



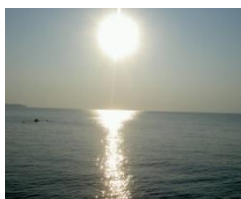
**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ  
ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ  
ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΓΙΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ  
ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ**

***ΕΣΣΑΜ ΣΑΑΜΠΑΝ ΜΩΧΑΜΕΝΤ***

***ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ***



***ΑΘΗΝΑ 2009***

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ  
ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΓΙΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ  
ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ**

***ΕΣΣΑΜ ΣΑΑΜΠΑΝ ΜΩΧΑΜΕΝΤ***

***ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ***

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

Γ. Παπαδάκης, Επιβλέπων, Καθηγητής

Δ. Ασημακόπουλος, Καθηγητής, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής,

Ε. Μαθιουλάκης, Ερευνητής Α, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής,

Σ. Μανιάς, Καθηγητής

Δ. Παπαντώνης, Καθηγητής

Σ. Ροζάκης, Επικ. Καθηγητής

Θ. Τσούτσος, Επικ. Καθηγητής

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε σε συνεργασία με το



**ΕΘΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΕΡΕΥΝΑΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
"ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ"**

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ  
ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ (ΙΠΤΑ)  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΙΑΚΩΝ & ΑΛΛΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

*Στη μητέρα μου, στον πατέρα μου, στη γυναίκα μου και στα παιδιά μου*





## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πραγματικά κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διδακτορικής διατριβής, γνώρισα αξιόλογους επιστήμονες, αλλά και κυρίως, ξεχωριστούς ανθρώπους. Πιστεύω ακράδαντα, ότι οφείλω να ευχαριστήσω όλους αυτούς που με βοήθησαν, στήριξαν και με ενθάρρυναν.

Ξεκινώντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, τον καθηγητή κ. Γ. Παπαδάκη, για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφερε, κατά τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος, αλλά και τις πολλές και διάφορες ευκαιρίες για τη συμμετοχή μου σε πολλά διεθνή και εθνικά συνέδρια, καθώς και ευρωπαϊκά και εθνικά ερευνητικά έργα, βοηθώντας μου έτσι, να αποκτήσω αρκετή εμπειρία και γνώση. Επίσης πολύ σημαντικό ρόλο στην επιστημονική μου πορεία μέχρι τώρα, έχει διαδραματίσει ο διευθυντής του εργαστηρίου Ηλιακών και άλλων ενεργειακών συστημάτων, ο Δρ. Β. Μπελεσιώτης, από τότε που ήταν στην τριμελή επιτροπή, της μεταπτυχιακής μου εργασίας. Ο κ. Μπελεσιώτης μου έδωσε την ευκαιρία να είμαι και για τέσσερα χρόνια υπότροφος του μεγάλου αυτού ερευνητικού κέντρου, 'ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ'. Τον ευχαριστώ, επίσης, για τις πολύτιμες και συνεχόμενες συμβουλές του, και κυρίως για τη στήριξη στις δύσκολες στιγμές. Από τον ίδιο εργαστήριο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα ερευνητή της διδακτορικής μου διατριβής, το Δρ. Μ. Μαθιουλάκη, ο οποίος μου προσέφερε ανεκτίμητες γνώσεις, κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής. Ο κ. Μαθιουλάκης υπήρξε δάσκαλος, επιβλέπων, αλλά κυρίως φίλος. Τον ευχαριστώ και για τη μεγάλη υπομονή και κατανόηση. Οφείλω να ευχαριστήσω και τον κ. Σ. Ροζάκη, Επικ. Καθηγητή, για τη μεγάλη βοήθεια στα οικονομικά του συστήματος.

Στην όλη επιστημονική μου πορεία, υπήρχαν πολλοί άνθρωποι που με βοήθησαν αρκετά. Αναφέρω εδώ χρονολογικά το κ. Α. Φατούρο, πρώην διευθυντή του Ινστιτούτου Γεωπονικών Επιστημών, ο οποίος ήταν ο πρώτος που με ενθάρρυνε να συνεχίσω μεταπτυχιακές σπουδές στην Ελλάδα, και για τον ίδιο λόγο ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Γ. Λαμπρινό, που με προσέφερε πολύτιμες πληροφορίες αλλά και γνώσεις. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το καθηγητή του ΕΜΠ τον κ. Σ. Μανιά, που μου παραχώρησε το εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών για να εκτελεστούν τα εργαστηριακά πειράματα. Ευχαριστώ επίσης, το Δρ. Γασσάν ΚΟΥΣΑΤΖΗ για τις πολύτιμες συμβουλές του.

Ευχαριστώ όλους τους συναδέλφους, κ. Γερονικολού, κ. Κυριακαράκο, κ. Μπαλαφούτη, κ. Βουλγαράκη, κ. Μανωλάκο, κα. Λαμνάτου και κ. Tchanche.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ, για την οικονομική ενίσχυση, αναφορικά με την εκπόνηση της διδακτορικής μου διατριβής.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|   |       |
|---|-------|
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....   | III   |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ .....  | XI    |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ .....  | XV    |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....   | XVII  |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....   | XXV   |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....  | XXVII |
| ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ .....  | XXIX  |
| ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....  | 1     |
| ABSTRACT .....  | 5     |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....  | 7     |
| 1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....   | 13    |
| 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....  | 13    |
| 1.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ .....  | 13    |
| 1.2.1 Η απόσταξη .....  | 13    |
| 1.2.1.1 Εξάτμιση με πολλαπλές βαθμίδες (Multiple - Effect – Evaporation ή ME) .....                             | 14    |
| 1.2.1.2 Πολυβάθμια εκρηκτική εξάτμιση ή πολυβάθμιος εκτόνωση. (Multi - Stage - Flash - Evaporation ή MSF) ..... | 14    |
| 1.2.1.3 Εξάτμιση με επανασυμπύεση ατμών (Vapor Compression - VC) .....  | 15    |
| 1.2.1.4 Αφαλάτωση με ύγρανσης – αφύγρανσης (Humidification – Dehumidification - HD) .....                       | 16    |
| 1.2.2 Η Ιοντικές μέθοδοι .....  | 16    |
| 1.2.2.1 Μέθοδοι εναλλαγής Ιόντων .....  | 16    |
| 1.2.2.2 Ηλεκτροδιάλυση (Electro Dialysis ή ED) .....  | 17    |
| 1.2.3 Αφαλάτωση με ψύξη (Freezing process) .....  | 18    |
| 1.2.4 Απόσταξη με μεμβράνες (Membrane Distillation) .....   | 18    |
| 1.2.5 Η Αντίστροφη Ωσμωση .....   | 19    |
| 1.2.5.1 Η ώσμωση και ωσμωτική πίεση .....   | 19    |
| 1.2.5.2 Η διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης .....   | 20    |
| 1.2.5.3 Οι Μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης .....  | 20    |
| 1.2.5.4 Στοιχεία μεμβρανών (modules) .....  | 21    |
| 1.3 ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ .....   | 27    |
| 1.3.1 Εισαγωγή .....  | 27    |
| 1.3.2 Συμβατικές πηγές ενέργειας .....  | 27    |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1.3.3   | Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αφαλάτωση .....  | 29 |
| 1.3.3.1 | Συστήματα αφαλάτωσης με ανεμογεννήτριες .....  | 30 |
| 1.3.3.2 | Συστήματα αφαλάτωσης με φωτοβολταϊκά .....   | 32 |
| 1.3.3.3 | Συστήματα αφαλάτωσης με θερμική ηλιακή ενέργεια .....  | 35 |
| 1.3.3.4 | Υβριδικά συστήματα ΑΠΕ για αφαλάτωση .....   | 36 |
| 1.3.3.5 | Αφαλάτωση με γεωθερμική ενέργεια .....   | 36 |
| 1.3.3.6 | Αφαλάτωση με ενέργεια από βιομάζα .....  | 37 |
| 1.3.3.7 | Αφαλάτωση με χρήση τη ενέργεια από τους ωκεανούς .....                                       | 37 |
| 1.4     | ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΩ (ΑΝΑΚΤΗΤΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ) .....                          | 38 |
| 1.4.1   | Συμβατικά συστήματα ανάκτηση ενέργειας .....   | 38 |
| 1.4.2   | Νέα συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας στην ΑΩ .....  | 39 |
| 1.5     | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗΣ .....  | 42 |
| 2.      | ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ .....           | 47 |
| 2.1     | ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....   | 47 |
| 2.2     | ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΩ .....   | 47 |
| 2.2.1   | Σύστημα προ-επεξεργασίας .....   | 48 |
| 2.2.2   | Το κυρίως σύστημα αφαλάτωσης ΑΩ .....  | 50 |
| 2.2.3   | Σύστημα μετ-επεξεργασίας .....   | 51 |
| 2.3     | ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ ΑΩ .....  | 52 |
| 2.3.1   | Ισοζύγιο μάζας .....   | 52 |
| 2.3.2   | Ανάκτηση αφαλατωμένου νερού .....  | 53 |
| 2.3.3   | Συντελεστής συμπίκνωσης .....  | 53 |
| 2.3.4   | Η ωσμωτική πίεση .....   | 53 |
| 2.3.5   | Συντελεστής συγκράτησης .....  | 54 |
| 2.3.6   | Διαπερατότητα .....  | 54 |
| 2.4     | ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ .....                                  | 54 |
| 2.4.1   | Επίδραση της πίεσης .....  | 54 |
| 2.4.2   | Επίδραση της θερμοκρασίας .....  | 56 |
| 2.4.3   | Επίδραση της συγκέντρωσης των αλάτων του νερού τροφοδοσίας .....                             | 57 |
| 2.4.4   | Επίδραση του βαθμού ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού .....                                   | 58 |
| 2.4.5   | Επίδραση pH .....  | 59 |
| 2.5     | ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΥΠΑΡΧΟΝΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ ..... | 60 |
| 2.6     | ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΩ .....  | 63 |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| 2.6.1    | Χαρακτηριστικά μεγέθη αντλιών θετικής μετατόπισης .....   | 63  |
| 2.6.1.1  | Κανονική (ονομαστική) πίεση λειτουργίας.....  | 64  |
| 2.6.1.2  | Κανονικός αριθμός στροφών .....   | 65  |
| 2.6.1.3  | Θεωρητική παροχή.....   | 65  |
| 2.6.1.4  | Πραγματική παροχή.....  | 65  |
| 2.6.1.5  | Διαρροή .....   | 65  |
| 2.6.1.6  | Θεωρητική ισχύς.....  | 65  |
| 2.6.1.7  | Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης.....   | 66  |
| 2.6.1.8  | Μηχανικός βαθμός απόδοσης .....   | 66  |
| 2.6.1.9  | Ολικός βαθμός απόδοσης.....   | 66  |
| 2.6.1.10 | Κίνηση των αντλιών .....  | 66  |
| 2.6.2    | Χαρακτηριστικά δυναμικών αντλιών.....   | 67  |
| 2.7      | ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΝΑΚΤΗΤΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....                                      | 68  |
| 2.7.1    | Ισολογισμός παροχής της αντλίας Clark .....   | 70  |
| 2.7.2    | Ισολογισμός της πίεσης της αντλίας Clark.....   | 70  |
| 2.7.3    | Ισολογισμός ισχύος .....  | 71  |
| 2.7.4    | Ογκομετρική απόδοση της Clark.....  | 71  |
| 2.7.5    | Η μηχανική απόδοση της Clark.....   | 71  |
| 2.7.6    | Ολική απόδοση της αντλίας.....  | 71  |
| 2.8      | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....  | 72  |
| 3.       | ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ..... | 75  |
| 3.1      | ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....  | 75  |
| 3.2      | ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΩ (ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΑΠΕ) .....          | 75  |
| 3.2.1    | Δεδομένα και υποθέσεις σχεδιασμού .....   | 76  |
| 3.2.2    | Αποτελέσματα του σχεδιασμού .....   | 76  |
| 3.3      | ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΩ (ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΑΠΕ) .....                        | 80  |
| 3.4      | ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΩ .....  | 85  |
| 3.5      | ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΩ.....                               | 88  |
| 3.5.1    | Παραγωγή αφαλατωμένου νερού και άλμης .....   | 88  |
| 3.5.2    | Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού .....  | 90  |
| 3.5.3    | Κατανάλωση ενέργειας του συστήματος .....   | 91  |
| 3.5.4    | Κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της συμβατικής μονάδας με ΑΠΕ .....                              | 92  |
| 3.6      | ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΩ .....  | 100 |
| 3.6.1    | Σχεδιασμός της Φ/Β συστοιχίας .....   | 101 |
| 3.6.2    | Περιγραφή του πρωτότυπου τροποποιημένου συστήματος.....   | 104 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.6.2.1 Η Φ/Β συστοιχία , συσσωρευτές και ο ρυθμιστής φόρτισης .....   | 104 |
| 3.6.2.2 Το σύστημα της ανεμογεννήτριας .....   | 106 |
| 3.6.2.3 Η τροποποιημένη μονάδα αφαλάτωσης .....  | 107 |
| 3.6.2.4 Τα πρόσθετα όργανα μέτρησης της τροποποιημένης μονάδας .....   | 108 |
| 3.6.3 Περιγραφή λειτουργίας του τροποποιημένου συστήματος .....  | 112 |
| 3.7 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΡ .....  | 113 |
| 3.8 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΩ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ .....  | 118 |
| 3.9 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΩ.....  | 124 |
| 3.10 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΩ ΜΕ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΚΑΙ Φ/Β ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ.....   | 128 |
| 3.10.1 Λειτουργία του ρυθμιστή φόρτισης .....  | 128 |
| 3.11 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΩ ΜΕ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΗ Φ/Β ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ .....  | 134 |
| 3.12 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΩ ΜΕ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΗΣ Φ/Β ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΜΕΣΩ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ<br>ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ ΤΑΣΗΣ .....                        | 138 |
| 3.13 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΩ ΜΕ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΚΑΙ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ .....   | 142 |
| 3.14 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....  | 144 |
| 3.15 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....  | 144 |
| 4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....  | 149 |
| 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....   | 149 |
| 4.2 Το λογισμικό TRNSYS ΩΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ .....   | 149 |
| 4.3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ .....  | 151 |
| 4.3.1 Υπολογισμός της ροής του αφαλατωμένου νερού .....  | 151 |
| 4.3.1.1 Υπολογισμός της πίεσης και της ροής της άλμης .....  | 152 |
| 4.3.2 Υπολογισμός του συντελεστή ανάκτηση του αφαλατωμένου νερού .....   | 152 |
| 4.3.3 Υπολογισμός της συγκέντρωσης των αλάτων στο αφαλατωμένο νερό.....  | 153 |
| 4.3.3.1 Επικύρωση του μοντέλου της μεμβράνης .....   | 155 |
| 4.4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ - ΚΙΝΗΤΗΡΑ .....   | 158 |
| 4.5 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ CLARK .....  | 164 |
| 4.6 ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΟ TRNSYS.....   | 167 |
| 4.7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟ TRNSYS.....   | 168 |
| 4.7.1 Τοπολογία 1 – σύνδεση τη Φ/Β συστοιχία με τη μονάδα ΑΩ μέσω των συσσωρευτών<br>και ρυθμιστή φόρτισης.....                          | 172 |
| 4.7.2 Τοπολογία 2 – σύνδεση τη Φ/Β συστοιχία και την ανεμογεννήτρια με τη μονάδα ΑΩ<br>μέσω των συσσωρευτών και ρυθμιστών φόρτισης ..... | 175 |
| 4.7.3 Τοπολογία 3 – Απευθείας σύνδεση τη Φ/Β συστοιχίας με τη μονάδα ΑΩ μέσω<br>μετατροπέα υποβιβασμού τάσης .....                       | 179 |
| 4.7.4 Τοπολογία 4 – Απευθείας σύνδεση της Φ/Β συστοιχίας με τη μονάδα ΑΩ.....  | 182 |
| 4.7.5 Τοπολογία 5 – Σύνδεση της μονάδας ΑΩ με ανεμογεννήτρια και συσσωρευτές .....   | 185 |

|       |   |            |
|-------|---|------------|
| 4.8   | ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....                 | 189        |
| 4.9   | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....  | 192        |
| 5     | ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ / ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....  | 197        |
| 5.1   | ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....  | 197        |
| 5.2   | ΓΕΝΙΚΕΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ.....  | 197        |
| 5.2.1 | <i>Το κεφάλαιο ή η αρχική επένδυση .....</i>  | <i>197</i> |
| 5.2.2 | <i>Τόκος .....</i>  | <i>198</i> |
| 5.2.3 | <i>Κεφαλαιοποίηση.....</i>  | <i>198</i> |
| 5.2.4 | <i>Παρούσα αξία (Present Value, PV).....</i>  | <i>198</i> |
| 5.2.5 | <i>Η καθαρή παρούσα αξία ως κριτήριο αξιολόγησης της επένδυσης (Net Present Value NPV ή ΚΠΑ) .....</i>      | <i>199</i> |
| 5.2.6 | <i>Το ισοδύναμο σταθερό ετήσιο κόστος.....</i>  | <i>200</i> |
| 5.3   | ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΚΑΘΟΡΙΖΟΥΝ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΤΟΥ ΑΦΑΛΑΤΩΜΕΝΟΥ ΝΕΡΟΥ .....  | 200        |
| 5.3.1 | <i>Μέγεθος της μονάδας αφαλάτωσης (οικονομία κλίμακας) .....</i>  | <i>200</i> |
| 5.3.2 | <i>Ο συντελεστής διαθεσιμότητας.....</i>  | <i>200</i> |
| 5.3.3 | <i>Είδος μεθόδου αφαλάτωσης .....</i>   | <i>201</i> |
| 5.3.4 | <i>Κόστος συστήματος τροφοδοσίας .....</i>  | <i>201</i> |
| 5.3.5 | <i>Κόστος ενέργειας .....</i>   | <i>201</i> |
| 5.3.6 | <i>Είδος νερού τροφοδοσίας .....</i>  | <i>201</i> |
| 5.3.7 | <i>Είδος αφαλατωμένου νερού .....</i>   | <i>202</i> |
| 5.3.8 | <i>Τρόπος διαχείρισης της άλμης .....</i>   | <i>202</i> |
| 5.4   | ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ .....   | 202        |
| 5.5   | ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ.....  | 207        |
| 5.6   | ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ - ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ (RISK MANAGEMENT) ..... | 209        |
| 5.6.1 | <i>Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της VaR.....</i>   | <i>210</i> |
| 5.6.2 | <i>Μέθοδος ιστορικής προσομοίωσης.....</i>  | <i>210</i> |
| 5.6.3 | <i>Προσομοίωση Monte Carlo.....</i>   | <i>210</i> |
| 5.7   | ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ MONTE CARLO ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ..... | 212        |
| 5.7.1 | <i>Οικονομική αξιολόγηση της τοπολογίας 1 .....</i>   | <i>214</i> |
| 5.7.2 | <i>Οικονομική αξιολόγηση της τοπολογίας 2 .....</i>   | <i>215</i> |



|   |     |
|---|-----|
| 5.7.3 Οικονομική αξιολόγηση της τοπολογίας 3 και 4 .....  | 216 |
| 5.7.4 Οικονομική αξιολόγηση της τοπολογίας 5 .....  | 218 |
| 5.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....  | 222 |
| 6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ –<br>ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ..... | 225 |
| 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....  | 225 |
| 6.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....  | 225 |
| 6.3 ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ .....                                       | 226 |
| 6.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....   | 227 |
| 6.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....  | 228 |
| 6.6 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....   | 229 |
| 6.7 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ .....  | 231 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΩ .....   | 233 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....                                    | 241 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3: ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ CLARK .....  | 249 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4: ΜΟΝΤΕΛΟ MONTE CARLO .....  | 257 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....  | 261 |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| $A (m^3/m^2 \cdot s \cdot bar)$ : | Σταθερά της μεμβράνης   |
| $a_0, b_0$ :                      | Σταθερός όρος της συνάρτησης συσχέτισης   |
| $a_1, b_1$ :                      | Συντελεστής της $X$ στη συνάρτηση συσχέτισης                                    |
| $a_2, b_2$ :                      | Συντελεστής της $X^2$ στη συνάρτηση συσχέτισης                                  |
| $A_p (m^2)$ :                     | Διατομή του εμβόλου   |
| $A_r (m^2)$ :                     | Διατομή του διωστήρα  |
| $B (mol/m^2 \cdot s \cdot bar)$ : | Διαπερατότητα των αλάτων δια της μεμβράνης                                      |
| $C_0 (€)$ :                       | Ύψος του αρχικού κεφαλαίου  |
| $C_b (ppm)$ :                     | Συγκέντρωση αλάτων της άλμης  |
| $C_{cap} (€/έτος)$ :              | Ισοδύναμο σταθερό ετήσιο κόστος   |
| $C_f (ppm)$ :                     | Συγκέντρωση αλάτων του νερού τροφοδοσίας  |
| $CF_i (€)$ :                      | Διαφορά μεταξύ εσόδων και εξόδων της περιόδου                                   |
| $C_m (mol/m^3)$ :                 | Η μοριακή συγκέντρωση των αλάτων  |
| $C_n (€)$ :                       | Ύψος του κεφαλαίου μετά από $n$ έτη   |
| $C_p (ppm)$ :                     | Συγκέντρωση αλάτων του αφαλατωμένου νερού                                       |
| $C_s (ppm)$ :                     | Μέση συγκέντρωση των αλάτων στα δύο διαλύματα από τις δύο πλευρές της μεμβράνης |
| $d(\%)$ :                         | Επιτόκιο προεξόφλησης περιόδου, ενιαίο για όλες τις περιόδους.                  |
| $D_i$ :                           | Ο συντελεστής διάχυσης του συστατικού $i$                                       |
| $E (Wh)$ :                        | Ενεργεία  |
| $E_m (kWh)$ :                     | Καταναλισκόμενη ενέργεια από το κινητήρα  |
| $E_a (V)$ :                       | Η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα  |
| $H (m)$ :                         | Μανομετρικό δυναμικής αντλίας   |
| $H_{sol} (W/m^2)$ :               | Ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας   |
| $i (\%)$ :                        | Επιτόκιο  |
| $I (A)$ :                         | Ρεύμα   |
| $I_{ex}$ :                        | Κέρδος στο ρεύμα εξόδου του μετατροπέα υποβιβασμού ΣΡ/ΣΡ                        |
| $I_{pv} (A)$ :                    | Ρεύμα της Φ/Β συστοιχίας  |
| $J_s (mol/m^2 \cdot s)$ :         | Ροή ή flux των αλάτων   |
| $J_v (m^3/m^2 \cdot s)$ :         | Ροή ή flux του αφαλατωμένου νερού   |
| $k_i$                             | Ο συντελεστής κατανομής του συστατικού $i$                                      |
| $K_u \Phi (V/sec)$ :              | Η είναι η μαγνητική ροή του κινητήρα  |

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| $L_v (m^3/m^2 \cdot s \cdot bar)$ : | Η ογκομετρική ή υδροδυναμική περατότητα ανά μονάδα πίεσης |
| $n (rpm)$ :                         | Στροφές της αντλίας                                       |
| $N (rpm)$ :                         | Στροφές του κινητήρα                                      |
| $n (\acute{\epsilon}\tau\eta)$ :    | Συνολικός αριθμός περιόδων της αξιολόγησης                |
| $N_a (W)$ :                         | Εισερχόμενη ισχύς στον άξονα της αντλίας                  |
| $N_\theta (W)$ :                    | Θεωρητική ισχύς του κινητήρα                              |
| $P (bar)$ :                         | Πίεση κατάθλιψης της αντλίας                              |
| $P_b (bar)$ :                       | Η πίεση της άλμης στην είσοδο της αντλίας Clark           |
| $P_{elec} (W)$ :                    | Η ηλεκτρική ισχύς του κινητήρα                            |
| $P_{ex} (W)$ :                      | Ενεργειακός κέρδος  |
| $P_f (bar)$ :                       | Η πίεση του νερού τροφοδοσίας της μεμβράνης               |
| $P_L (bar)$ :                       | Η πίεση της απορριπτόμενης άλμης χαμηλής πίεσης           |
| $P_{mech} (W)$ :                    | Η μηχανική ισχύς του κινητήρα                             |
| $P_p (bar)$ :                       | Η πίεσης του αφαλατωμένου νερού                           |
| $P_\pi (W)$ :                       | Ισχύς της Φ/Β συστοιχίας                                  |
| $Q (L/h)$ :                         | Πραγματική παροχή της αντλίας                             |
| $q (L/στροφή)$ :                    | Όγκο νερού ανά στροφή 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                                 |
| $Q_\theta(L/h)$ :                   | Θεωρητική παροχή μιας αντλίας                             |
| $R(\%)$ :                           | Ποσοστό ανάκτησης αφαλατωμένου νερού                      |
| $R_c$ :                             | Συντελεστής συγκράτησης (Retention Coefficient)           |
| $R_\Omega (\Omega)$ :               | Αντίσταση δρομέα του κινητήρα                             |
| $S$ :                               | Η επιφάνεια της Φ/Β συστοιχίας                            |
| $S_{EC} (kWh/m^3)$ :                | Ειδική κατανάλωση ενέργειας                               |
| $S_R$ :                             | Το ποσοστό απόρριψης των αλάτων                           |
| $T (^\circ C)$ :                    | θερμοκρασία   |
| $T_0 (^\circ C)$ :                  | Η θερμοκρασία αναφοράς του νερού τροφοδοσίας              |
| $T_1 (^\circ C)$ :                  | Η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας                       |
| $T_{CF}$ :                          | Συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας                    |
| $T_{rq} (Nm)$ :                     | Ροπή στον άξονα του κινητήρα                              |
| $T_{αέρα} (^\circ C)$ :             | Θερμοκρασία αέρα  |

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| $T_{\pi}$ ( $^{\circ}\text{C}$ ): | Θερμοκρασία της Φ/Β συστοιχίας                                 |
| $V$ (V):                          | Τάση   |
| $V_{bat}$ (V):                    | Τάση συσσωρευτών   |
| $V_{pv}$ (V):                     | Τάση Φ/Β συστοιχίας  |
| $x_{im}$ :                        | Το γραμμομοριακό κλάσμα του διαλυμένου άλατος στη μεμβράνη     |
| $x_{ip}$ :                        | Το γραμμομοριακό κλάσμα του διαλυμένου άλατος μετά τη μεμβράνη |
| $\alpha P_{mpp}$                  | Συντελεστής μείωσης της ισχύος της Φ/Β συστοιχίας              |
| $\delta_m$ (m):                   | Το πάχος της μεμβράνης   |
| $\Delta P$ (bar):                 | Διαφορά ασκούμενης πίεσης πριν και μετά τη μεμβράνη            |
| $\Delta \Pi$ (bar):               | Διαφορά ωσμωτικής πίεσης πριν και μετά τη μεμβράνη             |
| $\eta$ :                          | Βαθμός απόδοσης  |
| $\eta_{clark}$ :                  | Ολικός βαθμός απόδοσης της αντλίας Clark                       |
| $\eta_m$ :                        | Μηχανική απόδοση της αντλίας                                   |
| $\eta_v$ :                        | Ογκομετρική απόδοση της αντλίας                                |
| $\eta_{\pi}$                      | Βαθμός απόδοσης της Φ/Β συστοιχίας                             |
| $\Pi$ (psi):                      | Ωσμωτική πίεση   |
| $\sigma$ :                        | Συντελεστής ανάκλασης του staverman                            |
| $\sigma_{\theta}$ :               | Συντελεστή διόρθωσης της θερμοκρασίας της Φ/Β συστοιχίας       |
| $\sigma_{\kappa}$ :               | Συντελεστής κάλυψης του πλαισίου της Φ/Β συστοιχίας            |
| $\sigma_{\rho}$ :                 | Συντελεστής ρύπανσης της επιφάνειας της Φ/Β συστοιχίας         |



