- Mohamed, E. S. (2009), Διερεύνηση τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για αφαλάτωση θαλασσινού νερού με αντίστροφη ώσμωση., Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.
- Nisan, S., and N. Benzarti (2008), A comprehensive economic evaluation of integrated desalination systems using fossil fuelled and nuclear energies and including their environmental costs, *Desalination*, 229, 125.
- Nisan, S., and S. Dardour (2007), Economic evaluation of nuclear desalination systems, *Desalination*, 205, 231.
- Rice, W., and D. S. C. Chau (1997), Freeze desalination using hydraulic refrigerant compressors, *Desalination*, 109, 157.
- Spectra Watermakers (2012), Spectra Water makers Clark pump ERD, <http://www.spectrawatermakers.com/>, (Access date: May 2012).
- Thomson, M. (2003), Reverse – Osmosis Desalination of Seawater Powered by Photovoltaics without Batteries, A Doctoral Thesis, 242 pp, Loughborough, Loughborough.
- Thomson, M., and M. Miranda (2000), Theory testing and modeling of a Clark pump, Loughborough University of Technology, Loughborough.

- Thomson, M., M. S. Miranda, and D. Infield (2003), A small – scale seawater reverse – osmosis system with excellent energy efficiency over a wide operating range, *Desalination*, 153, 229.
- Tzen, E. (2010), Wind Desalination, Promotion of Renewable Energy for Water production through Desalination, <http://www.cres.gr/kape/publications>.
- Tzen, E. (2010), Solar Thermal Desalination, Promotion of Renewable Energy for Water production through Desalination, <http://www.cres.gr/kape/publications>.
- Tzen, E., and R. Morris (2003), Renewable Energy Sources for Desalination, *Solar Energy*, 75, 375 – 379.
- Tzen, E., D. Theofiloyanagos, and Z. Kologios (2008), Autonomous reverse osmosis units driven by RE sources experiences and lessons learned, *Desalination*, 221, 29 – 36.
- Wilf, M. (2007), *Membrane Desalination Technology*, Balaban Desalination Publications, ISBN 0-86689-065-3, La Aquila – Italy.
- Water Reverse Osmosis Energy Recovery Systems (2012), High efficiency pumps for RO systems, <http://www.energy-recovery/>, (Access date: May 2012)
- Αυλωνίτης, Σ. Α. (2006), Εισαγωγή στην τεχνολογία νερού και αφαλάτωσης 1st ed., 330 – 333 pp., Εκδόσεις “ΙΩΝ” Στέλλα Παρίκου & ΣΙΑ Ο.Ε., ISBN 960-411-562-6, Αθήνα.
- Δεληγιάννη, Ε., και Μπελεσιώτης (1995), Μέθοδοι και Συστήματα Αφαλάτωσης, Αθήνα
- Καραχάλιου, Π. (2010), Τεχνολογίες Αφαλάτωσης και Προοπτικές Εφαρμογής στον Ελληνικό χώρο., Διπλωματική εργασία Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών, “Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων”, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Μανωλάκος, Δ. (2006), Σχεδιασμός και πειραματική αξιολόγηση αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης με ηλιακό οργανικό κύκλο Rankine, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.

- Νικητάκος, Ν. (2008), Ανάπτυξη Ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο Θαλάσσιο Περιβάλλον., <http://www.seetha.gr/arthra-tes-seetha/arthra-tou-seetha/anaptuxe-ananeosimon-pegon-energeias-sto-thalassio-periballon.html>, (Access date: February 2012).
- Παλιεράκης, Γ. (2007), Αφαλάτωση με χρήση ηλιακών συλλεκτών, Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Παπαδάκης, Γ. (2009), Desalination and renewable energy sources, RES and energy saving in islands, πρακτικά συνεδρίου “ Στο δρόμο για την πράσινη ανάπτυξη”, 23 – 25/10/2009, Μήλος, Ελλάδα.
- Τζανάκη, Σ. Α. (2010), Μονάδες αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση – τεχνική περιγραφή και κριτήρια χωροθέτησης, Διπλωματική Εργασία, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- Τζεν, Ε. (2010), Αφαλάτωση η λύση στη λειψυδρία., Ημερίδα “Αειφόρος Ανάπτυξη των νησιών του Αιγαίου: Βιώσιμη Διαχείριση Υδατικών Πόρων”, 19/6/2010, Σύρος.
- Τζεν, Ε. (2008), Τεχνολογίες αφαλάτωσης για την παραγωγή πόσιμου νερού., The Economist Tech Bang, 55, 92 – 93.
- Τζεν, Ε. (2001), Μέθοδοι αφαλάτωσης – Συγκριτική Αξιολόγηση και Εφαρμογές στα νησιά του Αιγαίου., Συμπόσιο “Αιγαίο – Νερό – Βιώσιμη Ανάπτυξη”, Πάρος, 6 – 7/7/2001.