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

|            |  |
|------------|--|
| CA:        | Οξική Κυτταρίνη  |
| ED:        | Ηλεκτροδιάλυση (Electro Dialysis)  |
| LCB:       | Μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ (Linear Current Booster)  |
| MSF:       | <i>Πολυβάθμια εκρηκτική εξάτμιση ή πολυβάθμιος εκτόνωση.<br/>(Multi - Stage - Flash - Evaporation)</i> |
| NPV – ΚΠΑ: | Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value)  |
| OTEC:      | Ενέργεια από τη θερμότητα των ωκεανών (Ocean Thermal Energy Conversion)                                |
| PCF:       | Συντελεστής διόρθωσης της πίεσης   |
| PI:        | Πολύ- ιμίδες,.   |
| PV:        | Παρούσα Αξία (Present Value)   |
| PVDF:      | Φθοριούχο πολυβινυλιδένιο  |
| RPM:       | Revelations per minuet   |
| VaR:       | Αξία περίπτωσης σε κίνδυνο (Value at Risk)   |
| VC:        | <i>Εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών (Vapor Compression)</i>   |
| ΑΓ:        | Ανεμογεννήτρια   |
| ΑΠΕ:       | Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας  |
| ΑΩ:        | Αντίστροφη ώσμωση  |
| ΕΡ:        | Εναλλασσόμενο ρεύμα  |
| ΜΕ:        | <i>Εξάτμιση με πολλαπλές βαθμίδες (Multiple - Effect – Evaporation)</i>                                |
| ΡΑ:        | Πολυαμίδες   |
| ΣΡ:        | Συνεχές ρεύμα  |
| Φ/Β:       | Φωτοβολταϊκά   |



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Εικόνα 1-1:  | Σχηματική παράσταση της ωσμωτικής πίεσης Α, στο σημείο ισορροπίας Β και της αντίστροφης της ωσμωτικής πίεσης Γ. Πηγή: <i>Δεληγιάννη and Μπελεσιώτης, (1995)</i> .....                     | 19 |
| Εικόνα 1-2:  | Υπόδειγμα ροής του διαλύματος δια μιας μεμβράνης σπειροειδούς περιέλιξης (IONPURE, Lit. No IP004), και τομή της περιέλιξης .....  | 23 |
| Εικόνα 1-3:  | Εξωτερική μορφή ενός στοιχείου μεμβράνης σπειροειδούς περιέλιξης (IONPURE Technologies Corp.) .....   | 23 |
| Εικόνα 1-4:  | Κατασκευαστικό υπόδειγμα στοιχείου με σπειροειδή περιέλιξη μεμβράνης και φορά κυκλοφορίας των διαλυμάτων. (Το στοιχείο είναι τύπου ROMEBRA SU-800 της TORAY Industries Inc. Japan). ..... | 24 |
| Εικόνα 1-5:  | Διάταξη ενός στοιχείου αντίστροφης ώσμωσης με τρία στοιχεία μεμβρανών.....  | 24 |
| Εικόνα 1-6:  | Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για αφαλάτωση.....  | 29 |
| Εικόνα 1-7:  | Τεχνολογίες αφαλάτωσης που συνδυάζονται με ΑΠΕ.....   | 30 |
| Εικόνα 1-8:  | Συμβατικό σύστημα ανάκτησης ενέργειας.....  | 38 |
| Εικόνα 1-9:  | Σύστημα υψηλής πίεσης με ανάκτηση ενέργειας της Grundfos.....   | 39 |
| Εικόνα 1-10: | Ανακτητής ενέργειας τύπου (PX) .....  | 40 |
| Εικόνα 1-11: | Σύστημα ανάκτησης Grundfos .....  | 40 |
| Εικόνα 1-12: | Αντλίες APP της Danfoss .....   | 41 |
| Εικόνα 1-13: | Η αντλία Clark rump .....   | 41 |
| Εικόνα 1-14: | Συνδεσμολογία turbocharger .....  | 42 |
| Εικόνα 2-1:  | Διάγραμμα συμβατικής μονάδας αφαλάτωσης ΑΩ. Πηγή: <i>Αυλωνίτης, (2006)</i> .....  | 48 |
| Εικόνα 2-2:  | Σχηματικό διάγραμμα της μεμβράνης ΑΩ.....   | 52 |
| Εικόνα 2-3:  | Επίδραση της ασκούμενης πίεσης της μεμβράνης στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη των αλάτων .....  | 56 |
| Εικόνα 2-4:  | Επίδραση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη των αλάτων.....  | 57 |
| Εικόνα 2-5:  | Επίδραση της συγκέντρωσης των αλάτων στο νερό τροφοδοσίας στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη των αλάτων. ....   | 58 |



|              |  |    |
|--------------|--|----|
| Εικόνα 2-6:  | Επίδραση του βαθμού ανάκτησης στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη των αλάτων .....        | 59 |
| Εικόνα 2-7:  | Επίδραση του pH στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη των αλάτων .....                      | 60 |
| Εικόνα 2-8:  | Κατάταξη των αντλιών θετικής μετατόπισης.....  | 64 |
| Εικόνα 2-9:  | Κατάταξη των δυναμικών αντλιών.....  | 67 |
| Εικόνα 2-10: | Λειτουργία της αντλίας Clark, πηγή: Thomson, (2003) .....  | 69 |
| Εικόνα 2-11: | Σχηματικό διάγραμμα της αντλίας Clark.....   | 70 |
| Εικόνα 3-1:  | Φύλλο εισαγωγής γενικών δεδομένων .....  | 77 |
| Εικόνα 3-2:  | Φύλλο εισαγωγής δεδομένων νερού τροφοδοσίας.....   | 77 |
| Εικόνα 3-3:  | Διαμόρφωση της μονάδας αφαλάτωσης ΑΩ .....   | 78 |
| Εικόνα 3-4:  | Δεδομένα εξόδου προσομοίωσης της μεμβράνης.....  | 79 |
| Εικόνα 3-5:  | Βασικά στοιχεία του σχεδιασμού της μονάδας ΑΩ .....  | 79 |
| Εικόνα 3-6:  | Η δεξαμενή τροφοδοσίας.....  | 80 |
| Εικόνα 3-7:  | Η αντλία τροφοδοσίας ECOJET 120 .....  | 81 |
| Εικόνα 3-8:  | Φίλτρα προεπεξεργασίας του νερού.....  | 82 |
| Εικόνα 3-9:  | Ο κινητήρας και η αντλία υψηλής πίεσης.....  | 82 |
| Εικόνα 3-10: | Η μεμβράνη (σπειροειδούς περιέλιξης).....  | 83 |
| Εικόνα 3-11: | Η μεμβρανοθήκη Code Line.....  | 83 |
| Εικόνα 3-12: | Ο πίνακας ισχύος .....   | 84 |
| Εικόνα 3-13: | Ο πίνακας ελέγχου .....  | 84 |
| Εικόνα 3-14: | Η μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης .....  | 87 |
| Εικόνα 3-15: | Σχηματικό διάγραμμα της συμβατικής μονάδας ΑΩ.....   | 88 |
| Εικόνα 3-16: | Η επίδραση της μεταβολής της πίεσης στην ποσότητα του νερού.....                                       | 89 |
| Εικόνα 3-17: | Η γραμμική σχέση μεταξύ πίεσης εισόδου και η παροχή αφαλατωμένου νερού.....                            | 90 |
| Εικόνα 3-18: | Η επίδραση της μεταβολής της πίεσης στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού.....             | 91 |
| Εικόνα 3-19: | Η γραμμική σχέση μεταξύ της πίεσης εισόδου της μεμβράνης και της ισχύος της αντλίας υψηλής πίεσης..... | 92 |
| Εικόνα 3-20: | Δεδομένα ηλιακού δυναμικού της Αθήνας.....   | 94 |
| Εικόνα 3-21: | Δεδομένα του φορτίου.....  | 95 |
| Εικόνα 3-22: | Δεδομένα των Φ/Β συστοιχιών .....  | 96 |
| Εικόνα 3-23: | Δεδομένα των συσσωρευτών .....   | 97 |

|              |  |     |
|--------------|--|-----|
| Εικόνα 3-24: | Δεδομένα του αντιστροφέα .....   | 97  |
| Εικόνα 3-25: | Γενικά οικονομικά δεδομένα.....  | 98  |
| Εικόνα 3-26: | Τα αποτελέσματα σχεδιασμού του ΟΜΗΡΟΥ .....  | 99  |
| Εικόνα 3-27: | Δεδομένα φορτίο ΣΡ .....   | 101 |
| Εικόνα 3-28: | Αποτελέσματα σχεδιασμού της τροποποιημένης μονάδας ΑΩ.....   | 102 |
| Εικόνα 3-29: | (Α) Τα φ/Β πλαίσια, (Β) Ο ρυθμιστής φόρτισης (Γ) Ο μετατροπέας υποβιβασμού και (Δ) Ο ηλιακός συσσωρευτής.....  | 105 |
| Εικόνα 3-30: | Η ανεμογεννήτρια και ο ανορθωτής - ρυθμιστής φόρτισης.....   | 107 |
| Εικόνα 3-31: | Ο κινητήρας με την περιστροφική αντλία (Α) και η αντλία Clark (Β)...   | 108 |
| Εικόνα 3-32: | Αισθητήρια για τη μέτρηση μετεωρολογικών μεγεθών (Α) – Πυρανόμετρο για μέτρηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας....  | 109 |
| Εικόνα 3-33: | Τα διάφορα όργανα του συστήματος, Α) μεταδότης πίεσης, Β) μεταδότης ροής αφαλατωμένου νερού, Γ) μεταδότης πίεσης της άλμης, Δ) μεταδότης ηλεκτρικής αγωγιμότητας του αφαλατωμένου νερού, Ε) μεταδότης αγωγιμότητας της άλμης και Η) όργανο μέτρησης των στροφών του κινητήρα ..... | 112 |
| Εικόνα 3-34: | Σχηματικό διάγραμμα του υβριδικού συστήματος ΑΩ.....   | 113 |
| Εικόνα 3-35: | Το ηλεκτρικό κινητήρα πάνω στη ηλεκτρομαγνητική πέδη .....   | 115 |
| Εικόνα 3-36: | Πηγή τάσης συνεχούς ρεύματος .....   | 115 |
| Εικόνα 3-37: | Βολτόμετρο και Αμπερόμετρο .....   | 115 |
| Εικόνα 3-38: | Επίδραση της μεταβολής του ρεύματος και της τάσης στις στροφές του κινητήρα .....  | 116 |
| Εικόνα 3-39: | Επίδραση του ρεύματος στη ροπή του κινητήρα .....  | 117 |
| Εικόνα 3-40: | Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα σε διάφορα σημεία λειτουργίας...  | 118 |
| Εικόνα 3-41: | Επίδραση μεταβολής της τάσης τροφοδοσίας στην κατανάλωση ρεύματος και στις στροφές του κινητήρα.....   | 120 |
| Εικόνα 3-42: | Επίδραση της μεταβολής τάσης τροφοδοσίας στις πιέσεις της μονάδας ΑΩ .....   | 121 |
| Εικόνα 3-43: | Επίδραση μεταβολής τάσης τροφοδοσίας στην παροχή αφαλατωμένου νερού.....   | 122 |
| Εικόνα 3-44: | Επίδραση μεταβολής της τάσης τροφοδοσίας στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού .....   | 123 |
| Εικόνα 3-45: | Επίδραση μεταβολής της απορροφούμενης ισχύος του κινητήρα στο βαθμό απόδοσης του αντλητικού συστήματος και στην ειδική κατανάλωση ενέργειας.....   | 124 |

|   |     |
|---|-----|
| Εικόνα 3-46: Σχηματικό διάγραμμα μονάδας ΑΩ με ανάκτηση ενέργειας .....   | 125 |
| Εικόνα 3-47: Σχηματικό διάγραμμα μονάδας ΑΩ χωρίς ανάκτηση ενέργειας.....   | 126 |
| Εικόνα 3-48: Σύνδεση των Φ/Β πλαισίων με την μονάδα ΑΩ μέσω συσσωρευτών   | 128 |
| Εικόνα 3-49: Μετεωρολογικά δεδομένα τεσσάρων ημερών του μηνός Ιουνίου 2006 .....  | 129 |
| Εικόνα 3-50: Παραγωγή ισχύος από τη Φ/Β συστοιχία και η απορροφούμενη ισχύς του κινητήρα.....   | 131 |
| Εικόνα 3-51: Ρεύμα κινητήρα και τάση συσσωρευτών ως συνάρτηση του χρόνου  | 132 |
| Εικόνα 3-52: Η μεταβολή της πίεσης της μεμβράνης και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού ως συνάρτηση του χρόνου .....                              | 133 |
| Εικόνα 3-53: Παροχή αφαλατωμένου νερού και άλμης.....   | 134 |
| Εικόνα 3-54: Απευθείας σύνδεση της Φ/Β συστοιχίας με την μονάδα ΑΩ .....  | 135 |
| Εικόνα 3-55: Η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία και η παραγόμενη ισχύ από τα Φ/Β πλαίσια .....  | 136 |
| Εικόνα 3-56: Οι πιέσεις της μονάδας ΑΩ .....  | 136 |
| Εικόνα 3-57: Παροχή και ποιότητα πόσιμου νερού.....   | 137 |
| Εικόνα 3-58: Στροφές κινητήρα και ειδική κατανάλωση ενέργειας .....   | 138 |
| Εικόνα 3-59: Απευθείας σύνδεσης της μονάδας ΑΩ με το Φ/Β συστοιχία μέσω μετατροπέα υποβιβασμού τάσης .....  | 139 |
| Εικόνα 3-60: Ρεύματα και τάσεις του Φ/Β και το κινητήρα .....   | 140 |
| Εικόνα 3-61: Παροχή και ηλεκτρική αγωγιμότητα αφαλατωμένου νερού.....   | 141 |
| Εικόνα 3-62: Στροφές κινητήρα και ειδική κατανάλωση ενέργειας της μονάδας ΑΩ  | 142 |
| Εικόνα 3-63: Ισχύς της ανεμογεννήτριας.....   | 143 |
| Εικόνα 3-64: Βαθμός απόδοσης του μετατροπέα/φορτιστή της ανεμογεννήτριας ..   | 143 |
| Εικόνα 4-1: Διάγραμμα ροής πληροφοριών της μεμβράνης ΑΩ.....  | 153 |
| Εικόνα 4-2: Σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη παροχή του αφαλατωμένου νερού .....                    | 155 |
| Εικόνα 4-3: Σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη συγκέντρωση των αλάτων του αφαλατωμένου νερού.....     | 156 |
| Εικόνα 4-4: Η γραμμική συσχέτιση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της μεμβράνης ΑΩ (Παροχή αφαλατωμένου νερού)..... | 157 |

|              |  |     |
|--------------|--|-----|
| Εικόνα 4-5:  | Η γραμμική συσχέτιση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της μεμβράνης ΑΩ (Συγκέντρωση των αλάτων)..... | 157 |
| Εικόνα 4-6:  | Διάγραμμα ροής πληροφοριών του μοντέλου αντλία - κινητήρα .....  | 158 |
| Εικόνα 4-7:  | Χαρακτηριστική καμπύλη παροχής - ισχύς της αντλίας.....  | 160 |
| Εικόνα 4-8:  | Χαρακτηριστική καμπύλη πίεσης - ισχύς της αντλίας .....  | 161 |
| Εικόνα 4-9:  | Σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη παροχή της αντλίας τροφοδοσίας.....                 | 162 |
| Εικόνα 4-10: | Σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη πίεση της αντλίας τροφοδοσίας .....                 | 162 |
| Εικόνα 4-11: | Η γραμμική συσχέτιση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της παροχής της αντλίας.....                   | 163 |
| Εικόνα 4-12: | Η γραμμική συσχέτιση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της πίεσης της αντλίας τροφοδοσίας.....        | 163 |
| Εικόνα 4-13: | Διάγραμμα ροής πληροφοριών Της αντλίας Clark.....  | 164 |
| Εικόνα 4-14: | Σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη πίεση εξόδου της αντλίας Clark .....                | 166 |
| Εικόνα 4-15: | Η γραμμική συσχέτιση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της πίεσης της αντλίας Clark.....              | 166 |
| Εικόνα 4-16: | Τρόπος σύνδεσης των τριών καινούριων μοντέλων στο TRNSYS....   | 167 |
| Εικόνα 4-17: | Η ταχύτητα του ανέμου και η θερμοκρασία αέρα του μήνα Ιανουαρίου .....   | 170 |
| Εικόνα 4-18: | Η ταχύτητα του ανέμου και η θερμοκρασία αέρα του μήνα Ιουλίου ...  | 170 |
| Εικόνα 4-19: | Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας για μία εβδομάδα του Ιανουαρίου.....   | 171 |
| Εικόνα 4-20: | Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας για μία εβδομάδα του Ιουλίου.....  | 171 |
| Εικόνα 4-21: | Σύνδεση της μονάδας ΑΩ με τη Φ/Β συστοιχία μέσω συσσωρευτών και ρυθμιστή φόρτισης, τοπολογία 1.....                                | 173 |
| Εικόνα 4-22: | Παραγωγή ισχύος από τη Φ/Β συστοιχία και η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών για τον Ιανουάριο .....                              | 174 |
| Εικόνα 4-23: | Παραγωγή ισχύος από τη Φ/Β συστοιχία και η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών για τον Ιούλιο.....                                  | 174 |
| Εικόνα 4-24: | Παροχή αφαλατωμένου νερού, πίεση αντλίας τροφοδοσίας και πίεση εισόδου της μεμβράνης ΑΩ.....                                       | 175 |
| Εικόνα 4-25: | Υβριδικό σύστημα με ανεμογεννήτρια, Φ/Β συστοιχία και συσσωρευτές, τοπολογία 2.....  | 176 |

|              |   |     |
|--------------|---|-----|
| Εικόνα 4-26: | Παραγωγή ισχύος από την ανεμογεννήτρια και από τη Φ/Β συστοιχία και η αντίστοιχη κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών για τον Ιανουάριο ..... | 177 |
| Εικόνα 4-27: | Παραγωγή αφαλατωμένου νερού, πίεση τροφοδοσίας και πίεση εισόδου της μεμβράνης για τον Ιανουάριο .....                                      | 177 |
| Εικόνα 4-28: | Παραγωγή ισχύος από την ανεμογεννήτρια και από τη Φ/Β συστοιχία και η αντίστοιχη κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών για τον Ιούλιο.....     | 178 |
| Εικόνα 4-29: | Παραγωγή αφαλατωμένου νερού, πίεση τροφοδοσίας και πίεση εισόδου της μεμβράνης για τον Ιούλιο.....  | 178 |
| Εικόνα 4-30: | Απευθείας σύνδεση τη Φ/Β συστοιχία με τη μονάδα ΑΩ μέσου μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, τοπολογία 3.....                                     | 179 |
| Εικόνα 4-31: | Η παραγωγή ισχύος από τη Φ/Β συστοιχία και η καταναλισκόμενη Ισχύς από το κινητήρα της μονάδας ΑΩ τον Ιανουάριο .....                       | 180 |
| Εικόνα 4-32: | Πίεση και παροχή της μονάδας ΑΩ τον Ιανουάριο.....  | 180 |
| Εικόνα 4-33: | Η παραγωγή ισχύος από τη Φ/Β συστοιχία και η καταναλισκόμενη Ισχύς από το κινητήρα της μονάδας ΑΩ τον Ιούλιο.....                           | 181 |
| Εικόνα 4-34: | Πίεση και παροχή της μονάδας ΑΩ τον Ιούλιο .....  | 181 |
| Εικόνα 4-35: | Απευθείας σύνδεση της Φ/Β συστοιχίας με την μονάδα ΑΩ, τοπολογία 4 .....  | 182 |
| Εικόνα 4-36: | Ισχύς της Φ/Β συστοιχίας και η πίεση της αντλίας τροφοδοσίας και της εισόδου της μεμβράνης για τον Ιανουάριο .....                          | 183 |
| Εικόνα 4-37: | Παροχή και ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού για τον Ιανουάριο .....   | 184 |
| Εικόνα 4-38: | Ισχύς της Φ/Β συστοιχίας και η πίεση της αντλίας τροφοδοσίας και της εισόδου της μεμβράνης για τον Ιούλιο.....                              | 184 |
| Εικόνα 4-39: | Παροχή και ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού για τον Ιούλιο.....   | 185 |
| Εικόνα 4-40: | Σύνδεση της μονάδας ΑΩ με ανεμογεννήτρια και συσσωρευτές, τοπολογία 5.....  | 186 |
| Εικόνα 4-41: | Η ισχύς ανεμογεννήτριας και η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών για τον Ιανουάριο.....   | 187 |
| Εικόνα 4-42: | Η ισχύς ανεμογεννήτριας και η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών για τον Ιούλιο.....  | 187 |

|              |  |     |
|--------------|--|-----|
| Εικόνα 4-43: | Παροχή αφαλατωμένου νερού και η πίεση της αντλίας τροφοδοσίας και της εισόδου μεμβράνης για τον Ιούλιο.....                    | 188 |
| Εικόνα 4-44: | Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για την παροχή του αφαλατωμένου νερού.....                                  | 190 |
| Εικόνα 4-45: | Ο συντελεστής συσχέτισης των θεωρητικών και των πειραματικών δεδομένων της παροχής του αφαλατωμένου νερού .....                | 191 |
| Εικόνα 4-46: | Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για συγκέντρωση των αλάτων του αφαλατωμένου .....                           | 191 |
| Εικόνα 4-47: | Ο συντελεστής συσχέτισης των θεωρητικών και των πειραματικών δεδομένων της συγκέντρωσης των αλάτων του αφαλατωμένου νερού..... | 192 |
| Εικόνα 5-1:  | Συνιστώσες του αρχικού κόστους αφαλάτωσης .....  | 203 |
| Εικόνα 5-2:  | Συνιστώσες του κόστους συντήρησης και λειτουργίας μονάδων αφαλάτωσης.....  | 203 |
| Εικόνα 5-3:  | Ανάλυση ευαισθησίας για κρίσιμες παραμέτρους του συστήματος ...  | 208 |
| Εικόνα 5-4:  | Εκτίμηση αβεβαιοτήτων με προσομοίωση Monte Carlo. Πηγή, <i>Μαθιουλάκης, (2004)</i> .....                                       | 211 |
| Εικόνα 5-5:  | Τυπική κανονική κατανομή $f(z)$ και αθροιστική κανονική κατανομή $\Phi(z)$ . Πηγή, <i>Μαθιουλάκης, (2004)</i> .....            | 212 |
| Εικόνα 5-6:  | Αθροιστική καμπύλη της τοπολογίας 1.....   | 215 |
| Εικόνα 5-7:  | Αθροιστική καμπύλη περίπτωσης 2 .....  | 216 |
| Εικόνα 5-8:  | Οι αθροιστικές καμπύλες των τοπολογιών 3 και 4 (απευθείας σύνδεση) .....   | 217 |
| Εικόνα 5-9:  | Αθροιστική καμπύλη της τοπολογίας 4 με τιμή πώλησης του νερού 7.8 €/m <sup>3</sup> .....                                       | 218 |
| Εικόνα 5-10: | Αθροιστική καμπύλη της τοπολογίας 5 (μόνο ανεμογεννήτρια και συσσωρευτές) .....  | 219 |



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Πίνακας 1-1:  | Εγκαταστάσεις αφαλάτωσης με ανεμογεννήτριες .....  | 34  |
| Πίνακας 1-2:  | Εγκαταστάσεις αφαλάτωσης ΑΩ με Φ/Β .....   | 34  |
| Πίνακας 3-1:  | δεδομένα του σχεδιασμού .....  | 78  |
| Πίνακας 3-2:  | Σύνοψη αποτελεσμάτων του σχεδιασμού της συμβατικής μονάδας αφαλάτωσης ΑΩ.....  | 80  |
| Πίνακας 3-3:  | Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα και της αντλίας τροφοδοσίας.....  | 81  |
| Πίνακας 3-4:  | Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα και της αντλίας υψηλής πίεσης .....   | 82  |
| Πίνακας 3-5:  | Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μεμβράνης και της μεμβρανοθήκης ..   | 83  |
| Πίνακας 3-6:  | Σύνοψη των αποτελεσμάτων σχεδιασμού της Φ/Β συστοιχίας για τη συμβατική μονάδα ΑΩ.....                                 | 99  |
| Πίνακας 3-7:  | Σύνοψη των αποτελεσμάτων σχεδιασμού με ΟΜΗΡΟ για την προτεινόμενη μονάδα ΑΩ.....                                       | 103 |
| Πίνακας 3-8:  | Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Φ/Β πλαισίου, του ρυθμιστή φόρτισης, του μετατροπέα υποβιβασμού και των συσσωρευτών..... | 106 |
| Πίνακας 3-9:  | Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας .....  | 106 |
| Πίνακας 3-10: | Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, περιστροφικής αντλίας και του ανακτητή .....                                   | 108 |
| Πίνακας 3-11: | Τεχνικά χαρακτηριστικά του ανεμόμετρου.....  | 109 |
| Πίνακας 3-12: | Τεχνικά χαρακτηριστικά του ανεμοδείκτη .....   | 109 |
| Πίνακας 3-13: | Τεχνικά χαρακτηριστικά του θερμομέτρου - υγρασιόμετρου .....   | 110 |
| Πίνακας 3-14: | Τεχνικά χαρακτηριστικά του πυρανομέτρου.....   | 110 |
| Πίνακας 3-15: | Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη της πίεσης στην κατάθλιψη της αντλίας τροφοδοσίας.....                             | 110 |
| Πίνακας 3-16: | Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη της υψηλής πίεσης.....   | 110 |
| Πίνακας 3-17: | Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη παροχής αφαλατωμένου νερού.....  | 111 |
| Πίνακας 3-18: | Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη παροχής της άλμης.....   | 111 |
| Πίνακας 3-19: | Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του αφαλατωμένου νερού .....                           | 111 |



|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| Πίνακας 3-20: | Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας της άλμης .....                       | 111 |
| Πίνακας 3-21: | Ο βαθμός απόδοσης των διαφόρων τμημάτων της μονάδας ΑΩ ....   | 127 |
| Πίνακας 3-22: | Συγκέντρωση των αποτελεσμάτων .....   | 144 |
| Πίνακας 4-1:  | Παράμετροι, είσοδοι και έξοδοι του μοντέλου της μεμβράνης ΑΩ....                                      | 154 |
| Πίνακας 4-2:  | Παράμετροι, είσοδοι και έξοδοι του μοντέλου αντλία - κινητήρα .....                                   | 159 |
| Πίνακας 4-3:  | Παράμετροι, είσοδοι και έξοδοι του μοντέλου της αντλίας Clark .....                                   | 165 |
| Πίνακας 4-4:  | Τα έτοιμα μοντέλα του TRNSYS16 .....  | 169 |
| Πίνακας 4-5:  | Ετήσια ποσότητα αφαλατωμένου νερού για κάθε τοπολογία.....  | 189 |
| Πίνακας 5-1:  | Τα στοιχεία κόστους του Φ/Β συστήματος .....  | 204 |
| Πίνακας 5-2:  | Τα στοιχεία κόστους της Ανεμογεννήτριας.....  | 205 |
| Πίνακας 5-3:  | Τα στοιχεία κόστους του συστήματος αφαλάτωσης.....  | 206 |
| Πίνακας 5-4:  | Τα στοιχεία κόστους του συστήματος αφαλάτωσης.....  | 207 |
| Πίνακας 5-5:  | Παράμετροι που μεταβάλλονται στοχαστικά .....   | 213 |
| Πίνακας 5-6:  | Σύνοψη των υποθέσεων των διαφόρων τοπολογιών .....  | 221 |
| Πίνακας 5-7:  | Αρχική επένδυση, κόστος συντήρησης και λειτουργίας και το ετήσιο ισοδύναμο κόστος του συστήματος..... | 221 |

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διατριβής ήταν η ανάπτυξη, η πειραματική και θεωρητική διερεύνηση καθώς και η τεχνική και οικονομική αξιολόγηση, μικρής δυναμικότητας ενεργειακά αυτόνομων συστημάτων αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με αντίστροφη ώσμωση (ΑΩ), εξοπλισμένων με συσκευή ανάκτησης υδραυλικής ενέργειας της άλμης. Στα πλαίσια αυτά αναπτύχθηκε και μελετήθηκε εκτενώς μικρή μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης (ΑΩ) θαλασσινού νερού δυναμικότητας  $1.7 \text{ m}^3/\text{day}$ , εξοπλισμένη με μια συσκευή ανάκτησης της υδραυλικής ενέργειας της άλμης. Η μονάδα ΑΩ τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια από ένα υβριδικό σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που αποτελείται από μια ανεμογεννήτρια (Α/Γ) 1 kW, φωτοβολταϊκή (Φ/Β) συστοιχία ισχύος 846 Wp και ηλιακούς συσσωρευτές χωρητικότητας 315 Ah, 24 V. Δοκιμάστηκαν διάφοροι συνδυασμοί των πηγών ηλεκτρικής ενέργειας για τη τροφοδοσία με ενέργεια της μονάδας ΑΩ όπως, Φ/Β και συσσωρευτές (τοπολογία 1), Φ/Β και Α/Γ και συσσωρευτές (τοπολογία 2), απευθείας σύνδεση των Φ/Β χωρίς συσσωρευτές αλλά μέσω μετατροπέα συνεχούς ρεύματος σε συνεχές (ΣΡ/ΣΡ) (τοπολογία 3), απευθείας σύνδεση των Φ/Β χωρίς μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ και χωρίς συσσωρευτές (τοπολογία 4), και τέλος σύνδεση της Α/Γ με συσσωρευτές (τοπολογία 5). Τελικός στόχος ήταν η εύρεση του άριστου συνδυασμού από τεχνικής και οικονομικής άποψης.

Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση των συστημάτων παραγωγής ενέργειας και της μονάδας ΑΩ με χρήση του λογισμικού δυναμικής προσομοίωσης TRNSYS ver.16. Αναπτύχθηκαν νέες ρουτίνες, όπως ρουτίνα για τη μονάδα ΑΩ, ρουτίνα για την αντλία τροφοδοσίας με τον κινητήρα ΣΡ και τον ανακτητή ενέργειας. Επίσης, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όπως η αγωγιμότητα και η ποσότητα του παραγόμενου νερού από τις μεμβράνες, η πίεση και η παροχή της αντλίας και του ανακτητή με τα πειραματικά δεδομένα.

Τέλος πραγματοποιήθηκε λεπτομερής οικονομική ανάλυση (για όλους του δυνατούς συνδυασμούς των πηγών ενέργειας με τη μονάδα ΑΩ) με χρήση της μεθόδου ανάλυσης κινδύνου (Risk Analysis), όπου υπολογίστηκε ότι το κόστος του παραγόμενου νερού, για το σύστημα με απευθείας σύνδεση (χωρίς μετατροπέα) ανήλθε σε  $7.8 \text{ €/ m}^3$ .



## ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής έχουν δημοσιευτεί στα ακόλουθα διεθνή περιοδικά, εθνικά και διεθνή συνέδρια:

### Διεθνή περιοδικά με κριτές:

1. **Essam Sh. Mohamed.**, 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.
2. **Essam Sh. Mohamed**, 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.
3. **Essam Sh. Mohamed**, 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.
4. D. Manolacos, **Essam Sh. Mohamed**, I. Karagiannis and G. Papadakis (2008), Technical and economic comparison between PV-RO system and RO-Solar Rankine system. Case study: Thirasia island, *Desalination*, 221, 37-46.

### Διεθνή συνέδρια:

1. **Essam Sh. Mohamed**, and G. Papadakis (2003a), Design simulation and economic analysis of reverse osmosis desalination plant powered by hybrid renewable energy system, paper presented at Renewable Energy Sources for Islands Tourism and Water Desalination, 25-28 May, **Crete - Greece**.
2. **Essam Sh. Mohamed**, and G. Papadakis (2003b), Design simulation and economic analysis of reverse osmosis desalination plant powered by Wind turbine and Photovoltaics, paper presented at 3rd European PV-Hybrid and Mini-Grid Conference, 25-26 September, **Kassel - Germany**.

3. **Essam Sh. Mohamed**, and G. Papadakis (2003c), TRNSYS dynamic simulation of a stand alone hybrid wind-PV system powering a reverse osmosis desalination unit with hydraulic energy recovery, paper presented at 2nd European PV-Hybrid and Mini-Grid Conference, 25-26 September, **Kassel - Germany**.
4. **Essam Sh. Mohamed**, and G. Papadakis (2004a), A stand alone sea water reverse osmosis desalination unit powered by hybrid wind-photovoltaic system for rural development and small villages, paper presented at CIGER International Conference, 11-14 October, **Beijing - China**.
5. **Essam Sh. Mohamed**, and G. Papadakis (2004b), A stand alone sea water reverse osmosis desalination unit powered by hybrid wind-photovoltaic system for rural development and small villages, paper presented at International Conference in Agricultural Engineering AgEng 2004 ' Engineering the future', September, **Leuven - Belgium**.
6. **Essam Sh. Mohamed**, and G. Papadakis (2004c), A TRNSYS Dynamic Simulation Model for a stand alone PV system powering a reverse osmosis desalination unit with energy recovery system, paper presented at 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 7-11 June, **Paris - France**.
7. **Essam Sh. Mohamed**, G. Papadakis, E. Mathioulakis, and V. Belessiotis (2005), The effect of hydraulic energy recovery in a small sea water reverse osmosis desalination system, an experimental and economical evaluation, paper presented at International Conference of Desalination and the environment, 22-25 May, **Santa Margherita-Portofino-La Spezia-Italy**.
8. **Essam Sh. Mohamed**, G. Papadakis, E. Mathioulakis, and V. Belessiotis (2006), A techno-economic experimental investigation of a direct coupled photovoltaic sea water reverse osmosis desalination system paper presented at Global Conference on Renewable Energy Approaches for Desert Regions GCREADER, **Amman-Jordan**.
9. **Essam Sh. Mohamed**, G. Papadakis, E. Mathioulakis, and V. Belessiotis (2007), A direct coupled photovoltaic seawater reverse osmosis desalination system toward battery based systems — a technical and economical experimental comparative study, paper presented at International Conference - Desalination and the environment, 22-25 April **Halkidiki-Greece**.

10. G. Papadakis, **Essam Sh. Mohamed**, and D. Manolagos (2007), Small autonomous RO desalination systems powered by renewable energies. Technological advances and economics., paper presented at 3rd International Conference on Solar Radiation and Day Lighting SOLARIS 2007, 7-9 February, **New Delhi-India**.
11. G. Kyriakarakos, **Essam Sh. Mohamed**, S. Rozakis, and G. Papadakis (2006), Renewable Energy Polygeneration Systems: A viable Solution for the Desert Regions, paper presented at Global Conference on Renewable Energy Approaches for DEsert Regions - GCREADER, 18-22 September, Amman - **Jordan**.

### **Εθνικά συνέδρια:**

1. **Essam Sh. Mohamed**, Γ. Παπαδάκης, Ε. Μαθιουλάκης και Β. Μπελεσιώτης (2005), Θεωρητική και πειραματική διερεύνηση αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης με ανεμογεννήτρια και φωτοβολταϊκά. Εθνικό συνέδριο: Η εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας: Προοπτικές και Προτεραιότητες προς το στόχο του 2010, 23 – 25 Φεβρουαρίου, Αθήνα.
2. **Essam Sh. Mohamed**, Γ. Παπαδάκης, Ε. Μαθιουλάκης και Β. Μπελεσιώτης (2005), Διερεύνηση ενός υβριδικού αυτόνομου συστήματος από ανεμογεννήτρια και φωτοβολταϊκά που τροφοδοτεί σύστημα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης. 4<sup>ο</sup> Εθνικό συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής, 6-8 Οκτωβρίου, Αθήνα.
3. **Essam Sh. Mohamed**, Γ. Παπαδάκης, Ε. Μαθιουλάκης και Β. Μπελεσιώτης (2007), Πειραματική διερεύνηση απευθείας σύνδεσης συστήματος αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης με φωτοβολταϊκά. 5<sup>ο</sup> Εθνικό συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής, 18-20 Οκτωβρίου, Λάρισα.



## ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διατριβής ήταν η ανάπτυξη, η πειραματική και θεωρητική διερεύνηση καθώς και η τεχνική και οικονομική αξιολόγηση, μικρής δυναμικότητας ενεργειακά αυτόνομων συστημάτων αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με αντίστροφη ώσμωση (ΑΩ), εξοπλισμένων με συσκευή ανάκτησης υδραυλικής ενέργειας της άλμης.

Στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκε και μελετήθηκε εκτενώς μικρή μονάδα ΑΩ ονομαστικής δυναμικότητας  $1.7 \text{ m}^3/\text{day}$ . Η μονάδα ΑΩ τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια από ένα υβριδικό σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που αποτελείται από μια ανεμογεννήτρια (Α/Γ) 1 kW, φωτοβολταϊκή (Φ/Β) συστοιχία ισχύος 846 Wp και ηλιακούς συσσωρευτές χωρητικότητας 315 Ah, 24 V. Δοκιμάστηκαν διάφοροι συνδυασμοί των πηγών ηλεκτρικής ενέργειας για την τροφοδοσία της μονάδας ΑΩ με ενέργεια, όπως, Φ/Β και συσσωρευτές (τοπολογία 1), Φ/Β και Α/Γ και συσσωρευτές (τοπολογία 2), απευθείας σύνδεση των Φ/Β χωρίς συσσωρευτές αλλά μέσω μετατροπέα συνεχούς ρεύματος σε συνεχές (ΣΡ/ΣΡ) (τοπολογία 3), απευθείας σύνδεση των Φ/Β χωρίς μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ και χωρίς συσσωρευτές (τοπολογία 4), και τέλος σύνδεση της Α/Γ με συσσωρευτές (τοπολογία 5). Τελικός στόχος ήταν η εύρεση του άριστου συνδυασμού από τεχνικής και οικονομικής άποψης.

Από την αναλυτική βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε διαπιστώθηκε ότι τα συστήματα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης είναι τα πιο διαδεδομένα, λόγω 1) της χαμηλής ειδικής κατανάλωσης ενέργειας (ειδικά τα μεγάλα συστήματα) και 2) του ότι είναι τα πιο κατάλληλα για σύνδεση με Φ/Β ή/και ανεμογεννήτριες. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι υπάρχει έλλειψη τεχνογνωσίας για το σχεδιασμό και τη λειτουργία τους σε μη σταθερές συνθήκες, με απευθείας σύνδεση των μονάδων ΑΩ με Φ/Β ή/και με Α/Γ.

Η πειραματική μονάδα ΑΩ, περιλάμβανε μια μεμβράνη, μια μεμβρανοθήκη υψηλής πίεσης, μια αντλία τροφοδοσίας με επαγωγικό ασύγχρονο κινητήρα 1 kW και μια εμβολοφόρο αντλία υψηλής πίεσης (800 L/h, 7-105 bar) με επαγωγικό ασύγχρονο κινητήρα 2.2 kW. Τεχνητό θαλασσινό νερό για την τροφοδοσία της μονάδας ΑΩ παρασκευάστηκε διαλύοντας 25 kg NaCl σε  $1 \text{ m}^3$  νερό του δικτύου αφού αφαιρέθηκε το χλώριο και τυχόν οργανικό φορτίο μέσω κατάλληλων φίλτρων. Το τεχνητό θαλασσινό νερό αποθηκεύτηκε σε δεξαμενή όγκου  $1 \text{ m}^3$ . Η αγωγιμότητα του τεχνητού θαλασσινού νερού ήταν 35 mS/cm. Το παραγόμενο φρέσκο νερό από τη μονάδα ΑΩ καθώς και η άλμη τελικά οδηγούνταν πίσω στη δεξαμενή αποθήκευσης του θαλασσινού νερού. Η μονάδα ΑΩ με τις δεξαμενές (θαλασσινού και φρέσκου νερού) και το σύστημα συλλογής δεδομένων εγκαταστάθηκαν σε αίθουσα του Εργαστηρίου Γεωργικής Μηχανολογίας του Γ.Π.Α ενώ η συστοιχία Φ/Β και η ανεμογεννήτρια εγκαταστάθηκαν στην οροφή του ίδιου κτιρίου.



Αρχικά μελετήθηκε το συμβατικό σύστημα αφαλάτωσης ΑΩ χωρίς ανακτητή ενέργειας, τροφοδοτούμενο με ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο. Καταγράφηκαν διάφορες παράμετροι, όπως η αγωγιμότητα και η ποσότητα του παραγόμενου νερού, η ειδική κατανάλωση ενέργειας για το παραγόμενο νερό, και τελικά υπολογίστηκε το κόστος του παραγόμενου νερού. Το συμβατικό σύστημα έδωσε άριστη ποιότητα νερού και σταθερή παραγωγή. Η αγωγιμότητα του νερού σε αυτή την περίπτωση κυμάνθηκε μεταξύ 200 – 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Παρατηρήθηκε όμως μεγάλη σπατάλη ενέργειας, όπως αποδείχτηκε από τη μεγάλη μετρημένη ειδική κατανάλωση ενέργειας ( $20 \text{ kWh}/\text{m}^3$ ) η οποία οφειλόταν στο στραγγαλισμό της γραμμής της άλμης για να επιτευχθεί η επιθυμητή πίεση εισόδου στη μεμβράνη. Το κόστος του νερού σε αυτή την περίπτωση ανήλθε σε  $4 \text{ €/m}^3$ . Το χαμηλό αυτό κόστος οφειλόταν στο χαμηλό κόστος της κιλοβατώρας του δικτύου. Επιπλέον, υπολογίστηκε η ισχύς της Φ/Β συστοιχίας που θα τροφοδοτούσε το συμβατικό σύστημα ΑΩ η οποία ανήλθε σε  $5 \text{ kWp}$  ενώ το κόστος του παραγόμενου νερού στην περίπτωση αυτή, θα ήταν  $20 \text{ €/m}^3$ .

Στη συνέχεια διερευνήθηκαν όλες οι δυνατές μετατροπές στη μονάδα ΑΩ, ώστε να είναι συμβατή με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ειδικότερα με Φ/Β και με ανεμογεννήτριες. Για το σχεδιασμό της μονάδας ΑΩ, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ROSA (Reverse Osmosis System Analysis) και για το σχεδιασμό του υβριδικού συστήματος Φ/Β και Α/Γ χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό HOMER. Αρχικά, η μονάδα ΑΩ εξοπλίστηκε με μια συσκευή ανάκτησης της υδραυλικής ενέργειας της άλμης, που βασίζεται στη χρήση μιας αντλίας θετικής μετατόπισης τύπου Clark. Στη συνέχεια έγινε αντικατάσταση των κινητήρων εναλλασσομένου ρεύματος με ένα μόνο κινητήρα συνεχούς ρεύματος (ΣΡ) τύπου μόνιμου μαγνήτη χωρίς ψήκτρες, ισχύος  $500 \text{ W}$ ,  $24 \text{ V}$  και επίσης αντικατάσταση των αντλιών τροφοδοσίας και υψηλής πίεσης με μια περιστροφική αντλία τροφοδοσίας  $750 \text{ L/h}$ , πίεσης  $15 \text{ bar}$ . Ακόμα, σε επόμενη φάση, τοποθετήθηκε μία επιπλέον μεμβράνη ΑΩ για να αυξηθεί η παραγωγή του πόσιμου νερού που ανήλθε σε  $100 \text{ L/h}$ .

Κατά τη δεύτερη πειραματική φάση που πραγματοποιήθηκε μετά τη μελέτη του συμβατικού συστήματος, διερευνήθηκαν οι χαρακτηριστικές παράμετροι του κινητήρα ΣΡ στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών του ΕΜΠ. Ο κινητήρας ΣΡ ήταν ο μοναδικός καταναλωτής ενέργειας του συστήματος, και ως εκ τούτου ήταν αναγκαίος ο ακριβής προσδιορισμός των καμπυλών λειτουργίας του. Κατόπιν τοποθετήθηκε ο κινητήρας ΣΡ στη μονάδα ΑΩ, συνδέθηκε με τη συστοιχία συσσωρευτών  $315 \text{ Ah}$ ,  $24\text{V}$  (σταθερή πηγή ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος) και έγινε χάραξη των καμπυλών λειτουργίας της μονάδας ΑΩ σε διάφορα επίπεδα τάσης του συσσωρευτή. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας στην περίπτωση αυτή μειώθηκε σημαντικά από  $20$  σε  $4 \text{ kWh}/\text{m}^3$ , λόγω της ύπαρξης του ανακτητή ενέργειας και πρόσθεσης δεύτερης μεμβράνης. Η αγωγιμότητα του νερού κυμάνθηκε μεταξύ  $400$  και  $600 \text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ . Υψηλή τάση στο συσσωρευτή είχε ως αποτέλεσμα υψηλή πίεση στις μεμβράνες και χαμηλή αγωγιμότητα παραγόμενου νερού, ενώ χαμηλότερη

τάση στο συσσωρευτή είχε ως αποτέλεσμα χαμηλότερη πίεση στις μεμβράνες και υψηλότερη αγωγιμότητα παραγόμενου νερού.

Σε επόμενο στάδιο, η μονάδα ΑΩ συνδέθηκε με τη Φ/Β συστοιχία. Η Φ/Β συστοιχία αποτελείται από μόνο-κρυσταλλικά πλαίσια, ισχύος 846 Wp, συνδεδεμένα ανά δύο σε σειρά για να επιτευχθεί τάση 24 V και εννέα παράλληλα για την παραγωγή του απαιτούμενου ρεύματος. Η Φ/Β συστοιχία συνδέθηκε με ηλιακούς συσσωρευτές (315 Ah, 24 V) μέσω ρυθμιστή φόρτισης 35 A, 24 V και πραγματοποιήθηκαν επί σειρά συνεχόμενων ημερών, μετρήσεις διάφορων παραμέτρων και φυσικών μεγεθών για να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του όλου συστήματος. Επίσης συνδέθηκε η ανεμογεννήτρια 1 kW παράλληλα με τη Φ/Β συστοιχία και με τους συσσωρευτές μέσω κατάλληλου ανορθωτή/ρυθμιστή φόρτισης και καταγράφηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα. Η σύνδεση της ανεμογεννήτριας με τη συστοιχία των συσσωρευτών απαιτούσε ανορθωτή/ρυθμιστή φόρτισης διότι η γεννήτριά ήταν τριφασική, μεταβλητής τάσης και συχνότητας. Από τα πειραματικά αποτελέσματα προέκυψε ειδική κατανάλωση ενέργειας 4 – 6 kWh/m<sup>3</sup>. Η διακύμανση στην ειδική κατανάλωση ενέργειας οφειλόταν στην εποχιακή μεταβολή της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας. Το κόστος του παραγόμενου νερού σε αυτήν τη περίπτωση ανήλθε σε 12 €/m<sup>3</sup>, με αγωγιμότητα νερού που κυμάνθηκε μεταξύ 250 και 400 μS/cm.

Στην επόμενη φάση, αφαιρέθηκαν οι συσσωρευτές και η ανεμογεννήτρια, συνδέθηκε η μονάδα ΑΩ απευθείας με τη Φ/Β συστοιχία και καταγράφηκαν η ειδική κατανάλωση ενέργειας, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η ποσότητα του παραγόμενου νερού της τοπολογίας αυτής κάτω από μη σταθερές συνθήκες έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Στην ίδια τοπολογία χρησιμοποιήθηκε ένας μετατροπέας ΣΡ/ΣΡ μεταξύ της Φ/Β συστοιχίας και του κινητήρα ΣΡ της μονάδας ΑΩ. Η χρήση του μετατροπέα είχε σκοπό την επίτευξη πρώιμης εκκίνησης και όψιμης παύσης της λειτουργίας του κινητήρα ΣΡ της μονάδας ΑΩ. Η αγωγιμότητα του παραγόμενου νερού στα συστήματα με απευθείας σύνδεση κυμάνθηκε μεταξύ 400 και 600 μS/cm. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του παραγόμενου νερού στις περιπτώσεις αυτές αν και είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του συστήματος με συσσωρευτές, βρίσκεται κάτω από το μέγιστο όριο για το πόσιμο νερό που είναι 1000 μS/cm. Η αύξηση της αγωγιμότητας οφειλόταν στη διακύμανση της πίεσης εισόδου στις μεμβράνες λόγω της διακύμανσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας στην περίπτωση της απευθείας σύνδεσης υπολογίστηκε σε 4 - 6 kWh/m<sup>3</sup>, και το κόστος του νερού κυμάνθηκε μεταξύ 7.8 €/m<sup>3</sup> (για σύστημα χωρίς μετατροπέα) και 8.5 €/m<sup>3</sup> (για σύστημα με μετατροπέα). Αυτό το αποτέλεσμα υποδηλώνει ότι η χρήση του μετατροπέα δεν δικαιολογείται οικονομικά παρόλο που βελτίωσε το χρόνο λειτουργίας του κινητήρα κατά δύο ώρες ανά ημέρα σε σύγκριση με το σύστημα χωρίς μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ. Τέλος, είναι γνωστό ότι ο χρόνος ζωής των μεμβρανών μειώνεται όταν λειτουργούν υπό μεταβλητές συνθήκες

πίεσης εισόδου. Για το λόγο αυτό στην οικονομική διερεύνηση των τοπολογιών με απευθείας σύνδεση, ο χρόνος ζωής των μεμβρανών θεωρήθηκε ως 3 χρόνια (αντί για 5).

Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση των συστημάτων παραγωγής ενέργειας και της μονάδας ΑΩ με χρήση του λογισμικού δυναμικής προσομοίωσης TRNSYS. Η βιβλιοθήκη του TRNSYS περιέχει έτοιμες ρουτίνες όπως ρουτίνα για τη Φ/Β συστοιχία, την ανεμογεννήτρια και τους συσσωρευτές. Αναπτύχθηκαν νέες ρουτίνες, όπως ρουτίνα για τη μονάδα ΑΩ και ρουτίνα για την αντλία τροφοδοσίας με τον κινητήρα ΣΡ και τον ανακτητή ενέργειας. Ο αρχικός σχεδιασμός ελέγχθηκε και επιβεβαιώθηκε με επαναλαμβανόμενες εκτελέσεις του TRNSYS. Επίσης, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όπως η αγωγιμότητα και η ποσότητα του παραγόμενου νερού από τις μεμβράνες, η πίεση και η παροχή της αντλίας και του ανακτητή με τα πειραματικά δεδομένα. Η σύγκριση των υπολογισμένων αποτελεσμάτων με τα πειραματικά έδωσε αρκετά καλό συντελεστή συσχέτισης (93%).

Τέλος πραγματοποιήθηκε λεπτομερής οικονομική ανάλυση (για όλους του δυνατούς συνδυασμούς των πηγών ενέργειας με τη μονάδα ΑΩ) με χρήση της μεθόδου ανάλυσης κινδύνου (Risk Analysis), όπου υπολογίστηκε ότι το κόστος του παραγόμενου νερού, για το σύστημα με απευθείας σύνδεση (χωρίς μετατροπέα) ανήλθε σε 8.5 €/ m<sup>3</sup> με 100% θετικές τιμές της καθαρής παρούσας αξίας, ενώ εάν ληφθεί πιθανότητα 5% η καθαρή παρούσα αξία να είναι αρνητική, το κόστος του νερού διαμορφώνεται σε 7.8 €/ m<sup>3</sup>. Η τιμή αυτή καθιστά το σύστημα ανταγωνιστικό, δεδομένου ότι το κόστος μεταφοράς του νερού στα νησιά με καράβια (σημειωτέον μη πόσιμο νερό) ήταν περίπου 7.7 €/m<sup>3</sup> όπως καταγράφηκε το 2007 για τα νησιά του Αιγαίου. Για αυτό το λόγο η συγκεκριμένη τοπολογία με απευθείας σύνδεση (χωρίς μετατροπέα) κρίνεται ως η πλέον ενδεδειγμένη από τεχνική αλλά οικονομική άποψη.

AGRICULTURAL UNIVERSITY OF ATHENS

DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES MANAGEMENT AND  
AGRICULTURAL ENGINEERING

**INVESTIGATION OF ELECTRICITY PRODUCTION TECHNOLOGIES FROM  
RENEWABLE ENERGY SOURCES FOR SEA WATER DESALINATION BY REVERSE  
OSMOSIS**

PhD Thesis  
By  
Essam Shaban Mohamed

**ABSTRACT**

This work focuses on the study of several topologies of a sea water reverse osmosis desalination unit powered by a hybrid renewable energy system, consists of photovoltaic panels, solar battery bank and small wind turbine. Initially, a conventional sea water reverse osmosis unit without energy recovery and powered by electricity from the main grid was experimentally studied. The nominal capacity of the desalination unit is 1.7 m<sup>3</sup>/day, contains one membrane module, one high pressure vessel, a centrifugal feed water pump powered by an AC motor with an installed nominal power of 1 kW and a positive displacement high pressure pump powered by an AC motor with an installed nominal power of 2.2 kW. The feed water was prepared in a feed water tank (1 m<sup>3</sup>) by NaCl solution with electrical conductivity of 35 mS/cm, typically isoosmotic with sea water. The specific energy consumption of the conventional unit was recorded to be 20 kWh/m<sup>3</sup>.

Several modifications were made to the conventional desalination unit in order to be compatible with renewable energy coupling. Modifications like using DC motor (500 W), rotary feed water positive displacement pump, using a pressure exchanger energy recovery device of the Clark pump type and finally adding a second membrane module to increase the water recovery.

In the 1<sup>st</sup> topology, the photovoltaic panels were coupled to the desalination unit through the charge controller and the battery bank. In the 2<sup>nd</sup> topology, the photovoltaic panels (846 Wp) was coupled to the desalination unit through a charge controller and solar batteries (315 Ah/24 V). Also the wind turbine was coupled through a rectifier/charge controller to the same battery bank (hybrid topology). In the 3<sup>rd</sup> topology, a buck DC/DC converter (commonly named Linear Current Booster LCB) was used between the photovoltaic panels and the DC motor to cover the DC motor starting current and generally

to extend the daily operation hours of the desalination unit. In the 4<sup>th</sup> topology, the photovoltaic panels were coupled directly to the DC motor of the desalination unit, without the battery bank and in the 5<sup>th</sup> topology only the wind turbine was coupled to the desalination unit through the rectifier/charge controller and the battery bank. The experimental results showed that the specific energy consumption of the direct coupling topology was the lowest value among all other topologies, and was recorded to be in the range of (4 – 6 kWh/m<sup>3</sup>)

The several topologies of the system were designed and simulated using TRNSYS ver. 16 software. New components were created, such as the membrane module, the Clark pump and the motor pump assembly. Specifically for the design of the desalination unit, the ROSA (Reverse Osmosis System Analysis) software was used.

Finally a detailed economic analysis was performed for all the topologies by using the risk analysis method (Monte Carlo method). The economic analysis showed that the direct coupling of the photovoltaic panels to the desalination unit, was the most economically viable system with water production cost of 7.8 €/m<sup>3</sup>.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό ότι η επιφάνεια της γης καλύπτεται από τεράστιες ποσότητες νερού από τις οποίες δυστυχώς μόνο το 3% θεωρείται πόσιμο ή γλυκό νερό ενώ το υπόλοιπο 97% αποτελεί το νερό των θαλασσών και των ωκεανών, όπως αναφέρει ο *Αλεξάκης*, (1993).

Η γενική βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, κυρίως όμως η εκρηκτική πληθυσμιακή αύξηση των μεγάλων αστικών κέντρων, έχει επιφέρει δυσανάλογη αύξηση της ζήτησης νερού και εξ' ίσου δυσανάλογη σπατάλη. Έτσι, παρατηρείται σταδιακή εξάντληση των πηγών τροφοδότησης νερού μεγάλων περιοχών του πλανήτη. Η ραγδαία όμως αύξηση του πληθυσμού έχει και έναν άλλο σημαντικό και εξ' ίσου θλιβερό αποτέλεσμα: τη ραγδαία αύξηση της μόλυνσης και ρύπανση όλων σχεδόν των υδάτινων αποθεμάτων. Αυτή η ρύπανση προέρχεται τόσο από τα λύματα οικιακής χρήσης όσο και από τα βιομηχανικά απόβλητα και την αλόγιστη χρήση των φυτοφαρμάκων, των ζιζανιοκτόνων και των χημικών λιπασμάτων.

Στον πλανήτη μας υπάρχουν τεράστιες άγονες περιοχές όπου οι κλιματολογικές συνθήκες προσφέρουν ελάχιστη έως μηδενική βροχόπτωση και όπου η έλλειψη νερού είναι σχεδόν απόλυτη. Το πρόβλημα αυτό παρουσιάζουν και πολλές παράκτιες περιοχές όπου η έλλειψη πόσιμου νερού, έστω και υφάλμυρου, είναι του ίδιου επιπέδου όπως στις ηπειρωτικές έρημους. Υπολογίζεται ότι σε όλη τη γη υπάρχουν περίπου 33.000 km άγονες ακτές, το μεγαλύτερο μέρος των οποίων βρίσκεται στον Ινδικό Ωκεανό, στην Αραβική χερσόνησο και κατά μήκος των Αφρικανικών ακτών. Για παρόμοιες περιοχές και εφ' όσον δεν έχει βρεθεί άλλη, οικονομικότερη συμβατική λύση, το μόνο μέσο παροχής νερού είναι η αφαλάτωση, στο βαθμό βεβαίως που το επιτρέπουν οι τοπικές οικονομικές συνθήκες. Από την άποψη αυτή, μια κρίσιμη παράμετρος είναι η διαθεσιμότητα και η επάρκεια των αναγκαίων ενεργειακών πόρων, δεδομένου ότι η αφαλάτωση είναι εν γένει μια εξαιρετικά ενεργοβόρος διεργασία.

Το ενεργειακό πρόβλημα έγινε ιδιαίτερα αισθητό στη δεκαετία του 1970, κυρίως σαν αποτέλεσμα δύο ανεξαρτήτων παραγόντων. Ο πρώτος ήταν η πετρελαϊκή κρίση, που εκδηλώθηκε το 1973, αρχικά με τον απότομο τετραπλασιασμό της τιμής του αργού πετρελαίου και μετέπειτα με άλλες διαδοχικές αυξήσεις. Ο δεύτερος παράγοντας ήταν τα δύο πολύ σοβαρά ατυχήματα που έγιναν στους πυρηνικούς σταθμούς του Three Mile Island της Πενσυλβανίας το 1979 και, κυρίως, του Τσερνομπίλ της Ουκρανίας το 1986.

Το πετρέλαιο σαν καύσιμο και πηγή ενέργειας έχει πολλά πλεονεκτήματα, αλλά και σοβαρά μειονεκτήματα, εκ των οποίων τα σημαντικότερα είναι:

- α) Το πετρέλαιο δεν είναι ανεξάντλητο.
- β) Προκαλεί ρύπανση στο περιβάλλον.

γ) Η γεωγραφική κατανομή του ως φυσικός πόρος είναι περιορισμένη. Δεν το διαθέτουν όλες οι χώρες.

Τα παραπάνω οδηγούν σε ενεργειακή και τεχνολογική εξάρτηση με σημαντικές πολιτικές επιπτώσεις παγκοσμίως.

Η μετατροπή της χημικής ενέργειας των καυσίμων σε ηλεκτρική ενέργεια (Η/Ε) με τη μέθοδο της καύσης συνδέεται με μεγάλες θερμικές απώλειες που φθάνουν το 70%. Επιπροσθέτως λόγω των στιγμιαίων διακυμάνσεων της ζήτησης, των τεχνικών ελαχίστων των πετρελαϊκών μονάδων, της ανάγκης κάλυψης άεργου ισχύος κ.λπ., οι συνολικές απώλειες της παραδοσιακής αυτής μεθόδου είναι πολύ μεγαλύτερες με αποτέλεσμα ένα μικρό μέρος της αρχικής ενέργειας του καυσίμου να μετατρέπεται σε ωφέλιμη Η/Ε. Στην ουσία με τη μέθοδο της καύσης σπαταλάμε τη χημική ενέργεια του καυσίμου, μετατρέποντας την κυρίως σε θερμότητα, επιβαρύνοντας το περιβάλλον με διάφορους ρύπους. Κάτω από αυτές τις συνθήκες αυξάνεται δραματικά το κόστος παροχής Η/Ε στα αυτόνομα δίκτυα. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι το 1998 στα Αντικύθηρα το συνολικό κόστος παραγωγής Η/Ε ήταν 2.2 €/kWh. ενώ το κόστος μόνο καυσίμου των αεροστροβίλων για κάλυψη αιχμών της ζήτησης στην Κρήτη κυμαίνεται από 0.11-0.2 €/kWh και σε άλλα μικρότερα νησιά είναι ακόμη υψηλότερο. Αποτέλεσμα της κατάστασης αυτής, είναι η υψηλή ετήσια ζημιά της ΔΕΗ που για το 1998 πλησίασε τα 200 Μ€, από την παροχή Η/Ε στα νησιά που αγγίζει σε σύνολο τις 3.384 GWh (Κρήτη 1.777 GWh, Ρόδος 472 GWh και υπόλοιπα νησιά 1.135 GWh). Η ζημιά αυτή θα αυξάνεται συνεχώς όσο συνεχίζεται η εγκατάσταση και λειτουργία νέων πετρελαϊκών μονάδων και ιδιαίτερα η χρήση των ενεργοβόρων αεροστροβίλων.

Όπως είναι φανερό, οι σημερινές συνθήκες δημιουργούν ένα πολύ ευνοϊκό κλίμα για την αναζήτηση και εκμετάλλευση άλλων ενεργειακών πηγών, όπως η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, η ενέργεια των κυμάτων, η γεωθερμική ενέργεια, η θερμότητα των ωκεανών, και η βιομάζα.

Στην Ελλάδα πολλές νησιωτικές και παράκτιες περιοχές υποφέρουν είτε από έλλειψη νερού είτε από υποβαθμισμένης ποιότητας νερό (υφάλμυρο). Ταυτόχρονα, στις περισσότερες νησιωτικές περιοχές το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλό και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η παραγωγή φρέσκου νερού μέσω αφαλάτωσης να έχει επίσης υψηλό κόστος. Όμως, στις περισσότερες νησιωτικές περιοχές υπάρχει υψηλό ηλιακό και αιολικό δυναμικό ώστε να προσφέρεται η δυνατότητα συνδυασμού τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) με συστήματα αφαλάτωσης για την παραγωγή φρέσκου νερού. Η λύση αυτή είναι σήμερα όχι μόνο τεχνικά και οικονομικά εφικτή αλλά και περιβαλλοντικά αποδεκτή.

Στην παρούσα διατριβή μελετάται ένα πρωτότυπο σύστημα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης (ΑΩ), εξοπλισμένο με συσκευή ανάκτησης της υδραυλικής ενέργειας της άλμης και υποστηριζόμενο ενεργειακά από ΑΠΕ. Η μονάδα ΑΩ έχει μόνο ένα σημείο κατανάλωσης

ενέργειας, που είναι ένας κινητήρα συνεχούς ρεύματος Η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για τη ΑΩ εξασφαλίζεται από Φ/Β πλαίσια μία ανεμογεννήτρια και ηλεκτρικούς συσσωρευτές.

Η διατριβή διαρθρώνεται στα εξής έξι κεφάλαια:

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ**

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση για τα συστήματα αφαλάτωσης γενικά, και τα συστήματα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης και τις μεμβράνες ειδικότερα. Αναλύονται οι συμβατικές πηγές ενέργειας για την αφαλάτωση, όπως η χρήση της θερμικής ενέργειας από την καύση ορυκτών καυσίμων, η πυρηνική και η ηλεκτρική ενέργεια. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμία, η βιομάζα και η ενέργεια από του ωκεανούς, καθώς και ο συνδυασμός τους με τα συστήματα αφαλάτωσης.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ**

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

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. Διατυπώνονται οι βασικές εξισώσεις των στοιχείων μεμβρανών ΑΩ, καθώς και τα διάφορα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την προσομοίωση της λειτουργίας τους.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αρχικά η συμβατική μονάδα ΑΩ, καθώς και όλες οι συνιστώσες του. Μια μικρή συμβατική μονάδα ΑΩ δεν εμπεριέχει μονάδα ανάκτησης και τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο. Στη συνέχεια αναφέρονται όλες οι αναβαθμίσεις και μετατροπές στη συμβατική αυτή μονάδα ΑΩ. Επίσης, περιγράφονται όλα τα όργανα μέτρησης του συστήματος και το σύστημα συλλογής δεδομένων.



Επίσης, παρουσιάζεται αναλυτικά ο σχεδιασμός της Φ/Β συστοιχίας και της ανεμογεννήτριας, καθώς και οι συσσωρευτές του συστήματος. Αναλυτικά περιγράφονται οι τοπολογίες σύνδεσης των ΑΠΕ και τη μονάδα ΑΩ. Τελικώς αναφέρονται και αναλύονται τα πειραματικά αποτελέσματα από κάθε τοπολογία.

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα καινούρια μοντέλα που αναπτύχθηκαν με σκοπό τη σύνδεσή τους με τα έτοιμα μοντέλα του λογισμικού TRNSYS. Το λογισμικό TRNSYS κρίθηκε κατάλληλο για την προσομοίωση σύνθετων ενεργειακών συστημάτων λόγω της αρθρωτής δομής του και την μεγάλη βιβλιοθήκη μετεωρολογικών δεδομένων που διαθέτει.

Πραγματοποιείται προσομοίωση των διαφόρων τοπολογιών του συστήματος με σκοπό τη χρήση των αποτελεσμάτων στην επιλογή της βέλτιστης τοπολογίας του συστήματος, επίσης και στην οικονομική ανάλυση του επόμενου κεφαλαίου. Παρουσιάζεται επίσης η σύγκριση των πειραματικών δεδομένων του προηγούμενου κεφαλαίου με τα αποτελέσματα της εφαρμογής των καινούριων μοντέλων καθώς και την εφαρμογή του συνολικού μοντέλου.

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ / ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία λεπτομερή περιγραφή της μεθόδου Monte Carlo για τη διαχείριση κινδύνου. Αρχικά γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση για τη συγκεκριμένη μέθοδο και στη συνέχεια αναπτύσσεται η εφαρμογή της για τον προσδιορισμό του κόστους του παραγόμενου νερού. Αναπτύχθηκε μια μάκρο-εντολή σε λογιστικό φύλλο (Excel) για την προσομοίωση της μεθόδου. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του κινδύνου αναλύονται και παρουσιάζονται για κάθε συνδυασμό ΑΩ και Φ/Β ή/και ανεμογεννήτριας.

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ**

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται η σύνοψη των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων της διατριβής καθώς και τις προτάσεις για μελλοντικά πεδία έρευνας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ



# 1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

## 1.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση για τα συστήματα αφαλάτωσης γενικά, και τα συστήματα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης και τις μεμβράνες ειδικότερα. Αναλύονται οι συμβατικές πηγές ενέργειας για την αφαλάτωση, όπως η χρήση της θερμικής ενέργειας από την καύση ορυκτών καυσίμων, η πυρηνική και η ηλεκτρική ενέργεια. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμία, η βιομάζα και η ενέργεια από του ωκεανούς, καθώς και ο συνδυασμός τους με τα συστήματα αφαλάτωσης.

Παρουσιάζονται επίσης τα διάφορα συμβατικά και καινούρια συστήματα ανάκτησης ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης. Συμπερασματικά η βιβλιογραφική ανασκόπηση οδηγεί στην αιτιολογημένη επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού ΑΠΕ και μονάδες αφαλάτωσης εξοπλισμένα με κατάλληλη συσκευή ανάκτησης ενέργειας. Επίσης η βιβλιογραφική ανασκόπηση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω έρευνα για μικρές μονάδες αφαλάτωσης ΑΩ, εξοπλισμένες με συσκευές ανάκτησης ενέργειας και τροφοδοτούμενες με ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ.

## 1.2 Τεχνολογίες και συστήματα αφαλάτωσης

Η αφαλάτωση 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. Οι μέθοδοι αφαλάτωσης, που βρήκαν ευρεία εφαρμογή, έχουν πλήρως δοκιμαστεί και κυκλοφορούν στο εμπόριο τα τελευταία 30 έως 40 χρόνια είναι η εξάτμιση (απόσταξη), η ιοντικές μέθοδοι, και η αντίστροφη ώσμωση. Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι αφαλάτωσης αλλά δεν βρήκαν ευρεία εμπορική εφαρμογή, όπως η ψύξη και η απόσταξη με μεμβράνες, όπως αναφέρουν οι *Δεληγιάννη and Μπελεσιώτης*, (1995).

### 1.2.1 Η απόσταξη

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.

Η μέθοδοι αφαλάτωσης με απόσταξη κατατάσσονται σε τέσσερις μεγάλες ομάδες:

#### 1.2.1.1 Εξάτμιση με πολλαπλές βαθμίδες (*Multiple - Effect – Evaporation* ή *ME*)

Η εγκατάσταση αφαλάτωσης αποτελείται από ένα λέβητα θέρμανσης, ένα εξατμιστήρα, ένα συμπυκνωτή των ατμών και ένα διαχωριστή από όπου ο ατμός περνάει ελεύθερα, αλλά οι λεπτές σταγόνες της άλμης παγιδεύονται και αποχωρίζονται από τον ατμό.

Η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας στους εξατμιστήρες μίας βαθμίδας οδήγησε στην κατασκευή εξατμιστήρων με περισσότερες βαθμίδες, δηλαδή πολλούς εξατμιστήρες συνδεδεμένους σε σειρά, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη εκμετάλλευση της θερμότητας του όλου συστήματος.

Σε μία εγκατάσταση με πολλές βαθμίδες ο ατμός θέρμανσης εισάγεται μόνο στην πρώτη βαθμίδα, όπου θερμαίνει την άλμη έως τη θερμοκρασία βρασμού (100 °C).

Οι ατμοί που σχηματίζονται στην πρώτη βαθμίδα χρησιμοποιούνται σαν ατμός θέρμανσης στη δεύτερη βαθμίδα, η οποία βρίσκεται σε χαμηλότερη πίεση από την πρώτη ώστε το διάλυμα της άλμης να βράζει σε χαμηλότερη θερμοκρασία κ.ο.κ.

Στις περισσότερες εγκαταστάσεις εξατμιστηρίων πολλαπλών βαθμίδων η κυκλοφορία της άλμης και των ατμών γίνεται κατά ομορροή, όπως αναφέρουν οι *Ameri, et al.*, (2009), *Kamali and Mohebinia*, (2008) και *Rahman, et al.*, (2003).

#### 1.2.1.2 Πολυβάθμια εκρηκτική εξάτμιση ή πολυβάθμιος εκτόνωση. (*Multi - Stage - Flash - Evaporation* ή *MSF*)

Όταν μία ποσότητα θαλάσσιου νερού θερμανθεί σε μια ορισμένη πίεση, σε θερμοκρασία ελάχιστα χαμηλότερη από αυτή του σημείου βρασμού του και στη συνέχεια εισαχθεί σε ένα θάλαμο ο οποίος βρίσκεται σε χαμηλότερη πίεση από αυτή του διαλύματος, τότε θα συμβεί ένας εκρηκτικός, απότομος βρασμός του διαλύματος.

Σε όλη τη μάζα του υγρού σχηματίζονται στιγμιαία φυσαλίδες και το νερό εξατμίζεται έως ότου για την πίεση που επικρατεί επέλθει ισορροπία του διαλύματος με τους σχηματιζόμενους ατμούς.

Ο εκρηκτικός αυτός βρασμός με το σχηματισμό ατμών έχει σαν αποτέλεσμα την ψύξη του διαλύματος.

Η ψύξη αυτή είναι σημαντική π.χ. για την εξάτμιση περίπου του 7% μίας ποσότητας θαλασσίου νερού αρχικής θερμοκρασίας 100 °C, η θερμοκρασία του οποίου φθάνει μετά την εξάτμιση περίπου τους 60 °C.

Για να είναι δυνατή μία νέα εκρηκτική εξάτμιση στην επόμενη βαθμίδα πρέπει η πίεση στο θάλαμο της να είναι χαμηλότερη από αυτή που αντιστοιχεί στο σημείο βρασμού του διαλύματος στην προηγούμενη βαθμίδα., *Ali, et al.*, (1999), *Sommariva, et al.*, (1997) και *Aly and Marwan*, (1995).

### 1.2.1.3 Εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών (*Vapor Compression - VC*)

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 αυτήν 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.

Αυτό επιτυγχάνεται με τη συμπίεση των ατμών σε υψηλότερη πίεση, εφαρμόζοντας μηχανική ενέργεια στο σύστημα με τη βοήθεια ενός συμπιεστή ο οποίος δρα ως αντλία θερμότητας ή με θερμοσυμπίεση χρησιμοποιώντας έναν εκτοξευτή ατμού.

Με την επαναθέρμανση των ατμών σε κατάλληλη πίεση και θερμοκρασία, η ενέργεια που προστίθεται στο σύστημα αντισταθμίζει τις απώλειες πίεσης και κρατά το διάλυμα στο σημείο βρασμού.

Θερμότητα από εξωτερική πηγή παρέχεται στο σύστημα, μόνο κατά την έναρξη της λειτουργίας της εγκατάστασης και για χρονικό διάστημα τόσο όσο απαιτείται για να φτάσει το διάλυμα τροφοδότησης στο σημείο βρασμού.

Οπότε διακόπτεται η παροχή ενέργειας και το σύστημα διατηρείται σε λειτουργία μόνο από την προσφερόμενη ενέργεια του συμπιεστή και από πιθανή συμπλήρωση των απωλειών θερμότητας, από πρόσθετη ηλεκτρική ενέργεια.

Η υπόλοιπη εξωτερική ενέργεια που απαιτείται για την εγκατάσταση είναι αυτή για την κίνηση των αντλιών κυκλοφορίας των διαλυμάτων, όπως διαπιστώνεται από σχετικές αναφορές των *Helal and Al-Malek*, (2006), *Bahar, et al.*, (2004), και *Aybar*, (2002).

#### 1.2.1.4 Αφαλάτωση με ύγρανσης – αφύγρανσης (*Humidification – Dehumidification - HD*)

Σε αυτήν τη διαδικασία ο ξηρός αέρας ανακυκλώνεται με φυσική ή εξαναγκασμένη συναγωγή πάνω από θερμό θαλασσινό νερό. Ο αέρας γίνεται υγρός και στη συνέχεια περνάει μέσα από το συμπυκνωτή για αφύγρανση. Πιο συγκεκριμένα, όταν ο αέρας που κυκλοφορεί έρχεται σε επαφή με το θερμό αλμυρό νερό στον εξατμιστή, μια συγκεκριμένη ποσότητα ατμού εξάγεται στον αέρα. Μέρος του ατμού μπορεί να ανακτηθεί ως συμπύκνωμα φέρνοντας τον υγρό αέρα σε επαφή με μία ψυχρή επιφάνεια σε άλλον εναλλάκτη, όπου το νερό τροφοδοσίας προθερμαίνεται παράλληλα με την λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης, όπως αυτό φαίνεται σε σχετική βιβλιογραφία των *Zamen, et al.*, (2009), *Hou and Zhang*, (2008), και *Hou*, (2008).

### 1.2.2 Η Ιοντικές μέθοδοι

Η ποσότητα των περιεχομένων αλάτων στο νερό τροφοδότησης είναι πρωταρχικής σημασίας, και επηρεάζουν ουσιαστικά την οικονομία της μεθόδου.

Υπάρχουν δύο τρόποι για το διαχωρισμό των Ιόντων από ένα διάλυμα με χρήση των Ιοντικών μεθόδων.

Η μία στηρίζεται στις ηλεκτρικές ιδιότητες των Ιόντων, (ηλεκτροδιάλυση), ενώ η δεύτερη χρησιμοποιεί τις χημικές αντιδράσεις των Ιόντων για το διαχωρισμό (εναλλαγή Ιόντων).

Η μέθοδος εναλλαγής Ιόντων, χρησιμοποιεί ρητίνες ανιόντων και κατιόντων, οι οποίες προσροφούν τα Ιόντα του διαλύματος και τα ανταλλάσσουν με τα κινητά Ιόντα που βρίσκονται στο πλέγμα της ρητίνης.

Η ηλεκτροδιάλυση χρησιμοποιεί μεμβράνες ανιόντων και κατιόντων, οι οποίες σχηματοποιούνται από ρητίνες εναλλαγής και οι οποίες επιτρέπουν τη δίοδο, εκλεκτικά δια των μεμβρανών Ιόντων, υπό την επίδραση ηλεκτρικής ενέργειας ως δύναμης κίνησης.

#### 1.2.2.1 Μέθοδοι εναλλαγής Ιόντων

Οι εγκαταστάσεις εναλλαγής Ιόντων λειτουργούν χωρίς να παρουσιάζουν ιδιαίτερα προβλήματα, έχουν γενικά χαμηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, εργάζονται αυτόματα και επομένως έχουν μικρό λειτουργικό κόστος.

Δεν παρουσιάζουν αξιόλογα προβλήματα διάβρωσης και το νερό τροφοδοτείται χωρίς καμιά προκατεργασία ή προσαρμογή του PH.

Οι μέθοδοι αφαλάτωσης με εναλλάκτες Ιόντων, κατατάσσονται γενικά σε δύο τύπους:

- Μέθοδος σταθεράς κλίνης
- Μέθοδος συνεχούς λειτουργίας

Στη σταθερή κλίνη λειτουργίας οι ρητίνες τοποθετούνται σε δοχεία τα οποία ονομάζονται «φίλτρα» διότι φιλτράρουν το νερό μέσα από τις ρητίνες.

Ενώ στις μεθόδους σταθεράς κλίνης η ρητίνη παραμένει ακίνητη καθώς διοχετεύεται το διάλυμα ή το νερό διαμέσω της κλίνης, στις μεθόδους συνεχούς λειτουργίας η ρητίνη Ιόντων κινείται μαζί με το διάλυμα, έως ένα καθορισμένο σημείο της στήλης.

Η χρήση της μεθόδου αφαλάτωσης εναλλαγής ιόντων παραμένει περιορισμένη σε υφάλμυρα νερά, λόγω κυρίως προβλημάτων με την αναγέννηση των ρητινών, όπως έχουν αναφέρει οι *Lee, et al.*, (2009), *Jacob*, (2007), *Gong, et al.*, (2006), *Ginde and Chieh*, (1972), και *Tsunoda and Kato*, (1967).

#### 1.2.2.2 Ηλεκτροδιάλυση (Electro Dialysis ή ED)

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 την μεγαλύτερη συγκέντρωση και με την εφαρμογή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος.

Ανάλογα με τη πορεία της λειτουργίας μίας μονάδας, ηλεκτροδιάλυσης η μέθοδος χωρίζεται σε :

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

Η ασυνεχής ηλεκτροδιάλυση ήταν η πρώτη μέθοδος που εφαρμόστηκε σε αλμυρά και υφάλμυρα νερά.

Αποτελείται από ένα κελί ηλεκτροδιάλυσης και μία δεξαμενή συλλογής του αφαλατούμενου διαλύματος το οποίο επανακυκλοφορούσε μεταξύ των μεμβρανών.

Η συμβατική ή μίας κατεύθυνσης ηλεκτροδιάλυση, αποτελείται συνήθως από δύο βαθμίδες σε σειρά σε ένα κελί ή δύο κελιά μπορούν να συνδεθούν στη σειρά.

Στην ανάστροφη ηλεκτροδιάλυση, αλλάζει η πολικότητα των ηλεκτροδίων κάθε 15 ή 20 λεπτά, με αποτέλεσμα τη σύγχρονη αλλαγή κατεύθυνσης των Ιόντων μέσα στα χωρίσματα των μεμβρανών, μετατρέποντας την άνοδο σε κάθοδο και αντίστροφα, εναλλάσσοντας με τον τρόπο αυτό τα κελιά της αραίωσης σε συμπύκνωση και αυτά της συμπύκνωσης σε αραίωση, όπως αναφέρουν οι *Lee, et al.*, (2009), *Sadrzadeh and Mohammadi*, (2008), *Banasiak, et*



*al.*, (2007), *Sadrzadeh, et al.*, (2007), *Lee, et al.*, (2002), *Pilat*, (2001) και *Nikonenko, et al.*, (1999).

### **1.2.3 Αφαλάτωση με ψύξη (Freezing process)**

Δεν έχει βρει ακόμη βιομηχανική εφαρμογή παρ' όλο ότι είναι μία 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 σχηματίσουν μεγάλοι κρύσταλλοι πάγου. Οι λεπτοί κρύσταλλοι συγκρατούσαν στην επιφάνεια τους τα άλατα για την απομάκρυνση των οποίων έπρεπε να χρησιμοποιείται σχεδόν η μισή ποσότητα του νερού. Έτσι η μέθοδος κρίθηκε ανπιοικονομική. Η αφαλάτωση με ψύξη έχει μελετηθεί από τους *Rice and Chau*, (1997), *Cheng, et al.*, (1987), *Abdul-Fattah*, (1987), *Schroeder*, (1980), *Lloyd*, (1977) και *Fournier, et al.*, (1974).

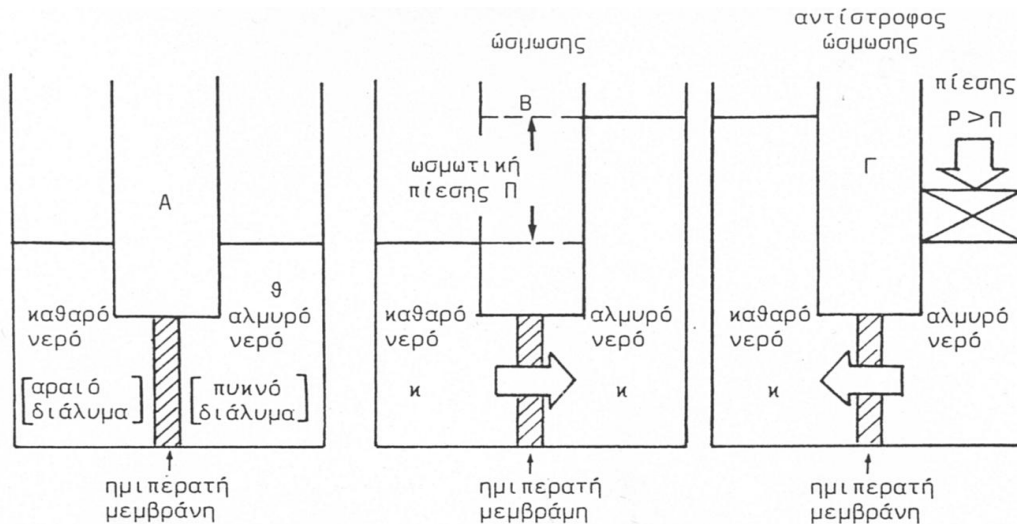
### **1.2.4 Απόσταξη με μεμβράνες (Membrane Distillation)**

Η απόσταξη με μεμβράνες, είναι διεργασία η οποία λειτουργεί με κινούσα δύναμη τη διαφορά θερμοκρασίας. Η διαφορετική θερμοκρασία εκατέρωθεν των πλευρών μιας μικροπερατής υδρόφοβης μεμβράνης επιτρέπει το διαχωρισμό των δύο φάσεων ενός υγρού, με τα μόρια των σχηματιζόμενων ατμών του θερμότερου διαλύματος να μεταφέρονται μέσα από τους πόρους της διαχωριστικής μεμβράνης. Πρόκειται για μέθοδο που δεν έχει βρει ακόμα εφαρμογές σε ευρείας κλίμακα, αν και παρατηρείται τα τελευταία χρόνια αναγέννηση του ενδιαφέροντος για τη μέθοδο αυτή, λόγω των δυνατοτήτων συνδυασμού της με τη θερμική ηλιακή ενέργεια. Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι έχει χαμηλό κόστος συντήρησης και λειτουργίας, χρειάζεται πηγή ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας, μπορεί να λειτουργεί ικανοποιητικά με μεταβλητή πηγή θερμικής ενέργειας, οι μεμβράνες δε μολύνονται συχνά, και λειτουργεί με ατμοσφαιρική πίεση. Όμως, η απόσταξη με μεμβράνες έχει και μειονεκτήματα όπως το χαμηλό ρυθμό παραγωγής αφαλατωμένου νερού και η αβεβαιότητα του κόστους του παραγόμενου νερού. Η απόσταξη με μεμβράνες έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές όπως οι *Blanco Gálvez, et al.*, (2009), *Banat and Jwaied*, (2008), *Koschikowski, et al.*, (2003) και *Cabassud and Wirth*, (2003).

## 1.2.5 Η Αντίστροφη Ωσμωση

### 1.2.5.1 Η ώσμωση και ωσμωτική πίεση

Στην Εικόνα 1-1 απεικονίζεται σχηματικά η αρχή λειτουργίας της αντίστροφης ώσμωσης. Στο θάλαμο Κ υπάρχει καθαρό νερό, ενώ στο θάλαμο Θ έχει τοποθετηθεί θαλασσινό νερό. Τα δύο νερά χωρίζονται από μία διεκλεκτική μεμβράνη και βρίσκονται σε συνηθισμένη ατμοσφαιρική πίεση (Δεληγιάννη and Μπελεσιώτης, 1995).



Εικόνα 1-1: Σχηματική παράσταση της ωσμωτικής πίεσης Α, στο σημείο ισορροπίας Β και της αντίστροφης της ωσμωτικής πίεσης Γ. Πηγή: Δεληγιάννη and 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.

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 της 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.

#### 1.2.5.2 Η διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης

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 1-1 Γ, η μεταφορά του νερού προς το θάλαμο Κ αυξάνει την αλμυρότητα του, επομένως και την ωσμωτική του 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.

#### 1.2.5.3 Οι Μembrάνες αντίστροφης ώσμωσης

Οι μεμβράνες 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 κolloειδή, όπως βακτηρίδια, ιούς, πυριτικό οξύ, άργιλο, κ.λπ. 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:

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 σχηματοποιείται 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, πολυακριλο-νιτρίλια, PAN, πολυσουφλόνες, PS, φθοριούχο πολυβινυλιδένιο, PVDF, πολυβινύλ-ιμυδαζολίνη, PVI, κλπ, (Δεληγιάννη and Μπελεσιώτης, 1995).

#### 1.2.5.4 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).

Κατά την παρασκευή τους σχηματοποιούνται σε δύο μορφές:

1. Σε επίπεδο σχήμα
2. Σε σωληνωτή μορφή με διάμετρο από 85 mm 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)
2. Στοιχείο κοίλων ινών (hollow fiber module)
3. Σωληνοειδές στοιχείο (tubular module)
4. Δισκοειδή στοιχεία (Platte and frame modules)

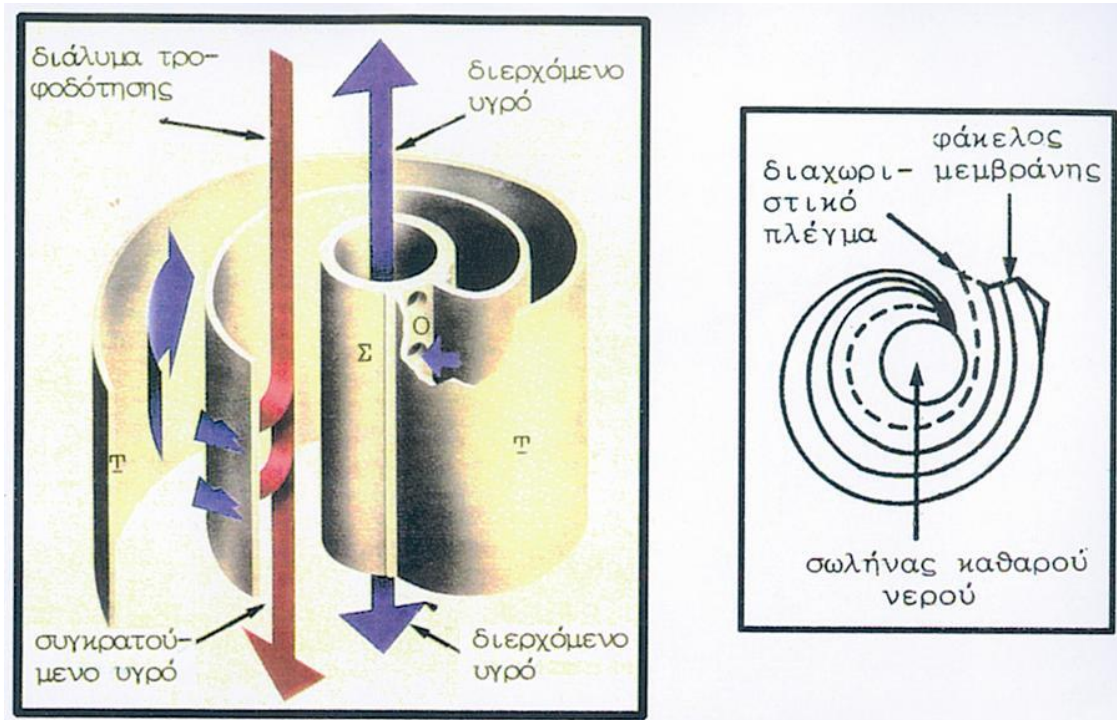
Οι δύο πρώτοι τύποι στοιχείων έχουν την ευρύτερη εφαρμογή στην αντίστροφη ώσμωση για την παραγωγή καθαρού νερού από αλμυρά ή θαλάσσιο νερό.

### Στοιχεία σπειροειδούς περιέλιξης

Τα στοιχεία της σπειροειδούς περιέλιξης πρωτοεμφανίστηκαν στο μεγαλύτερο εμπόριο στις αρχές της δεκαετίας του 70 και χρησιμοποιούνται στο μεγαλύτερο ποσοστό των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση.

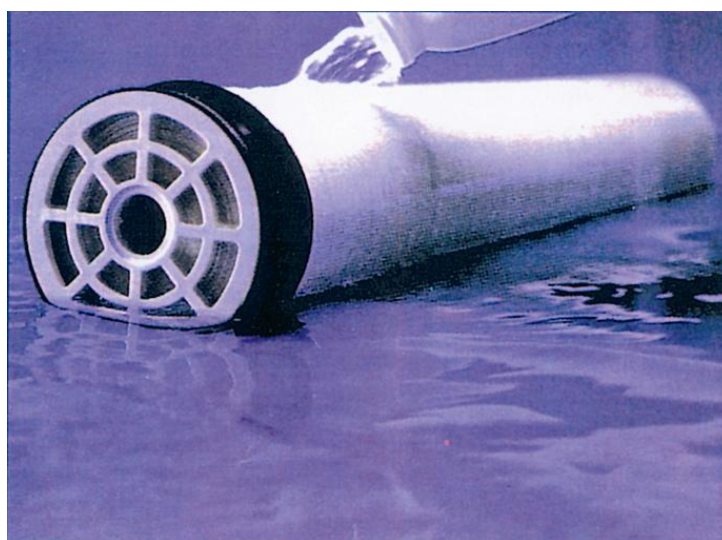
Τα σύγχρονα στοιχεία αποτελούνται από πολλές επίπεδες μεμβράνες, οι οποίες ανά δύο συγκολλούνται από τις τρεις πλευρές σχηματίζοντας ένα είδος φακέλου. Μεταξύ των μεμβρανών τοποθετείται ένα στήριγμα από πορώδες υλικό, το οποίο συγκρατεί τις δύο μεμβράνες χωριστά εμποδίζοντάς τες να ενωθούν υπό την επικρατούσα πίεση, συγχρόνως δε, βοηθούν στην καλή κατανομή της ροής του καθαρού νερού ώστε να ρέει ομοιόμορφα μεταξύ των μεμβρανών και να εξάγεται από το άνοιγμα του φακέλου. Το στήριγμα αποτελείται συνήθως από ένα πλέγμα από ντακρόν, το οποίο εμποτίζεται με μια ρητίνη. Οι δύο άκρες των μεμβρανών του ανοικτού τμήματος προσκολλώνται σε ένα σωλήνα με ανοίγματα, από όπου απομακρύνεται το καθαρό νερό. Συνήθως έως 26 φάκελοι μεμβρανών με στήριγμα ή όπως αλλιώς ονομάζεται «σάντουιτς» τοποθετούνται στον κεντρικό σωλήνα. Οι φάκελοι χωρίζονται μεταξύ των από ένα πλαστικό πλέγμα γνωστό ως «χώρισμα» του καναλιού της άλμης. Το σύστημα των φακέλων και των χωρισμάτων τυλίγονται γύρω από τον κεντρικό σωλήνα σχηματίζοντας, σε σχήμα κυλίνδρου, τη σπειροειδή περιέλιξη.

Η Εικόνα 1-2 παριστάνει σχηματικά, σε μερική ανάπτυξη ένα τμήμα στοιχείου σπειροειδούς περιέλιξης, σε τομή. Το τοίχωμα (Τ) (μεμβράνη) με τα υποστηρίγματα είναι συγκολλημένο στις δύο του άκρες στον κεντρικό σωλήνα (Σ), το σωλήνα του παραγόμενου νερού. Το διάλυμα τροφοδότησης, αλμυρό ή θαλάσσιο νερό (κόκκινη γραμμή) ρέει παράλληλα.

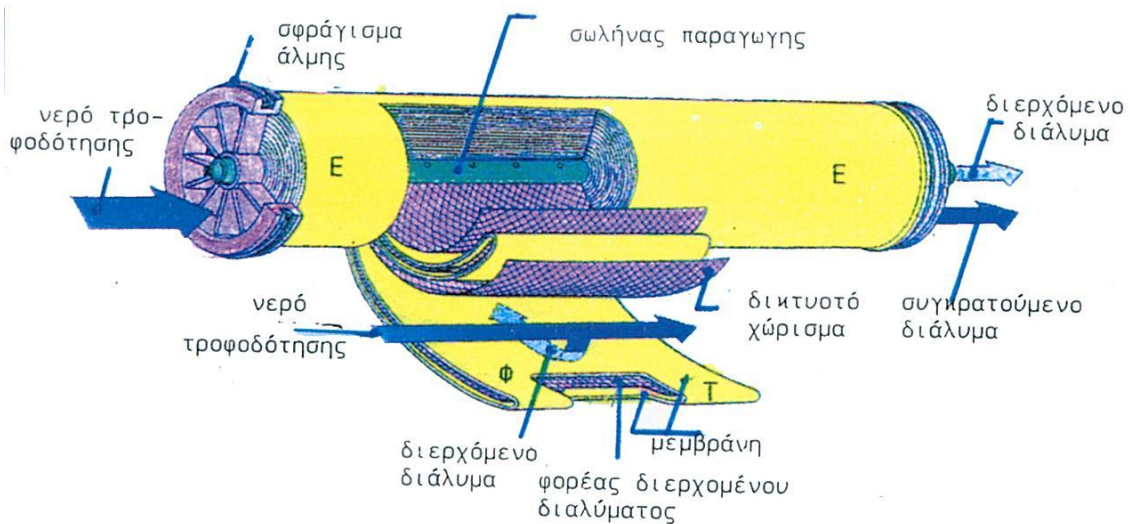


Εικόνα 1-2: Υπόδειγμα ροής του διαλύματος δια μιας μεμβράνης σπειροειδούς περιέλιξης (IONPURE, Lit. No IP004), και τομή της περιέλιξης

Το διάλυμα τροφοδότησης, αλμυρό ή θαλάσσιο νερό (κόκκινη γραμμή) ρέει παράλληλα προς την επιφάνεια της μεμβράνης όπου, υπό την επικρατούσα πίεση (P), ένα τμήμα του διέρχεται δια της μεμβράνης ως καθαρό νερό (μπλε γραμμή), εισάγεται στον κεντρικό σωλήνα από τις οπές (O) και συλλέγεται σαν καθαρό νερό. Το συγκρατούμενο υγρό εμπλουτίζεται σε άλατα και εξάγεται ως συμπύκνωμα ή άλμη. Στην Εικόνα 1-3 και Εικόνα 1-4 , δίνεται η εξωτερική μορφή ενός στοιχείου μεμβράνης σπειροειδούς περιέλιξης.

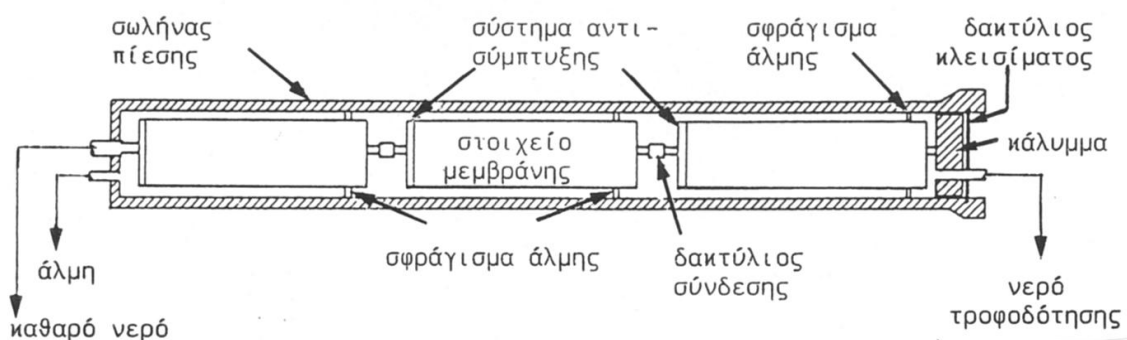


Εικόνα 1-3: Εξωτερική μορφή ενός στοιχείου μεμβράνης σπειροειδούς περιέλιξης (IONPURE Technologies Corp.).



Εικόνα 1-4: Κατασκευαστικό υπόδειγμα στοιχείου με σπειροειδή περιέλιξη μεμβράνης και φορά κυκλοφορίας των διαλυμάτων. (Το στοιχείο είναι τύπου ROMEBRA SU-800 της TORAY Industries Inc. Japan).

Τα στοιχεία των μεμβρανών έχουν συνήθως μήκος 30.5 έως 152 cm με διάμετρο 5.1 έως 30.5 cm (12.0 έως 60 inch και διάμετρο 2 έως 12 inch). Δύο έως και έξι στοιχεία μεμβρανών συνδυάζονται εν σειρά σε ένα κυλινδρικό σωλήνα πίεσης, από ειδικό πλαστικό ή μέταλλο σχηματίζοντας ένα στοιχείο αντίστροφης ώσμωσης το οποίο λειτουργεί σε πίεση έως 70 bar. Τα στοιχεία των μεμβρανών χαρακτηρίζονται από μεγάλη πυκνότητα περιέλιξης, η οποία ανέρχεται σε περίπου 600 m<sup>2</sup> επιφάνεια μεμβράνης ανά m<sup>3</sup> όγκου σωλήνα πίεσης. Στην Εικόνα 1-5 δίνεται η διάταξη ενός στοιχείου αντίστροφης ώσμωσης που αποτελείται από τρία στοιχεία μεμβράνης ελικοειδούς περιέλιξης. Το συνηθέστερο μήκος ενός στοιχείου αντίστροφης ώσμωσης είναι 6.1 m (240 inch).



Εικόνα 1-5: Διάταξη ενός στοιχείου αντίστροφης ώσμωσης με τρία στοιχεία μεμβρανών.

Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται στα στοιχεία μεμβρανών ποικίλουν ανάλογα με την κατασκευαστική εταιρεία και με την προοδευτική έρευνα είναι δυνατόν να αλλάζουν. Συνήθως χρησιμοποιούνται ασύμμετρες μεμβράνες οξικής κυτταρίνης ή ασύμμετρες μεμβράνες από γραμμική αρωματική πολυαμίδη. Οι λεπτού υμένα σύνθετες μεμβράνες



όπως από πολυακρυλονιτρίλιο, αρωματικές πολυαμίδες, θειομένες πολυσουλφόνες κ.λπ., υπάρχουν σε σχετικά μεγαλύτερη ποικιλία στο εμπόριο από τις ασύμμετρες και δεν παρουσιάζουν τα μειονεκτήματα των μεμβρανών οξικής κυτταρίνης.

Οι μεμβράνες της οξικής κυτταρίνης έχουν γενικά μικρότερο κόστος, συνήθως έως 30% για το ίδιο μέγεθος, σε σύγκριση με τις σύνθετες λεπτού υμένα και είναι επιπλέον ανθεκτικές στην χλωρίωση. Παρουσιάζουν όμως ορισμένα **μειονεκτήματα** όπως π.χ.:

1. Βιολογική αποσάθρωση (biodegradation) η οποία είναι αποτέλεσμα της συσσώρευσης και της προσβολής της μεμβράνης από τα διάφορα μικρόβια τα οποία περιέχονται στο νερό τροφοδότησης. Η αποσάθρωση αποφεύγεται με τη διαρκή χλωρίωση του νερού τροφοδότησης.
2. Αντέχουν σε θερμοκρασίες έως 35 °C. Σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες υφίσταται ισχυρή συμπίεση των πόρων τους, με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η απόδοσής τους.
3. Υδρολύονται από τα οξέα ή τα αλκάλια του νερού ή του διαλύματος. Συνήθως τα επιτρεπόμενα όρια του pH είναι 3 έως 8, το pH όμως της λειτουργίας τους περιορίζεται γύρω στα 4.7 όπου παρατηρείται η μικρότερη υδρόλυση των μεμβρανών. Η έκπλυση των μεμβρανών γίνεται επίσης, από νερό με pH γύρω στα 4.7. Η υδρόλυση των μεμβρανών έχει σαν αποτέλεσμα την ελάττωση της απόδοσης λειτουργίας τους.
4. Η αναπόφευκτη μερική υδρόλυση των μεμβρανών οξικής κυτταρίνης, ως αποτέλεσμα μακρόχρονης χρήσης τους σε υψηλές πιέσεις, ελαττώνει την ικανότητα της απόρριψης των αλάτων του νερού με αποτέλεσμα το αφαλατωμένο νερό να αυξάνει σε περιεχόμενα άλατα.

Αντίθετα λεπτού υμένα σύνθετες μεμβράνες έχουν ορισμένα **πλεονεκτήματα** λειτουργίας σε σύγκριση με τις μεμβράνες οξικής κυτταρίνης.

1. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία διαλογής στο εμπόριο, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας που επιδιώκονται.
2. Δεν προσβάλλονται από τα μικρόβια του νερού ακόμα και σε περιπτώσεις όπου λόγω ευνοϊκών συνθηκών αναπτύσσονται αποικίες μικροβίων στην επιφάνειά τους.
3. Παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στην υδρόλυση. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει τη λειτουργία της αντίστροφης ώσμωσης και την έκπλυση των μεμβρανών σε pH 1 έως 12.0. Λόγω της αντίστασης που παρουσιάζουν στην υδρόλυση έχουν σταθερή απόρριψη αλάτων η οποία ελαττώνεται ελάχιστα μετά από μακροχρόνια χρήση.
4. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι 45 °C χωρίς να παρατηρείται ουσιώδης συμπίεση των πόρων της μεμβράνης. Με χρησιμοποίηση υποστηριγμάτων από ειδικό πορώδες πλαστικό η θερμοκρασία λειτουργίας φθάνει τους 65 °C χωρίς σημαντική



συμπύεση των πόρων. Πολλές από τις σύνθετες μεμβράνες λεπτού υμένα λειτουργούν με τις βέλτιστες συνθήκες ροής, ιδιότητα που έχει σαν συνέπεια την ελάττωση του κόστους ενέργειας εφόσον λειτουργούν με μικρότερες πιέσεις.

Οι μεμβράνες λεπτού υμένα παρουσιάζουν δύο **μειονεκτήματα**:

1. Δεν έχουν καμιά αντοχή στο χλώριο. Νερά τα οποία έχουν υποστεί προκατεργασία με χημικά που περιέχουν χλώριο πρέπει να εξουδετερώνονται με διθειούχο νάτριο ή να διηθούνται από ενεργό άνθρακα. Η ιδιότητα αυτή παρουσιάζεται με διαφορετική κλιμάκωση της αντοχής σε περιεχόμενο χλώριο στις διάφορες μεμβράνες.
2. Έχουν υψηλό κόστος αγοράς, συγκρινόμενες με τις μεμβράνες οξικής κυτταρίνης.

### Στοιχεία κοίλων ινών

Οι μεμβράνες σε μορφή κοίλων ινών, όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, πρωτοπαρουσιάστηκαν από την Dow Chemical Co., για αλμυρά και υφάλμυρα νερά. Λίγο αργότερα, γύρω στα 1974, η εταιρία Du Pont de Nemours, παρουσίασε μεμβράνες κοίλων ινών από αρωματικές πολυαμίδες τις οποίες ονόμασε «αραμίδες» (aramide). Οι νέες μεμβράνες είχαν την εξωτερική διάμετρο μιας ανθρώπινης τρίχας, το πλεονέκτημα να είναι σταθερές και να αποτελούν οι ίδιες οι ίνες ένα σωλήνα υψηλής πίεσης. Οι μεμβράνες αραμίδης χρησιμοποιήθηκαν στην αφαλάτωση του θαλάσσιου νερού με τη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης. Οι μεμβράνες αραμίδης είναι ασύμμετρες και αποτελούνται από ένα εξωτερικό λεπτό υμένα ο οποίος σχηματίζει την ενεργό επίστρωση της μεμβράνης, ενώ το υπόλοιπο πάχος του σωλήνα χρησιμεύει ως πορώδες υποστήριγμα του λεπτού υμένα.

Όλος ο σωλήνας είναι μορφοποιημένος από αραμίδη και παρουσιάζει μεγάλη ανοχή στην πίεση ώστε οι ίνες να μην χρειάζονται υποστήριγμα. Η μεταφορά του νερού είναι από την εξωτερική πλευρά του υμένα προς την εσωτερική κοιλότητα των ινών. Εκατοντάδες χιλιάδες λεπτές κοίλες ίνες σχηματίζουν ένα κυλινδρικό θύσανο, τοποθετημένο σε ένα σωλήνα πίεσης. Το σύνολο αποτελεί ένα στοιχείο αντίστροφης ώσμωσης λεπτών κοίλων ινών (fine hollow fiber module) ή όπως ονομάστηκε έναν διαχωριστή (permeator) .

Ανάλογα με την κατασκευή του στοιχείου η πυκνότητα των κοίλων ινών κυμαίνεται από  $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$  για μεμβράνες διάφορων οργανικών συνθέσεων έως  $5000 \text{ m}^2/\text{m}^3$  για τις μεμβράνες αραμίδης. Η πίεση λειτουργίας ανέρχεται στα 70 bar.

### Σωληνωτά στοιχεία

Τα σωληνωτά στοιχεία χρησιμοποιούνται σήμερα ελάχιστα για την αφαλάτωση νερών με αντίστροφη ώσμωση γιατί έχουν αντικατασταθεί από αυτά της ελικοειδούς περιέλιξης και

των κοίλων ινών. Στην αντίστροφη ώσμωση χρησιμοποιούνται για τη συμπύκνωση και τον καθαρισμό διαλυμάτων με αιωρούμενα στερεά, π.χ. για τη συμπύκνωση φρουτοχυμών, ενώ η κύρια εφαρμογή των είναι στην υπέρ - και μικροδιήθηση.

### Στοιχεία με δίσκους

Το πρώτο στοιχείο της αντίστροφης ώσμωσης χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά γύρω στα 1962 από τον S. Loeb και F. Miltstein στο UCLA σε μία εγκατάσταση πιλότο και είχε τη μορφή μιας φιλτροπρέσας.

Τα στοιχεία μεμβρανών με δίσκους και πλαίσια αποτελούνται από επίπεδες μεμβράνες οι οποίες τοποθετούνται ανάμεσα σε δίσκους σχηματίζοντας ένα «σάντουιτς». Οι δίσκοι τοποθετούνται αλληπάλληλα σε κατακόρυφη διάταξη και χωρίζονται μεταξύ τους από πλαίσια τα οποία φέρουν κανάλια για την κυκλοφορία του νερού. Το όλο σύστημα τοποθετείται σε ένα κατακόρυφο σωλήνα πίεσης. Οι κατακόρυφες αυτές στοιβάδες από μεμβράνες δίσκους και υποστηρίγματα κλείνουν με δύο φλάντζες, από μια σε κάθε άκρο και σταθεροποιούνται με τη βοήθεια ενός μπουλονιού τοποθετημένου στο κέντρο του συστήματος. Το στοιχείο αντίστροφης ώσμωσης έχει μία διάταξη παρόμοια με φιλτροπρέσα ή παρόμοια με τα κατακόρυφα κελιά της ανάστροφης ηλεκτροδιάλυσης.

## 1.3 Πηγές ενέργειας για την αφαλάτωση

### 1.3.1 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, όπως αναφέρει οι *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 όσον το δυνατόν φθηνού αφαλατωμένου νερού.

### 1.3.2 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 αντισυμβατική.

Η σύζευξη μιας εγκατάστασης αφαλάτωσης με ένα **πυρηνικό εργοστάσιο** εμπίπτει πρακτικά σε δυαδικό συγκρότημα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος - αφαλατωμένου νερού, όπως αναφέρει ο *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, όπως αναφέρεται στο *Nisan and Benzarti*, (2008), *Nisan and Dardour*, (2007), και *Wu*, (2006).

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 θερμότητα, **η απορριπτόμενη αυτή ενέργεια** μπορεί, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, να χρησιμοποιηθεί για την αφαλάτωση, όπως αναφέρουν οι *Shih and Shih*, (2007), *Low and Tay*, (1991) και *El-Dessouky*, (1989). Παρόμοιοι συνδυασμοί έχουν εφαρμοστεί σε βιομηχανίες για την εξοικονόμηση ενέργειας και την παραγωγή νερού για χρήση στις κατεργασίες των εγκαταστάσεων.

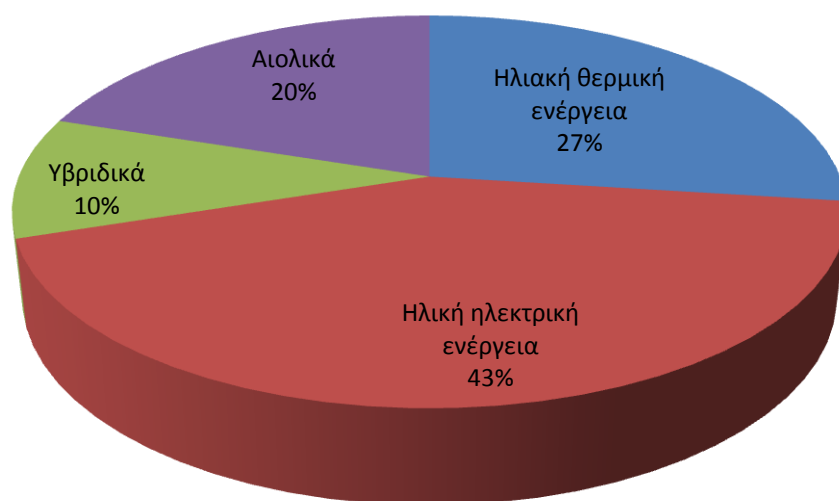
Παρόμοιες πηγές ενέργειας μπορούν να αξιοποιηθούν από βιομηχανίες οι οποίες χρησιμοποιούν υψηλές θερμοκρασίες και τα προϊόντα τους ψύχονται στο τελικό ή ενδιάμεσο στάδιο κατεργασίας, όπως π.χ. τσιμεντοβιομηχανίες, βιομηχανίες παραγωγής γυαλιού, σιδηροβιομηχανίες κ.λ.π. **Ιδιαίτερα χρήσιμη απορριπτόμενη θερμότητα είναι των απαερίων των μηχανών Ντίζελ** και αυτών των **αεριοστροβίλων**. Βλέπε *Low and Tay*, (1991), *Toelkes*, (1987) και *Rautenbach and Arzt*, (1983).

### 1.3.3 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:

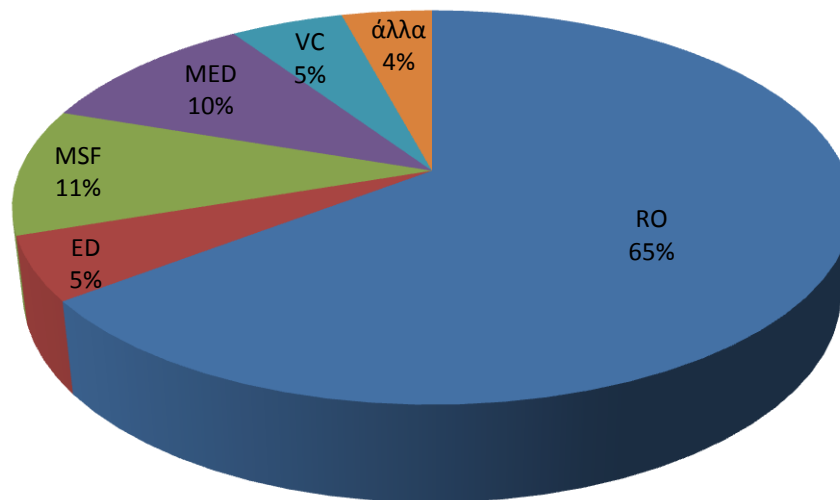
- δεν έχουν συνεχή ροή ώστε να ανταποκρίνονται στη ζήτηση της παραγωγής
- δεν είναι εύκολο να αποθηκευτούν, όπως π.χ. η ηλιακή, σε ποσότητα ή ένταση για την απρόσκοπτη λειτουργία της εγκατάστασης αφαλάτωσης
- η τεχνολογία συλλογής ή και σύζευξης δεν έχει αναπτυχθεί σε σημείο ώστε να παρέχει τη φθηνή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

Στην Εικόνα 1-6, παρουσιάζεται το ποσοστό συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην αφαλάτωση νερού. Παρατηρούμε ότι η ηλεκτρική ενέργεια από τα Φ/Β αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό συμμετοχής, αναφέρει ο *Mathioulakis, et al.*, (2007).



Εικόνα 1-6: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για αφαλάτωση

Στην Εικόνα 1-7, παρουσιάζονται οι τεχνολογίες αφαλάτωσης που συνδυάζονται με ΑΠΕ. Παρατηρείται ότι 65% από τα συστήματα αφαλάτωσης που συνδέθηκαν με ΠΕ είναι ΑΩ.



Εικόνα 1-7: Τεχνολογίες αφαλάτωσης που συνδυάζονται με ΑΠΕ

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

#### 1.3.3.1 Συστήματα αφαλάτωσης με ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες (ΑΓ), έχουν σαν σκοπό την αποτελεσματική αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες επανήλθαν στο προσκήνιο της ενεργειακής τεχνολογίας στα μέσα της δεκαετίας του εβδομήντα, κυρίως σαν συνέπεια των διαδοχικών ενεργειακών κρίσεων αλλά και της επιδεινούμενης περιβαλλοντικής υποβάθμισης. Σήμερα οι ανεμογεννήτριες είναι μια ώριμη τεχνολογία όπως αυτό προκύπτει από την βιβλιογραφία που περιγράφει γενικά την τεχνολογία, *Dalili, et al., (2009), Fleming and Probert, (1982), Fleming and Probert, (1984b), Fleming and Probert, (1984a), Hameed, et al., (2009), Neustadter and Spera, (1984)*. Και σε πιο ειδικά θέματα έρευνας των ανεμογεννητριών έχουν αναφερθεί οι *Bond, et al., (1994), Lenzen and Munksgaard, (2002)*. και *Sullivan, (1982)*

Η κύρια εφαρμογή των ανεμογεννητριών είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τροφοδοσία της στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο ή σε τοπολογία μικρο-δικτύων. Η αιολική ενέργεια και οι ανεμογεννήτριες σαν αυτόνομα συστήματα έχουν βρει εφαρμογή κατά το μεγαλύτερο μέρος στην άντληση νερού όπως αυτό αποδεικνύεται από τους *Al Suleimani and Rao, (2000), Gilley, et al., (1985), Mohsen and Akash, (1998), Omer, (2001), Ramos and Ramos, (2009)*, και *Ackermann and Söder, (2000)*.

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 και προχωρημένα ηλεκτρονικά ισχύς για τη διαχείριση της χρονικής μεταβλητότητας στην προσφορά αιολικής ενέργειας. Παρόλα αυτά υπάρχουν προσπάθειες για τη χρήση της ανεμογεννήτριες σε απευθείας σύνδεση με τα συστήματα αφαλάτωσης και τη χρήση της ΑΓ με συστήματα αφαλάτωσης με συμπίεση ατμών (VC), όπως αναφέρεται παρακάτω.

Οι *Miranda and Infield*, (2002), εξέταζαν την απευθείας χρήση της ανεμογεννήτριας ισχύος 2.2 kW με σύστημα αφαλάτωσης ΑΩ 3 m<sup>3</sup>/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 (70m<sup>3</sup>/d) . Εφεδρικά και επικουρικά έχει εγκατασταθεί και φωτοβολταϊκό σύστημα, ενώ η μονάδα είναι αυτόνομη και δεν είναι απαραίτητη η σύνδεσή της με 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 *Liu, et al.*, (2007), εγκατέστησαν ένα σύστημα αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού με μεμβράνης χαμηλής πίεσης που τροφοδοτείται απευθείας με μηχανική ενέργεια από μια πολυπτέρυγο ανεμογεννήτρια. Η σταθεροποίηση της πίεσης πραγματοποιείται με χρήση δεξαμενή σταθεροποίησης της πίεσης.

Στην Ισπανία και ειδικότερα στα Κανάρια νησιά, εγκαταστάθηκε σύστημα ΑΩ συνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο δυναμικότητας 200 m<sup>3</sup>/day, όπως αναφέρει ο *Veza, et al.*, (1992). Η διασύνδεση του συστήματος ΑΩ στο ηλεκτρικό δίκτυο λύνει όλα τα προβλήματα αστάθειας της ανεμογεννήτριας. Ένα άλλο σύστημα στην Ισπανία είναι αυτό που υλοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος VALOREN, το οποίο είναι ένα υβριδικό σύστημα με ανεμογεννήτρια 225 kW και γεννήτρια ντίζελ, που τροφοδοτεί ένα σύστημα αφαλάτωσης ΑΩ 56 m<sup>3</sup>/day, όπως αναφέρει ο *Gonzalez*, (1993).

Με την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις ανεμογεννήτριες, μπορούν να συνδυαστούν και συστήματα αφαλάτωσης ηλεκτροδύαλυσης. Τα συστήματα αυτά είναι μόνο για αφαλάτωση υφάλμυρου νερού. Παράδειγμα για εγκατάσταση αφαλάτωσης ηλεκτροδύαλυσης με ανεμογεννήτρια ανέφεραν οι *Vesa, et al.*, (2001).

Η αφαλάτωση με επανασυμπίεση των ατμών (VC) μπορεί να συνδυαστεί επίσης με ανεμογεννήτρια, διότι χρειάζεται στη λειτουργία της και ηλεκτρική ενέργεια μαζί με την θερμική, αναφέρουν οι *Coutelle, et al.*, (1991) και *Plantikow*, (1999).

### 1.3.3.2 Συστήματα αφαλάτωσης με φωτοβολταϊκά

Ο Thomson, et al., (2003), παρουσίασε ένα σύστημα ΦΒ-ΑΩ ονομαστικής δυναμικότητας 3 m<sup>3</sup>/day, με εγκαταστημένη ισχύ ΦΒ συστήματος 2.4 kW<sub>p</sub>. Το σύστημα λειτουργεί χωρίς συσσωρευτές, και είναι εξοπλισμένο με μονάδα ανάκτησης υδραυλικής ενέργειας της άλμης του τύπου Clark rump της εταιρίας Spectra Water makers. Το συνεχές ρεύμα από το ΦΒ σύστημα μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο μέσω δύο αντιστροφών μεταβλητής συχνότητας οι οποίοι τροφοδοτούν απευθείας τους δύο κινητήρες του συστήματος. Το σύστημα είναι επίσης εξοπλισμένο με συσκευή ανίχνευσης σημείου μεγίστης ισχύος (MPPT). Το σύστημα αυτό θεωρείται αρκετά πολύπλοκο με πολλά εξειδικευμένα και υψηλής τεχνολογίας εξαρτήματα, έχει δύο αντλίες και δύο κινητήρες για τον ίδιο σύστημα αφαλάτωσης και τέλος, το σύστημα βασίζεται στην αξιοπιστία των αντιστροφών τα οποία σε περίπτωση βλάβης, σταματούν τη λειτουργία του συστήματος.

A. Colangelo, (1999), εξέταζαν θεωρητικά πέντε διαφορετικούς συνδυασμούς Φ/Β συστημάτων με συστήματα αφαλάτωσης ΑΩ. Τα αποτελέσματα της μελέτης ήταν ως εξής:

- Σύνδεση του Φ/Β συστήματος με τη μονάδα ΑΩ που λειτουργεί με εναλλασσόμενο ρεύμα (ΕΡ): Εκτιμήθηκαν απώλειες στην ενέργεια μεταξύ 15-30% λόγω ύπαρξης των συσσωρευτών και τον αντιστροφή.
- Σύνδεση του Φ/Β συστήματος με δύο παράλληλες μονάδες ΑΩ μέσω αντιστροφή μεταβλητής συχνότητας: Το σύστημα αυτό χαρακτηρίστηκε ως πολύπλοκο και μη πρακτικό.
- Σύνδεση του Φ/Β συστήματος με συσσωρευτές και έπειτα με τη μονάδα ΑΩ που λειτουργεί με συνεχές ρεύμα (ΣΡ): Αυτός ο συνδυασμός είναι απλός και προσφέρει σταθερή λειτουργία της μονάδας ΑΩ αλλά παραμένει η απώλεια ενέργειας λόγω των συσσωρευτών.
- Απευθείας σύνδεση το Φ/Β συστήματος με τη μονάδα ΑΩ συνεχούς ρεύματος χωρίς συσσωρευτές. Αυτός ο συνδυασμός είναι απλός, δεν υπάρχουν απώλειες στην ενέργεια, απαιτεί μειωμένο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας και παρέχει περισσότερη αξιοπιστία στο σύστημα. Ως μειονέκτημα του συνδυασμού αυτού, είναι οι μη σταθερές συνθήκες λειτουργίας της μονάδας ΑΩ.
- Απευθείας σύνδεση του Φ/Β συστήματος με ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος και παράλληλα συστήματα ΑΩ. Ο συνδυασμός αυτός παρουσιάζει υψηλό ποσοστό χρήσης της διαθέσιμης ηλεκτρικής ενέργειας από το Φ/Β σύστημα (76% με δύο συστήματα ΑΩ και 92% με τρία συστήματα ΑΩ). Παρόλα αυτά, το σύστημα έχει υψηλό αρχικό κόστους αγοράς και εγκατάστασης, καθώς και κόστος συντήρησης και λειτουργίας λόγω ύπαρξης δύο συστημάτων ΑΩ.

Υπάρχει αξιόλογη βιβλιογραφία σε συστήματα αφαλάτωσης υφάλμυρου και θαλασσινού νερού με ηλεκτροδύαλυση που τροφοδοτούνται με Φ/Β, όπως αναφέρεται στον *Adiga, et al.*, (1987; *Brauns*, (2008; *Ishimaru*, (1994; *Kuroda, et al.*, (1987a; *Kuroda, et al.*, (1987b; *Ortiz, et al.*, (2006; *Ortiz, et al.*, (2007; *Ortiz, et al.*, (2008).



Πίνακας 1-1: Εγκαταστάσεις αφαλάτωσης με ανεμογεννήτριες

| Νερό τροφοδοσίας | Τόπος εγκατάστασης | Δυναμικότητα παραγωγής  | Εγκαταστημένη ισχύ ΑΓ | Παρατηρήσεις                         | Πηγή  |
|------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------------|---|
| Θαλασσινό        | Ερυθραία           | 3 m <sup>3</sup> /day   | 2.2 kW                | Απευθείας με ηλεκτρονικά ισχύς       | <i>Miranda and Infield, (2002)</i>            |
| Θαλασσινό        | Ελλάδα             | 70 m <sup>3</sup> /day  | 30 kW                 | Με συσσωρευτές και Φ/Β               | <i>Νικητάκος, (2008)</i>                      |
| Υφάλμυρο         | Hawaii, USA        | 0.8                     | Μηχανική σύνδεση      | Με δεξαμενή σταθεροποίησης της πίεση | <i>Liu, et al., (2007)</i>                    |
| Υφάλμυρο         | Ισπανία            | 200 m <sup>3</sup> /day | 250 kW                |                                      | <i>Veza, et al., (1992)</i>                   |
| Θαλασσινό        | Ισπανία            | 25 m <sup>3</sup> /day  | 2Χ230 kW              | Απευθείας σύνδεση με σφόνδυλος       | <i>Carta, et al., (2003)</i>                  |
| Θαλασσινό        | Ισπανία            | 56 m <sup>3</sup> /day  | 225 kW                | Υβριδικό με γεννήτρια ντίζελ         | <i>Gonzalez, (1993), Cruz, et al., (1996)</i> |

Πίνακας 1-2: Εγκαταστάσεις αφαλάτωσης ΑΩ με Φ/Β

| Νερό τροφοδοσίας | Τόπος εγκατάστασης | Δυναμικότητα παραγωγής  | Εγκαταστημένη ισχύ Φ/Β | Παρατηρήσεις                                    | Πηγή                           |
|------------------|--------------------|-------------------------|------------------------|---|--------------------------------|
| Θαλασσινό        | Ερυθραία           | 3 m <sup>3</sup> /day   | 2.4 kW <sub>p</sub>    | Εναλλασσόμενο ρεύμα με αντιστροφέα              | <i>Thomson, et al., (2003)</i> |
| Θαλασσινό        | Ιταλία             | 5 m <sup>3</sup> /day   | 100 kW <sub>p</sub>    | Με συσσωρευτές και εφεδρεία το ηλεκτρικό δίκτυο | <i>Sardi, (1996)</i>           |
| Υφάλμυρο         | Ισπανία- Αλμερία   | 60 m <sup>3</sup> /day  | 23.5 kW <sub>p</sub>   | Με συσσωρευτές και αντιστροφέα                  | <i>Andujar, (1991)</i>         |
| Υφάλμυρο         | Μαρόκο             | 24 m <sup>3</sup> /day  | 4 kW <sub>p</sub>      | Με συσσωρευτές και αντιστροφέα                  | <i>EU, (2007)</i>              |
| Θαλασσινό        | Ελλάδα             | 2.2 m <sup>3</sup> /day | 0.846 kW <sub>p</sub>  | Απευθείας με ανάκτηση και συνεχούς ρεύματος     | <i>Mohamed, et al., (2006)</i> |

### 1.3.3.3 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 μία 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. Αρκετή είναι η βιβλιογραφία που περιγράφει θεωρητικά και πειραματικά τη λειτουργία του ηλιακού αποστακτήρα, όπως αναφέρουν οι *Badran, et al.*, (2005), *Badran and Al-Tahaine*, (2005), *Belessiotis, et al.*, (1995), *Kumar, et al.*, (2008), *Madhlopa and Johnstone*, (2009), *Mamlook and Badran*, (2007), *Marl, et al.*, (2007), *Voropoulos, et al.*, (2001) και *El-Nashar and Samad*, (1996).

Τα συστήματα τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμική περιλαμβάνουν :

- ηλιακές λίμνες οι οποίες παράγουν ζεστό νερό σε θερμοκρασίες έως περίπου 90 °C, με την απόδοσή τους να μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, όπως αναφέρουν οι *Agha*, (2009), *Bezir, et al.*, (2008), *Saxena, et al.*, (2009), και *Velmurugan and Srihar*, (2008).
- τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες οι οποίοι θερμαίνουν νερό σε θερμοκρασίες έως περίπου 95 °C, όπως αναφέρουν οι *Ahmed, et al.*, (2009), *El-Nashar*, (2009) και *Zamen, et al.*, (2009).
- ηλιακούς συλλέκτες με σωλήνες κενού, οι οποίοι φθάνουν το θερμαινόμενο υγρό σε θερμοκρασίες έως 200 °C. Όπως αναφέρουν οι *Ahmed, et al.*, (2009), και *El-Nashar*, (2009).
- οι συκεντρωτικοί συλλέκτες οι οποίοι συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και την εστιάζουν είτε σε ένα κεντρικό σωλήνα όπου κυκλοφορεί το θερμαινόμενο ρευστό, είτε σε ένα κεντρικό λέβητα, αναφέρει ο *Trieb, et al.*, (2009).

#### 1.3.3.4 Υβριδικά συστήματα ΑΠΕ 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.

Συχνά, η ολική οικονομική σύγκριση του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας ενός υβριδικού σε σχέση με το αντίστοιχο καθαρά φωτοβολταϊκό σύστημα, είναι θετική υπέρ του υβριδικού συστήματος, όπως αναφέρουν οι *Bermudez-Contreras, et al.*, (2008), *Fath, et al.*, (2008), *Kaldellis, et al.*, (2001), *Kalogirou*, (2005), *Kershman, et al.*, (2003), *Kershman, et al.*, (2005), *Tzen and Sigalas*, (2004), *Tzen, et al.*, (2008) και *Voivontas, et al.*, (2001).

#### 1.3.3.5 Αφαλάτωση με γεωθερμική ενέργεια

Η γεωθερμική ενέργεια είναι όλη η θερμική ενέργεια η οποία είναι αποθηκευμένη, σε θερμοκρασία υψηλότερη του περιβάλλοντος, στο στερεό πυρήνα της γης.

Πρακτικά ως γεωθερμική ενέργεια θεωρείται η ενέργεια η οποία περιέχεται στα ρευστά που βρίσκονται στην κρούστα της γης και ως 5 km βάθος, που είναι το σημερινό εφικτό βάθος εξόρυξης.

Η μέση γεωθερμική θερμοκρασία αυξάνει κατά 30 έως 35 °C ανά km βάθους ενώ η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών ποικίλει ακόμα και σε κοντινές πηγές σε ευρύτητα όρια, π.χ. σε βάθος 5 km είναι δυνατόν να κυμαίνεται από 80 °C έως θερμοκρασία μεγαλύτερη των 500 °C.

Η γεωθερμική ενέργεια συνδέεται άμεσα με μονάδες αφαλάτωσης με τρεις διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με τον τύπο της πηγής, όπως αναφέρουν οι *Bouguecha and Dhahbi*, (2003), *Bourouni, et al.*, (1999a), *Bourouni, et al.*, (1999b), *Ophir*, (1982) και *Wong*, (1970):

- Εάν οι γεωθερμικές πηγές περιέχουν στη μεγαλύτερη τους αναλογία ατμό υπό πίεση, ο ατμός συμπυκνώνεται, παράγοντας κατ' ευθείαν αφαλατωμένο συμπύκνωμα.
- Όταν η πηγή ελκύει μίγμα νερού και ατμού τότε αρχικά εκτονώνεται κατάλληλα για την παραγωγή από τη μία ατμού, που διοχετεύεται σε ατμοστρόβιλο, και, από την άλλη θερμής άλμης η οποία τροφοδοτείται στον εξατμιστήρα της αφαλάτωσης.

- Γεωθερμικά μίγματα όπου το υγρό βρίσκεται σε πολύ μεγαλύτερη αναλογία από τον ατμό χρησιμοποιούνται σε εξατμιστήρες πολλαπλών βαθμίδων ή πολλαπλών εκτονώσεων, ανάλογα με την ενθαλπία της άλμης.

#### 1.3.3.6 Αφαλάτωση με ενέργεια από βιομάζα

Γενικά η βιομάζα δεν αποτελεί ουσιαστική πηγή ενέργειας για την αφαλάτωση επειδή η ίδια η βιομάζα χρειάζεται νερό για την παραγωγή της. **Η καύση των αστικών απορριμμάτων**, όμως παρέχει διπλή χρησιμότητα σε μια κατοικημένη περιοχή. Απαλλάσσει το περιβάλλον από την, σε μεγάλο βαθμό συσσωρευόμενη, ρύπανση και παρέχει ενέργεια υψηλής θερμοκρασίας, σε μορφή καυσαερίων, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ατμού. Η ενέργεια χρησιμοποιείται για την αφαλάτωση, είτε με τη μέθοδο της εξατμίσσης είτε με αυτή της αντιστρόφου ώσμωσης.

Έχουν γίνει διάφορες προτάσεις και μελέτες, όπως π.χ. η μελέτη για την πόλη του Σαν Ντιέγκο στην Καλιφόρνια, η οποία υπολόγιζε ότι από την καύση των σκουπιδιών της πόλης θα υπήρχε παραγωγή ατμού χαμηλού κόστους και χαμηλού μεν θερμικού περιεχομένου αρκετά όμως υψηλού για την παραγωγή 120.000 m<sup>3</sup>/d αφαλατωμένου νερού με κόστος περίπου 0.1 €/m<sup>3</sup>.

Παρ' όλες όμως τις μελέτες για μεγάλες εγκαταστάσεις σε πρακτική εφαρμογή έχουν κατασκευαστεί μόνο μικρές εγκαταστάσεις τοπικού ενδιαφέροντος, σε σχετικά μικρές παροχές.

#### 1.3.3.7 Αφαλάτωση με χρήση τη ενέργεια από τους ωκεανούς

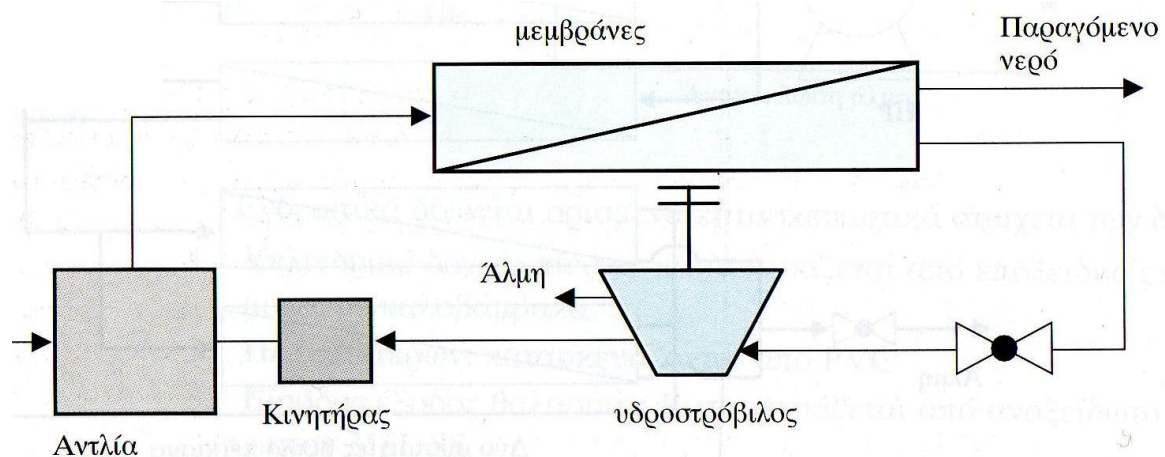
Η χρησιμοποίηση της θερμικής ενέργειας από τους Ωκεανούς (Ocean Thermal Energy Conversion ή OTEC), είναι μια σχετικά νέα εφαρμογή. Οι Ωκεανοί των τροπικών περιοχών αποτελούν μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας η οποία είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί, με χρήση του κύκλου Rankine. Η νέα αυτή πηγή ενέργειας, άρχισε να ερευνάται γύρω στο 1980 με την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και αφαλατωμένου νερού. Η μέθοδος OTEC χρησιμοποιεί τη διαβάθμιση της θερμοκρασίας με το αυξανόμενο βάθος των Ωκεανών. Στην τροπική ζώνη των ωκεανών, η διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ των νερών της επιφάνειας και αυτών που βρίσκονται σε βάθος 500 έως 1000 m, φθάνει τους 27 °C, διαφορά κατάλληλη για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και αφαλατωμένου νερού. Μια άλλη μορφή ενέργειας από τους Ωκεανούς είναι η κινητική ενέργεια από τα κύματα των παλιρροιακών φαινομένων όπως αυτό παρουσιάζεται στη βιβλιογραφία ,όπως αναφέρουν οι *Crerar, et al.*, (1987), *Damy and Marvaldi*, (1987), *Garcia-Rodriguez*, (2003), *Rey and Lauro*, (1981), και *Sharmila, et al.*, (2004).

#### 1.4 Εξοικονόμηση ενέργειας στα συστήματα ΑΩ (ανακτητές ενέργειας)

Η άλμη εξέρχεται από τα στοιχεία αντίστροφης ώσμωσης σε υψηλή πίεση. Έτσι είναι λογικό να χρησιμοποιηθεί κάποιο σύστημα ανάκτησης της ενέργειας πίεσης που περικλείει η άλμη. Αυτό άλλωστε έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της δαπανώμενης ενέργειας για την παραγωγή αφαλατωμένου νερού. 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, αναφέρει ο *Αυλωνίτης*, (2006).

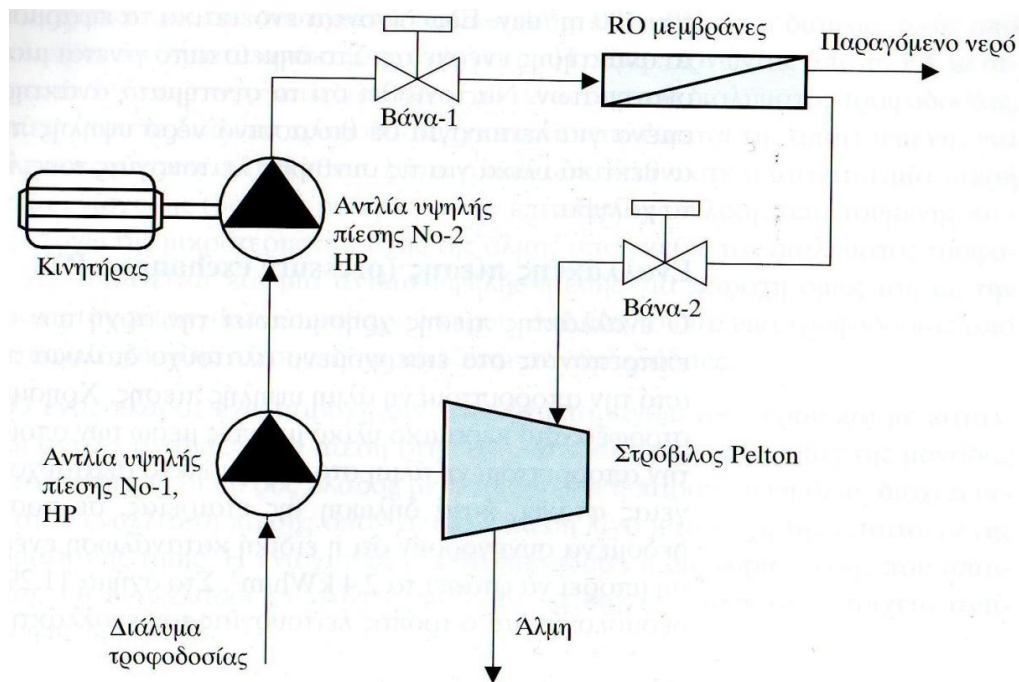
##### 1.4.1 Συμβατικά συστήματα ανάκτηση ενέργειας

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 1-8 φαίνεται σχηματικά η λειτουργία του στρόβιλου ανάκτησης ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο η εξοικονόμηση ενέργειας φτάνει 40% της δαπανώμενης ενέργειας στην αντλία υψηλής πίεσης.



Εικόνα 1-8: Συμβατικό σύστημα ανάκτησης ενέργειας

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 βάνα που υπάρχει στην άλμη. Κλείσιμο της βάνας 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, βλέπετε Εικόνα 1-9.



Εικόνα 1-9: Σύστημα υψηλής πίεσης με ανάκτηση ενέργειας της Grundfos

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 βάνα 2. Αυτό σημαίνει ότι αύξηση της ασκούμενης πίεσης επιτυγχάνεται με τη μείωση του ποσοστού ανάκτησης.

#### 1.4.2 Νέα συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας στην ΑΩ

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 100 m<sup>3</sup>/day.

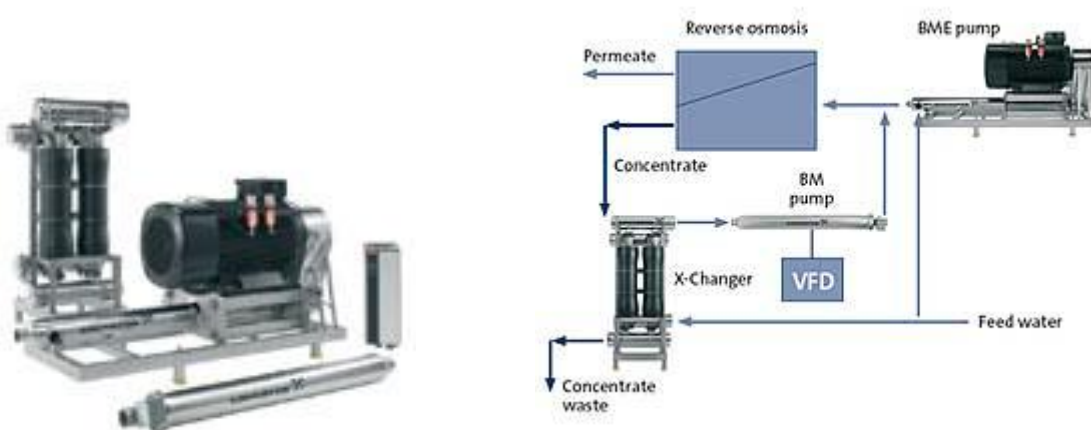
Ένα από τα νέα συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας είναι ο εναλλάκτης πίεσης (Pressure Exchanger PX), *MacHarg*, (2002), που χρησιμοποιεί την αρχή των αντλιών θετικής εκτόπισης επιτρέποντας στο εισερχόμενο θαλασσινό νερό να πιεσθεί από την απορριπτόμενη άλμη υψηλής πίεσης. Χρησιμοποιεί ένα κυλινδρικό περιστροφέα από κεραμικό υλικό με οπές μέσω των οποίων μεταφέρεται η πίεση από την άλμη στο θαλασσινό

νερό. 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 kWh/m<sup>3</sup>, MacHarg, (2001). Τέτοια συστήματα παράγονται σήμερα σε μεγάλη εμπορική κλίμακα, από την εταιρία ERI, βλέπετε Εικόνα 1-10.



Εικόνα 1-10: Ανακτητής ενέργειας τύπου (PX)

Παρόμοιο σύστημα ανάκτησης έχει αναπτυχθεί από την εταιρία Grundfos, Grundfos, (2009), βλέπετε Εικόνα 1-11.



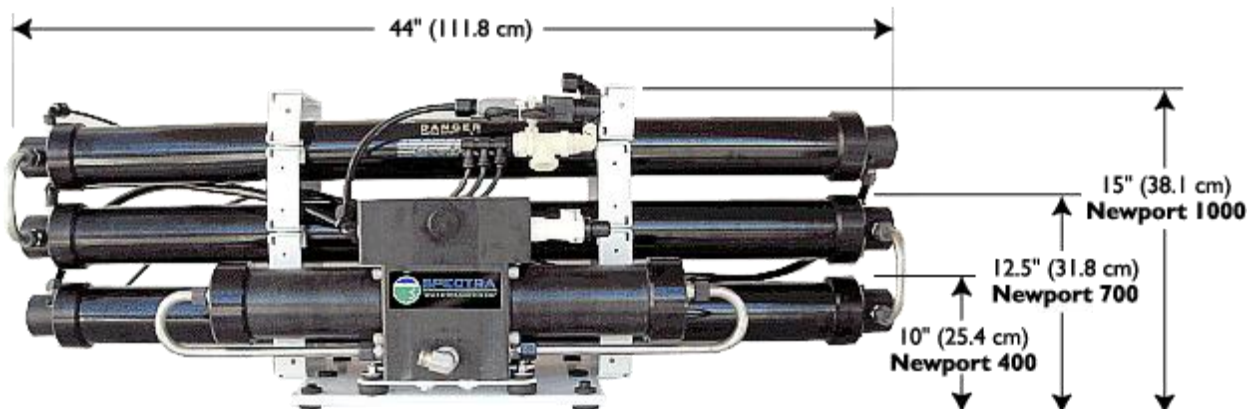
Εικόνα 1-11: Σύστημα ανάκτησης Grundfos

Άλλα συστήματα που η λειτουργία τους βασίζεται στη θετική εκτόπιση είναι οι αντλίες APP της Danfoss, *Danfoss*, (2006), οι οποίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 1-12. 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 1-12: Αντλίες APP της Danfoss

Σε πολύ μικρότερα συστήματα αφαλάτωσης ΑΩ, χρησιμοποιούνται συστήματα ανάκτησης που η λειτουργία τους βασίζεται στην αρχή της παλινδρόμησης των εμβόλων που προκαλεί η πίεση της άλμης. Τέτοιο σύστημα είναι η Clark Pump, βλέπετε Εικόνα 1-13, *Spectrawatermakers*, (2004).



Εικόνα 1-13: Η αντλία Clark pump

Υπάρχουν και άλλα συστήματα ανάκτησης που η φιλοσοφία λειτουργία τους είναι ότι η ενέργεια της άλμης μεταφέρεται στο νερό τροφοδοσίας μέσω του συστήματος Turbo charger HPBTM (High Pressure Booster), *Fedco*, (2009). Το σύστημα αποτελείται από τη μεριά της άλμης από μία φτερωτή υδροστρόβιλου και από τη μεριά της τροφοδοσίας από φτερωτή αντλία. Έτσι η αντλία υψηλής πίεσης λειτουργεί σε χαμηλότερη πίεση από αυτήν που



απαιτείται για τη λειτουργία των μεμβρανών, εξοικονομώντας ενέργεια. Η υπολειπόμενη πίεση παράγεται από το ΗΡΒ. Βλέπετε Εικόνα 1-14.



Εικόνα 1-14: Συνδεσμολογία turbocharger

### 1.5 Συμπεράσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης

Από την βιβλιογραφική ανασκόπηση προκύπτουν τα παρακάτω βασικά συμπεράσματα:

- Το κόστος της ενέργειας αποτελεί σημαντική παράμετρο για την οικονομική βιωσιμότητα των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης, δεδομένου ότι μπορεί να ανέλθει μέχρι και στο 60% του συνολικού κόστους παραγωγής του νερού.
- Παρά το ότι ο συνδυασμός συστημάτων αφαλάτωσης ΑΩ θαλασσινού νερού και συστημάτων ΑΠΕ συνιστά μια λύση τεχνικά εφικτή και οικονομικά κατ' αρχήν αποδεκτή, στην πράξη οι σχετικές εγκαταστάσεις είναι εξαιρετικά περιορισμένες. Η μείωση του κόστους του παραγόμενου νερού, μέσω της μείωσης του κόστους της απαιτούμενης αρχικής επένδυσης και της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού τους, συνιστά αποφασιστική παράμετρο για την περαιτέρω διάδοσή τους. Σε κάθε περίπτωση, τα συγκριτικά πλεονεκτήματα των τεχνολογιών αφαλάτωσης που υποστηρίζονται ενεργειακά από τις ΑΠΕ γίνονται εμφανέστερα προκειμένου περί εγκαταστάσεων σχετικά μικρής δυναμικότητας, με επιπλέον ενισχυτική παράμετρο την απουσία συμβατικών ενεργειακών δικτύων.
- Όσον αφορά την καταλληλότητα των διαφόρων μορφών ΑΠΕ, η βιομάζα ως πηγή ενέργειας δεν φαίνεται αποτελεί προς το παρόν μια βιώσιμη επιλογή για την αφαλάτωση, εκτός από πολύ ειδικές περιπτώσεις. Για συστήματα ΑΩ μικρής δυναμικότητας, φαίνεται να είναι προτιμότερη η χρήση Φ/Β γεννητριών, ενώ για μεγαλύτερα συστήματα, ο συνδυασμός με ανεμογεννήτριες εμφανίζεται ως πιο οικονομικός, σε συνάρτηση βέβαια με το υφιστάμενο ηλιακό ή αιολικό δυναμικό.

- Η χρήση διατάξεων ανάκτησης της ενέργειας της πίεσης της άλμης στην έξοδο της μεμβράνης μπορεί να βελτιώσει αποφασιστικά την απόδοση ενός συστήματος αφαλάτωσης με ΑΩ και, κατά συνέπεια, τους οικονομικούς όρους εκμετάλλευσής του. Παρά το ότι η τεχνολογία των ανακτητών έχει εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, η χρήση τους δεν είναι ακόμα διαδεδομένη σε μικρά συστήματα αφαλάτωσης. Για τα πολύ μικρά συστήματα, ονομαστικής παραγωγής μικρότερης από 2 m<sup>3</sup>/day, καταλληλότερα είναι τα σύστημα ανάκτησης θετικής μετατόπισης.

Η διερεύνηση των οικονομοτεχνικών όρων εκμετάλλευσης μικρών αυτόνομων συστημάτων αφαλάτωσης με ΑΩ που υποστηρίζονται ενεργειακά από ΑΠΕ και που αξιοποιούν την ανακτώμενη ενέργεια της άλμης, παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, ειδικότερα όταν πρόκειται να εξυπηρετηθούν απομονωμένες περιοχές στις οποίες τα συμβατικά ενεργειακά είτε απουσιάζουν, είτε είναι διαθέσιμα σε υψηλό κόστος. Από την άποψη αυτή, η συστηματική διερεύνηση της λειτουργίας τέτοιων συστημάτων και η ανάπτυξη εργαλείων προσομοίωσης της λειτουργίας τους, αν και προϋπόθεση για την κατάλληλη σχεδίαση τους και την ρεαλιστική αποτίμηση των δυνατοτήτων τους σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, απουσιάζει από την σχετική βιβλιογραφία. Η έρευνα που εκπονήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής φιλοδοξεί να συμβάλει στην κάλυψη του κενού αυτού.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:**

# **ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ**



## 2. ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

### 2.1 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), όπως αναφέρουν οι *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. Διατυπώνονται οι βασικές εξισώσεις των στοιχείων μεμβρανών ΑΩ, καθώς και τα διάφορα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την προσομοίωση της λειτουργίας τους.

Διερευνάται στη συνέχεια η χρήση αντλιών υψηλής πίεσης στις μονάδες ΑΩ, τόσο ως προς τα χαρακτηριστικά τους, όσο και ως προς τις θεωρητικές εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία τους. Διερευνάται επίσης θεωρητικά η λειτουργία της αντλίας Clark, η οποία είναι μια αντλία θετικής μετατόπισης που σκοπό έχει την αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας της άλμης, και αναλύονται οι εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία της.

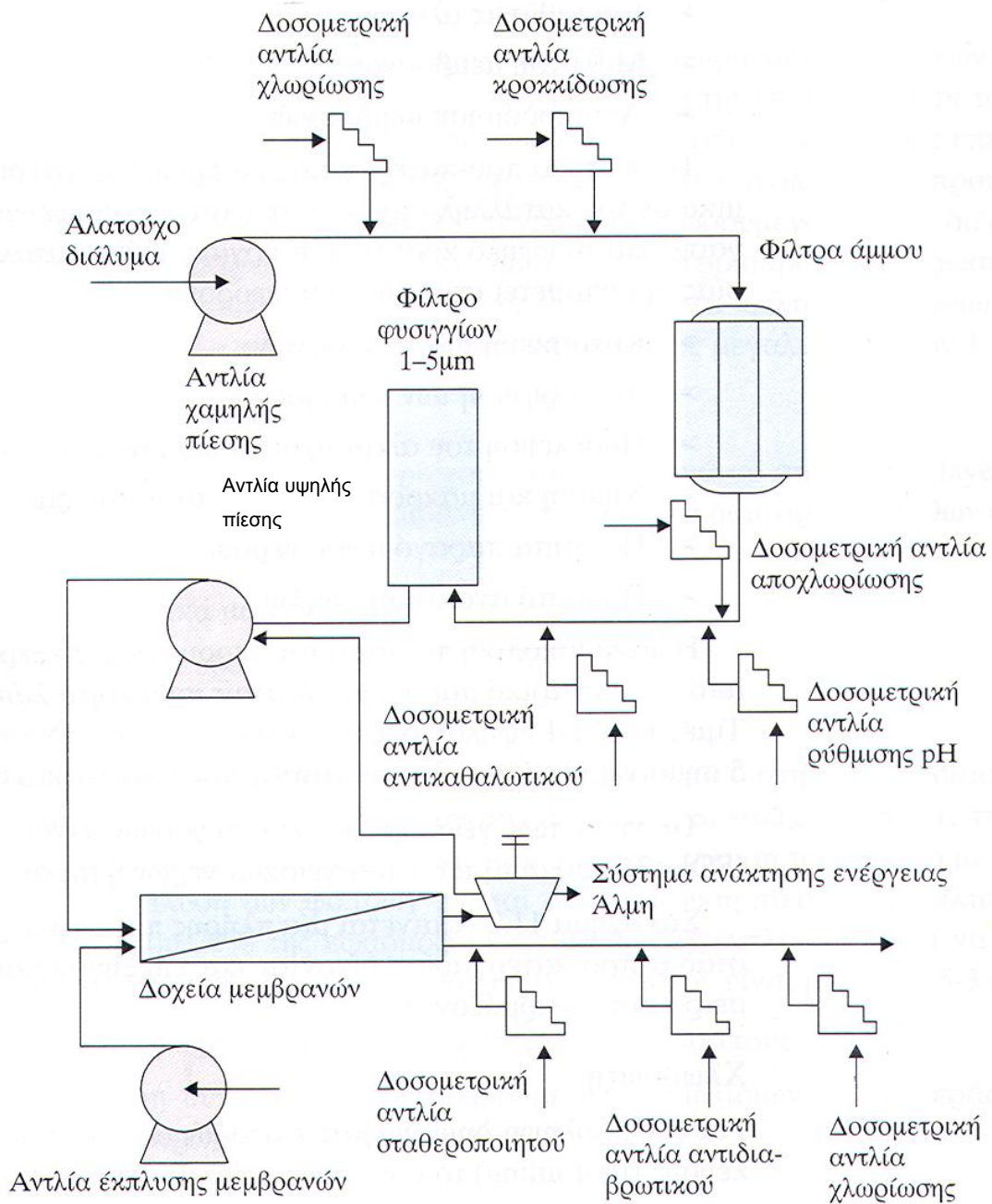
Η θεωρητική διερεύνηση και οι εξισώσεις που περιγράφονται σε αυτό το κεφάλαιο χρησιμοποιούνται κυρίως στην ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης (Κεφάλαιο 4), όπως και για τον υπολογισμό διαφόρων παραμέτρων κατά την πειραματική μελέτη της μονάδας ΑΩ (κεφάλαιο 3).

### 2.2 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 όσμωσης φαίνεται στην Εικόνα 2-1.



Εικόνα 2-1: Διάγραμμα συμβατικής μονάδας αφαλάτωσης ΑΩ. Πηγή: *Αυλωνίτης*, (2006).

### 2.2.1 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-επεξεργασία 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.

Το σύστημα προ-επεξεργασία θα πρέπει να σχεδιαστεί χημικά (είδος χημικών σε κάθε στάδιο) και υδροδυναμικά (πίεση και παροχή δοσομετρικών αντλιών) με τον κατάλληλο τρόπο 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 – Silt Density Index, SDI), την ποιότητα αφαλατωμένου νερού και το ποσοστό ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού.

Το σύστημα προ-επεξεργασία περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

**Χλωρίωση:** Για την πρόληψη δημιουργίας επιστρώματος μόλυνσης οργανικής κυρίως προέλευσης το νερό προς αφαλάτωση χλωριώνεται, είτε με αέριο χλώριο, είτε συνήθως με υπό-χλωριώδες νάτριο ή, λιγότερο συχνά, με υπό-χλωριώδες 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 τις μεμβράνες. 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 ανοξείδωτο υλικό ή κατάλληλο πολυμερές ή χάλυβα επενδυμένο εσωτερικά με κατάλληλη επίστρωση ανθεκτική στη διάβρωση.

## **2.2.2 Το κυρίως σύστημα αφαλάτωσης ΑΩ**

Το κυρίως σύστημα αφαλάτωσης περιλαμβάνει τα εξής τμήματα:

**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 ανοξείδωτο 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 όσμωσης:** 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 όσμωσης (μεμβρανοθήκη και στοιχεία μεμβρανών) διαταγμένα παράλληλα σχηματίζοντας μία ή περισσότερες συστοιχίες. Το νερό τροφοδοσίας εισέρχεται σε κάθε στοιχείο αντίστροφης όσμωσης από το ένα άκρο, ενώ από το άλλο άκρο εξέρχονται το αφαλατωμένο νερό και η άλμη. Εάν είναι επιθυμητή μεγαλύτερη ανάκτηση αφαλατωμένο 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 τους 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.

### **2.2.3 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:

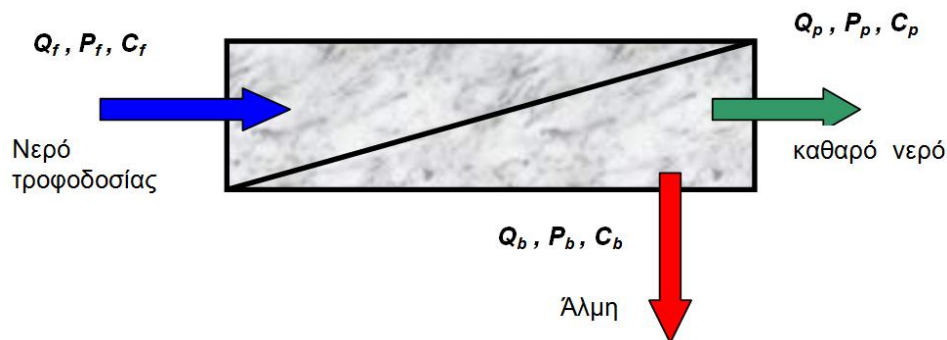
**Ρύθμιση pH:** Το pH αυξάνεται, με προσθήκη υδροξειδίου του νατρίου ή όξινου ανθρακικού νατρίου. Η δοσολογία ρυθμίζεται ανάλογα με το pH του παραγόμενου νερού και την επιθυμητή τιμή. Για να μειωθούν οι διαβρωτικές ιδιότητες του αφαλατωμένου νερού, προστίθεται αντιδιαβρωτικό όπως είναι διάφορες πολυφωσφωρικές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

**Ρύθμιση σκληρότητας:** Η αύξηση της σκληρότητας μπορεί να γίνει με προσθήκη μέσω δοσομετρικής αντλίας  $\text{CaCl}_2$  και  $\text{MgCl}_2$  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.

### 2.3 Θεωρητική διερεύνηση στοιχείων μεμβρανών ΑΩ

Όταν είναι επιθυμητή η μελέτη της συμπεριφοράς των στοιχείων μεμβρανών ΑΩ ως ανεξάρτητο μεμονωμένο στοιχείο, μπορούμε 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 2-2) και εφαρμόζονται απλά ισοζύγια μάζας σύμφωνα με τις εξισώσεις 2-1 έως 2-6.



Εικόνα 2-2: Σχηματικό διάγραμμα της μεμβράνης ΑΩ

Όπου  $Q$  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.

#### 2.3.1 Ισοζύγιο μάζας

Ακολουθώντας την αρχή διατήρησης της μάζας παρατηρούμε στην

Εικόνα 2-2 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 2-1, .

$$Q_f = Q_p + Q_b \quad 2-1$$

Όπου,  $Q_f$  είναι η παροχή το νερού τροφοδοσίας [L/h],  $Q_p$  η παροχή του αφαλατωμένου νερού [L/h] και  $Q_b$  είναι η παροχή της άλμης [L/h]. Εδώ επισημαίνεται ότι η παροχή του αφαλατωμένου νερού δεν πρέπει να ταυτίζεται με τη ροή δια της μεμβράνης (flux) που συμβολίζεται με  $J_v$  και ορίζεται ως ο όγκος ή η μάζα του αφαλατωμένου νερού που διέρχεται δια της μεμβράνης ανά μονάδα επιφάνειας της και ανά μονάδα χρόνου [ $m^3/m^2s$  ή  $kg/m^2/s$ ].

### 2.3.2 Ανάκτηση αφαλατωμένου νερού

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

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

### 2.3.3 Συντελεστής συμπύκνωσης

Είναι ο βαθμός της συμπύκνωσης (Concentration Factor  $C_F$ ) της άλμης κατά την διεργασία του διαχωρισμού υπό πίεση, όπως αυτό ορίζεται από την εξίσωση 2-3 όπως αναφέρεται στο Δεληγιάννη and Μπελεσιώτης, (1995).

$$C_F = \frac{Q_f}{Q_b} = \frac{Q_f}{Q_f - Q_p} = \frac{1}{1 - R} \quad 2-3$$

Άρα η συγκέντρωση αλάτων της άλμης  $C_b$  μπορεί να υπολογιστεί ως εξής

$$C_b = \frac{C_f}{1 - R} = (C_F)(C_f) \quad 2-4$$

Όπου  $C$  είναι η συγκέντρωση των αλάτων και οι δείκτες  $b$  και  $f$  είναι για την άλμη και το νερό τροφοδοσίας αντίστοιχα.

### 2.3.4 Η ωσμωτική πίεση

Η ωσμωτική πίεση  $\Pi$  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 θερμοκρασία  $T$  του διαλύματος. Η ωσμωτική πίεση για διάλυμα NaCl μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 2-5 του Dupont, (1992) ως εξής

$$\Pi = \frac{0.0385 \times C \times (T + 273.15)}{1000 - \frac{C}{1000}}$$

2-5

Όπου  $\Pi$  είναι η ωσμωτική πίεση [PSI] (1 PSI=14.5 bar),  $C$  είναι η συγκέντρωση των αλάτων στο διάλυμα [ppm], και  $T$  είναι η θερμοκρασία του διαλύματος σε °C.

### 2.3.5 Συντελεστής συγκράτησης

Είναι ο βαθμός διαχωρισμού των αλάτων του νερού τροφοδοσίας και προσδιορίζει την ικανότητα της μεμβράνης να μην επιτρέπει ή να παρεμποδίζει των αλάτων να διέλθουν δια της μεμβράνης. Συμβολίζεται με  $R_c$  (Retention Coefficient) και υπολογίζεται από την εξίσωση 2-6, όπως αναφέρουν οι Δεληγιάννη and Μπελεσιώτης, (1995).

$$R_c = 1 - \frac{C_f}{C_b}$$

2-6

### 2.3.6 Διαπερατότητα

Η διαπερατότητα είναι η ποσότητα ενός συστατικού η οποία διέρχεται δια των πόρων της μεμβράνης, ανά μονάδα επιφανείας της μεμβράνης και ανά μονάδα εφαρμοζόμενης πίεσης, στην μονάδα του χρόνου. Έχει σύμβολο  $J_s$  και μονάδες mol/m<sup>2</sup>s.Pa και είναι μια χαρακτηριστική τιμή της μεμβράνης.

## 2.4 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.

### 2.4.1 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 ωσμωτικής πίεσης, όπως αυτό παρουσιάζεται στην εξίσωση 2-7 του Merten, (1966b).

$$J_v = A(\Delta P - \Delta \Pi)$$

2-7

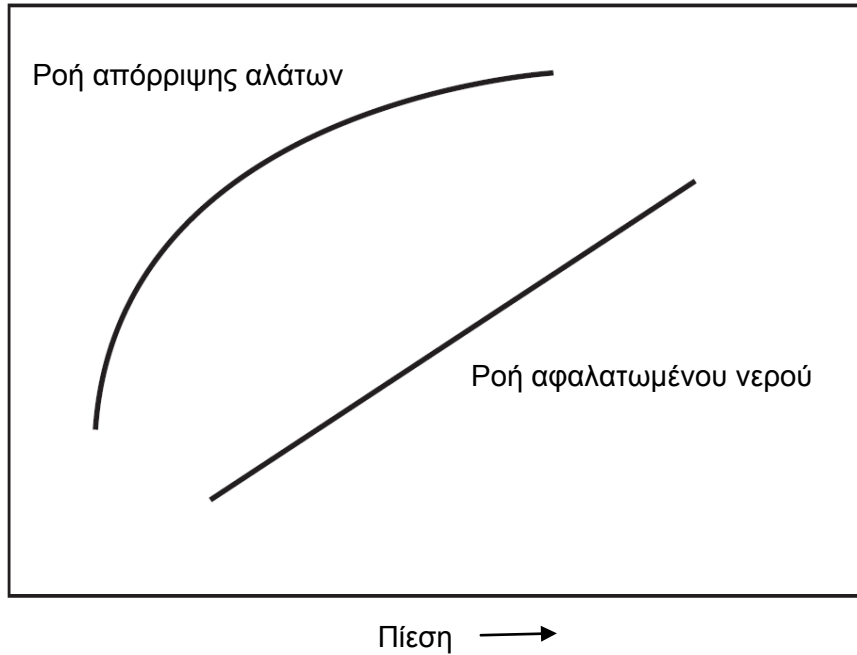
Όπου  $J_v$  είναι η ροή (flux) δια της μεμβράνης [ $\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$ ],  $A$  είναι η σταθερά της μεμβράνης [ $\text{m}^3/\text{m}^2\text{s bar}$ ], Η σταθερά  $A$  είναι συνάρτηση της χημικής σύστασης της μεμβράνης, του πάχους της, της θερμοκρασίας λειτουργίας και της συγκέντρωσης των αλάτων στο διάλυμα,  $\Delta P$  η διαφορά πίεσης [bar],  $\Delta \Pi$  διαφορά ωσμωτικής πίεσης πριν και μετά τη μεμβράνη [bar], Η ροή του νερού  $J_v$  στο μοντέλο του Merten είναι ανάλογη της διαφοράς πίεσης, δηλαδή ανάλογη της διαφοράς του χημικού δυναμικού του νερού τροφοδοσίας και του αφυδατωμένου νερού, όπως αναφέρουν οι *Δεληγιάννη and Μπελεσιώτης*, (1995).

Η επίδραση της πίεσης στη ροή των αλάτων περιγράφεται από την εξίσωση 2-8 του *Katchalsky and Kedem*, (1962).

$$J_s = B \Delta P + (1 - \sigma) J_v C_s$$

2-8

Όπου  $J_s$  είναι η ροή των αλάτων [ $\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ ],  $B$  η περατότητα των αλάτων δια της μεμβράνης [ $\text{mol}/\text{m}^2\text{s.bar}$ ],  $\Delta P$  η διαφορά πίεσης [bar],  $\sigma$  ο συντελεστής ανάκλασης (reflection coefficient) του Staverman που αποτελεί μέτρο της επιλεκτικότητας της μεμβράνης και λαμβάνει τιμές από 0 έως 1,  $J_v$  είναι η ροή (flux) δια της μεμβράνης [ $\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$ ] και  $C_s$  η μέση συγκέντρωση των αλάτων στα δύο διαλύματα από τις δύο πλευρές της μεμβράνης. Στην Εικόνα 2-3 φαίνεται ότι η επίδραση της ασκούμενης πίεσης είναι γραμμική για τη ροή του αφυδατωμένου νερού. Επίσης, στην Εικόνα 2-3 η αύξηση της ασκούμενης πίεσης αυξάνει την απόρριψη των αλάτων.



Εικόνα 2-3: Επίδραση της ασκούμενης πίεσης της μεμβράνης στη ροή του αφαλατωμένου νερού κα στην απόρριψη των αλάτων

#### 2.4.2 Επίδραση της θερμοκρασίας

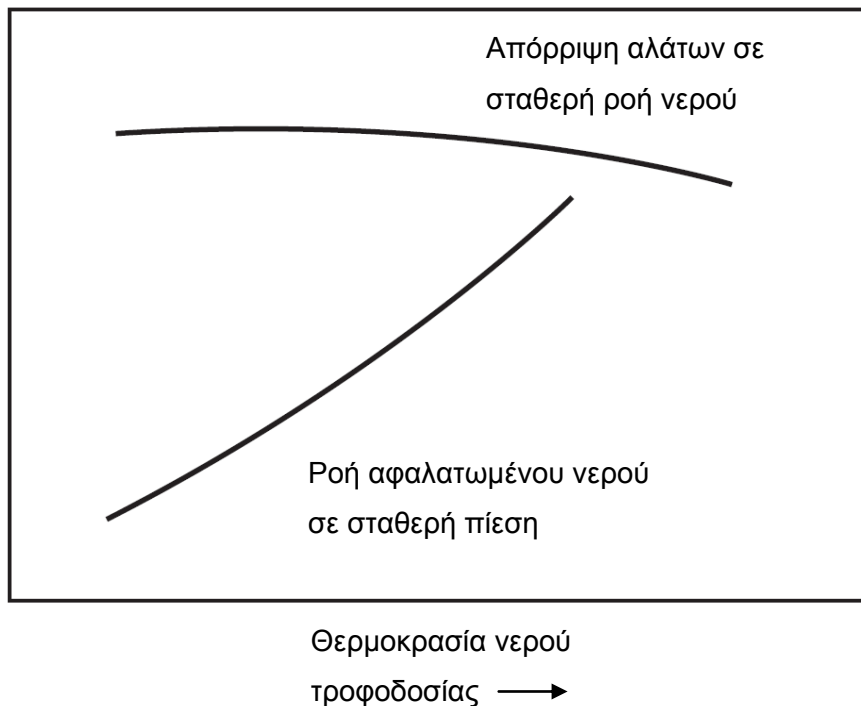
Η αύξηση της θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας αυξάνει τη ροή του αφαλατωμένου νερού κυρίως λόγω της μείωσης της πυκνότητας του νερού. Η αύξηση θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας μειώνει την απόρριψη των αλάτων άρα αυξάνει τη συγκέντρωση των αλάτων στο αφαλατωμένου νερού, (βλέπε

Εικόνα 2-4. Ο υπολογισμός της ροής του αφαλατωμένου νερού σε διαφορετική θερμοκρασία από την ονομαστική της μεμβράνης, γίνεται με την εφαρμογή ενός συντελεστή διόρθωσης της θερμοκρασίας (Temperature Correction Factor,  $T_{CF}$ ) όπως φαίνεται στην εξίσωσης 2-9, της εταιρίας DOW, (2004).

$$T_{CF} = EXP \left[ 2640 \left( \frac{1}{298} - \frac{1}{273+T} \right) \right], T \geq 25^{\circ} C$$

$$T_{CF} = EXP \left[ 3020 \left( \frac{1}{298} - \frac{1}{273+T} \right) \right], T \leq 25^{\circ} C$$

2-9

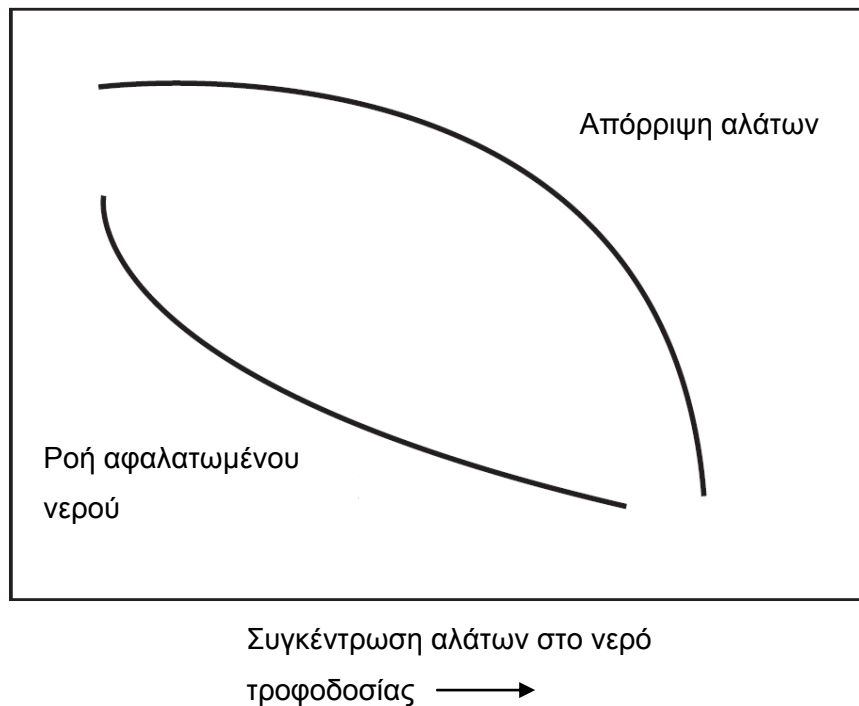


Εικόνα 2-4: Επίδραση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη των αλάτων

### **2.4.3 Επίδραση της συγκέντρωσης των αλάτων του νερού τροφοδοσίας**

Όπως διαπιστώνεται από την εξίσωση 2-5, 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 (βλέπε Εικόνα 2-5).

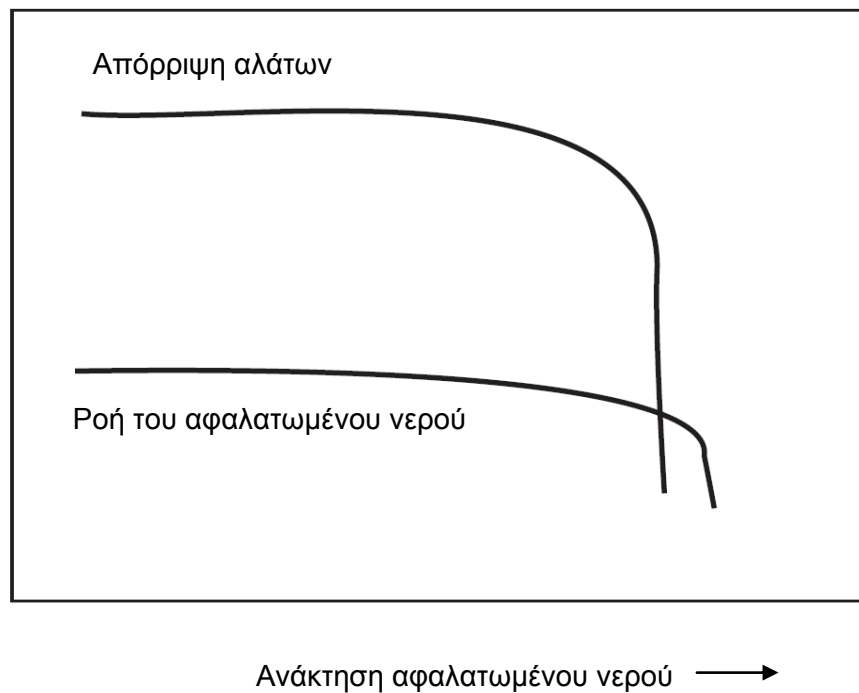




Εικόνα 2-5: Επίδραση της συγκέντρωσης των αλάτων στο νερό τροφοδοσίας στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη των αλάτων.

#### **2.4.4 Επίδραση του βαθμού ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού**

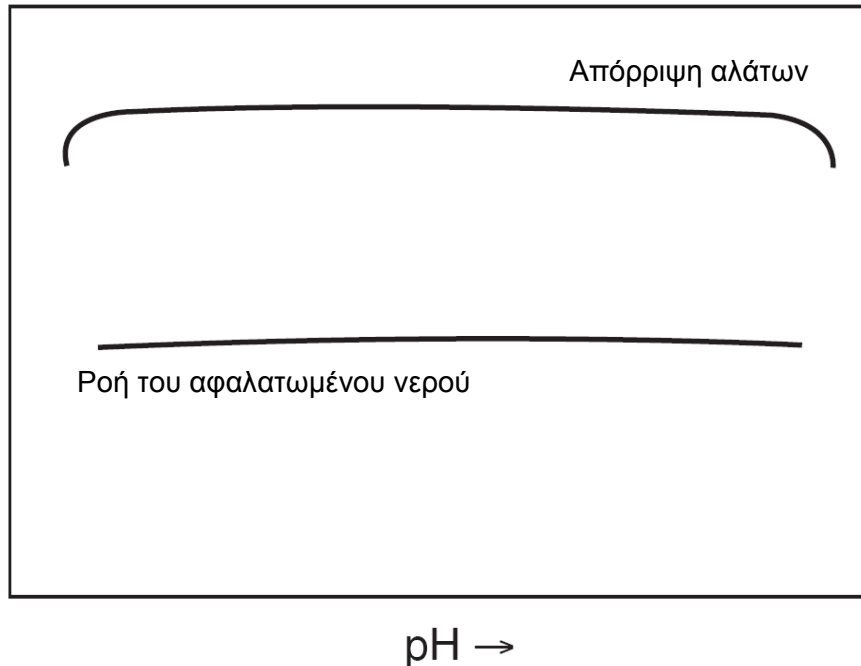
Η αύξηση του βαθμού ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού σε συνθήκες σταθερής πίεσης αυξάνει την ωσμωτική πίεση του νερού τροφοδοσίας. Η αύξηση της ωσμωτικής πίεσης αυξάνει την πιθανότητα δημιουργίας ανθρακικών επικαθίσεων (Scaling). Η συσσώρευση ανθρακικών επικαθίσεων εμποδίζει τη διέλευση του αφαλατωμένου νερού και μειώνει την απορριπτική ικανότητα της μεμβράνης, αυξάνοντας ταυτόχρονα την κατανάλωση ενέργειας από τη μεμβράνη. Η ανεξέλεγκτη όμως αύξηση μπορεί να σταματήσει την διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης όπως αυτό φαίνεται στην Εικόνα 2-5.



Εικόνα 2-6: Επίδραση του βαθμού ανάκτησης στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη των αλάτων

#### 2.4.5 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 (βλέπε Εικόνα 2-7).



Εικόνα 2-7: Επίδραση του pH στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στην απόρριψη των αλάτων

## 2.5 Θεωρητική περιγραφή των υπαρχόντων μοντέλων προσομοίωσης μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης

Η εξήγηση της διεργασίας της αφαλάτωσης με την λογική της διήθησης απέχει πολύ από την πραγματικότητα. Αρκεί κανείς να σκεφτεί ότι η διήθηση οφείλεται στη διαφορά μεγέθους των σωματιδίων, κάτι που δεν ισχύει στην περίπτωση της αφαλάτωσης, αφού τα ιόντα των αλάτων είναι μικρότερου μεγέθους από τα μόρια του νερού, τα οποία άλλωστε σχηματίζουν και μεγαλομόρια μέσω των δεσμών υδρογόνου. Οι σύνθετες μεμβράνες δεν παρουσιάζουν πόρους στην επιφάνειά τους και συνεπώς δεν μπορούν να λειτουργήσουν ως φίλτρα, αναφέρει ο *Αυλωνίτης*, (2006)

Για την εξήγηση του φαινομένου της αφαλάτωσης και του τρόπου που αυτή γίνεται με τη βοήθεια των μεμβρανών έχουν αναπτυχθεί διάφορες θεωρίες. Οι θεωρίες αυτές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Στις δομικές θεωρίες (structural theories) που προσπαθούν να συνδέσουν τη δομή των μεμβρανών με τις απορριπτικές ιδιότητές τους στα άλατα. Οι θεωρίες αυτές μπορούν να οδηγήσουν μόνο σε ποιοτικά συμπεράσματα διότι η μαθηματική επεξεργασία τους είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, αναφέρει ο *Idris, et al.*, (2002).
- Στις φαινομενολογικές θεωρίες (phenomenological theories), όπου γίνεται προσπάθεια σύνδεσης των ιδιοτήτων απόρριψης των μεμβρανών με μακροσκοπικές ιδιότητες που

μπορούν να μετρηθούν, όπως αναφέρει ο *Diawara, et al.*, (2003). Αν και η προσέγγιση αυτή δεν δίνει καμία πληροφορία για τις μικροσκοπικές ιδιότητες και τον μηχανισμό αφαλάτωσης, είναι πολύ χρήσιμες για την διατύπωση σχέσεων που περιγράφουν την συμπεριφορά των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης. Επίσης μπορούν να χρησιμεύσουν στην εξέταση παραγόντων που μπορούν να επηρεάσουν την διεργασία της αφαλάτωσης. Οι κυρίαρχες θεωρίες αυτής της κατηγορίας είναι τρεις:

1. Μοντέλο επιλεκτικής απορρόφησης/τριχοειδούς ροής
2. Μοντέλο θερμοδυναμικής μη αντιστρεπτών διεργασιών
3. Μοντέλο διάλυσης-διάχυσης

Ο όρος επιλεκτική απορρόφηση (preferential sorption) αναφέρεται στη δημιουργία ενός στρώματος νερού πάνω στη μεμβράνη λόγω των απωθητικών δυνάμεων της μεμβράνης στα ιόντα αλάτων και της υψηλής ενέργειας που απαιτείται για την αφυδάτωση των ιόντων. Η δίοδος των αλάτων μέσω της μεμβράνης γίνεται με διάχυση. Συνεπώς η ταχύτητα διόδου του νερού και των αλάτων καθορίζεται από το είδος της μεμβράνης και κυρίως της χημικής της δομής, από την ταχύτητα διάχυσης των ιόντων των αλάτων, δηλαδή των συγκεντρώσεων των αλάτων και από την ασκούμενη πίεση.

Για τον προσδιορισμό της ροής του νερού δια της μεμβράνης, χρησιμοποιείται η εξίσωση 2-7 και για τη ροή των αλάτων χρησιμοποιείται η εξίσωση 2-10 του *Merten*, (1966a):

Για τη ροή των αλάτων:

$$J_s = \frac{c_m k_i D_i}{\delta_m} (x_{im} - x_{ip}) \quad 2-10$$

Όπου  $J_s$  είναι η ροή των αλάτων [ $\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ ],  $c_m$  η μοριακή συγκέντρωση των αλάτων [ $\text{mol}/\text{m}^3$ ],  $k_i$  είναι ο συντελεστής κατανομής του συστατικού  $i$  [-],  $D_i$ , ο συντελεστής διάχυσης του συστατικού  $i$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  $\delta_m$  το πάχος της μεμβράνης [ $\text{m}$ ],  $x_{im}$  και  $x_{ip}$  είναι η αναλογία του συστατικού  $i$  από τις δύο μεριές της μεμβράνης.

Η εξέταση της λειτουργίας των μεμβρανών με τη βοήθεια της θερμοδυναμικής μη αντιστρεπτών διεργασιών δηλώνει ότι η εντροπία του συστήματος αυξάνει και εκλύεται ενέργεια. Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή του νερού και των αλάτων δια της μεμβράνης έχουν μελετηθεί από τους *Katchalsky and Kedem*, (1962), *Kedem and Katchalsky*, (1958) και *Spiegler and Kedem*, (1966), οι εξισώσεις αυτές είναι οι εξίσωση 2-11 και εξίσωση 2-12 ως εξής:

Για τη ροή του νερού δια της μεμβράνης:

$$J_v = L_v (\Delta P - \sigma \Delta \Pi) \quad 2-11$$

Για τη ροή των αλάτων δια της μεμβράνης:

$$J_s = B \Delta P + (1 - \sigma) J_v C_s \quad 2-12$$

Όπου  $J_v$  είναι η ροή (flux) δια της μεμβράνης [ $m^3/m^2s$ ],  $L_v$  είναι η ογκομετρική ή υδροδυναμική περατότητα ανά μονάδα πίεσης,  $\Delta P$  η διαφορά πίεσης [bar],  $\sigma$  ο συντελεστής ανάκλασης (reflection coefficient) του Staverman που είναι μέτρο της επιλεκτικότητας της μεμβράνης και λαμβάνει τιμές από 0-1,  $\Delta \Pi$  διαφορά ωσμωτικής πίεσης πριν και μετά τη μεμβράνη [bar],  $J_s$  είναι η ροή των αλάτων [ $mol/m^2s$ ],  $B$  η περατότητα των αλάτων δια της μεμβράνης [ $mol/m^2s.bar$ ],  $C_s$  η μέση συγκέντρωση των αλάτων στα δύο διαλύματα από τις δύο πλευρές της μεμβράνης.

Η θεωρία του μοντέλου διάλυσης – διάχυσης στηρίζεται σε δύο βασικές διεργασίες, στην απορρόφηση και στη διάχυση. Ανάλυση της δομής των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο δεν έχει δείξει σημαντικούς πορώδους διόδους, έτσι ώστε η ροή του διαλύτη και διαλυμένης ουσίας να γίνεται με ελεύθερη ροή διαμέσου των πόρων ή σωληνίσκων των μεμβρανών. Έτσι η διαδικασία με την οποία ο διαλύτης και η διαλυμένη ουσία διέρχονται μεταξύ των μεμβρανών ακολουθεί δύο στάδια. Πρώτα διαλύονται στο δραστικό τμήμα της εξωτερικής επιφάνειας της μεμβράνης και κατόπιν διαχέονται στο πορώδες υπόστρωμα μέχρις ότου εξέλθουν από το άλλο άκρο του στοιχείου της μεμβράνης. Οι ταχύτητες διάλυσης και διάχυσης του διαλύτη και της διαλυμένης ουσίας είναι διαφορετικές, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός αλάτων και νερού, όπως αναφέρει ο *Αυλωνίτης*, (2006).

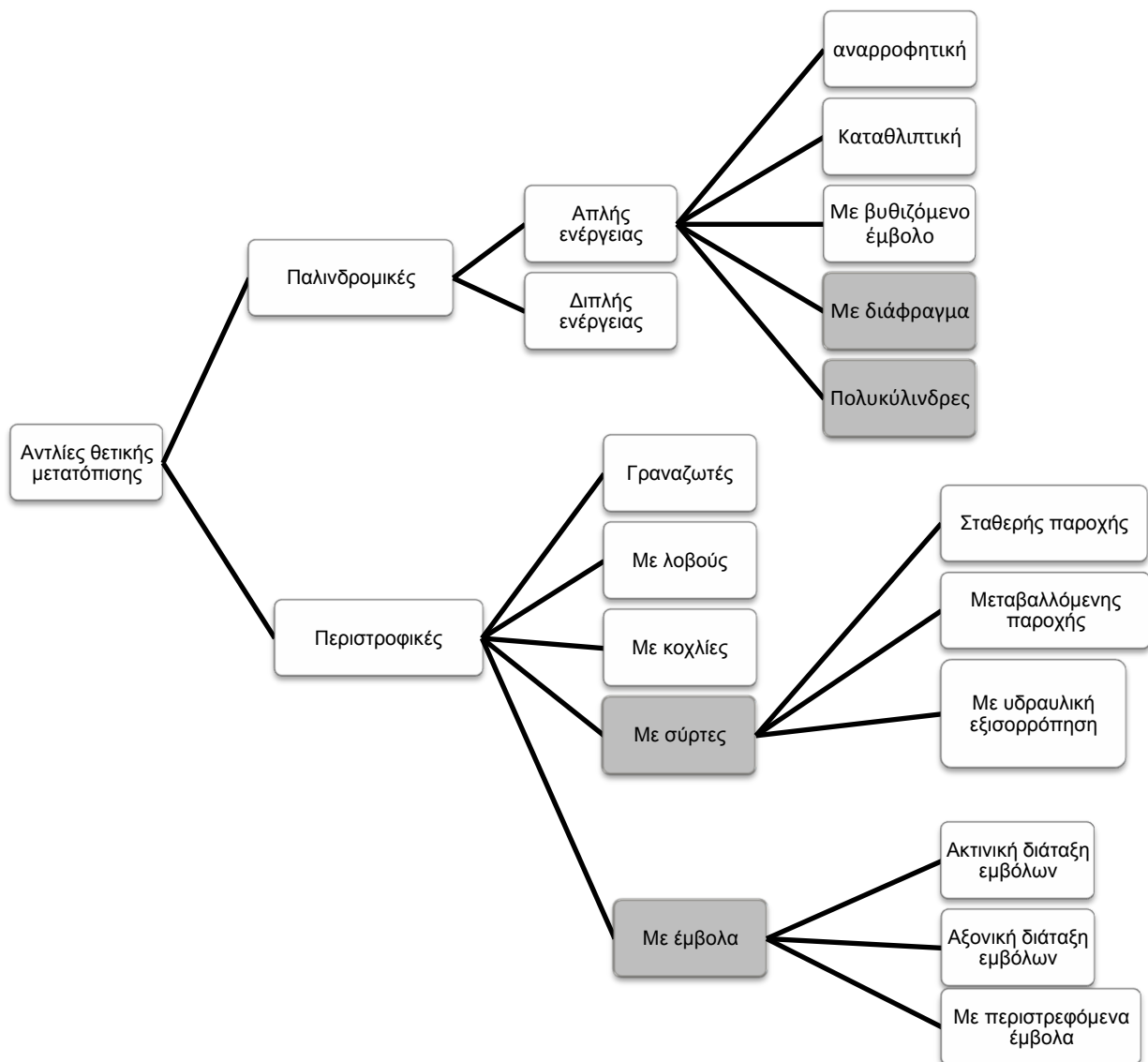
Τα προηγούμενα μοντέλα αφορούν απλές επίπεδες μεμβράνες όπου οι συνθήκες, πίεση, συγκέντρωση κλπ. παρέμειναν σταθερές σε κάθε σημείο στην επιφάνεια της μεμβράνης. Στα πραγματικά στοιχεία μεμβρανών οι διαστάσεις και διαμόρφωσή τους είναι τέτοιες, έτσι ώστε η πίεση και η συγκέντρωση να μεταβάλλονται σε κάθε σημείο της επιφάνειας της μεμβράνης πράγμα που οδηγεί σε μεταβαλλόμενη ροή μάζας από σημείο σε σημείο. Συνεπώς η μοντελοποίηση των στοιχείων μεμβρανών είναι πλέον πιο πολύπλοκη.

## 2.6 Θεωρητική περιγραφή αντλιών συστημάτων ΑΩ

Η αντλίες στα συστήματα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης χρησιμοποιούνται ως: 1) αντλίες τροφοδοσίας για τη μεταφορά του νερού τροφοδοσίας προς τη μονάδα ΑΩ, 2) αντλίες υψηλής πίεσης στην είσοδο των στοιχείων μεμβρανών, 3) δοσομετρικές αντλίες για το σύστημα προ-επεξεργασίας και μετ-επεξεργασίας και 4) αντλίες μεταφοράς του αφαλατωμένου νερού προς τη δεξαμενή αποθήκευσης ή προς το δίκτυο διανομής. Ένα αντλητικό σύστημα αποτελείται από την αντλία, τον κινητήρα και τη σωληνογραμμή.

### 2.6.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη αντλιών θετικής μετατόπισης

Οι αντλίες θετικής μετατόπισης παράγουν μεγάλες πιέσεις σε σχετικά μικρές παροχές αλλά ταυτόχρονα λειτουργούν με μεγάλο βαθμό απόδοσης (80% - 90%). Οι αντλίες θετικής μετατόπισης διακρίνονται γενικά σε δύο βασικές κατηγορίες: **Παλινδρομικές αντλίες** όπου το αντλητικό στοιχείο (έμβολο ή διάφραγμα) των αντλιών αυτών εκτελεί ευθύγραμμη παλινδρομική κίνηση μέσα σε ένα θάλαμο κυλινδρικού ή άλλου σχήματος. **Περιστροφικές αντλίες** όπου το αντλητικό στοιχείο των αντλιών αυτών εκτελεί περιστροφική κίνηση με σταθερή γωνιακή ταχύτητα και αποτελείται από ένα ή περισσότερα κινούμενα στοιχεία, όπως αναφέρει ο *ΑΚΡΙΤΙΔΗΣ*, (1985). Η λεπτομερή κατάταξη των αντλιών θετικής μετατόπισης φαίνονται στην Εικόνα 2-8. Με έντονο χρώμα είναι οι τύποι αντλιών που χρησιμοποιούνται περισσότερο στις μονάδες αφαλάτωσης.



Εικόνα 2-8: Κατάταξη των αντλιών θετικής μετατόπισης

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας μιας αντλίας θετικής μετατόπισης, αναφέρονται στη συμπεριφορά της, όταν εργάζεται κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες. Για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών λειτουργίας μιας περιστροφικής αντλίας για παράδειγμα πρέπει να είναι γνωστά τα παρακάτω μεγέθη.

#### 2.6.1.1 Κανονική (ονομαστική) πίεση λειτουργίας

Επειδή οι περιστροφικές αντλίες εργάζονται με υψηλές πιέσεις αυτό προκαλεί καταπονήσεις και φθορά της αντλίας, μετά από ορισμένες ώρες λειτουργίας της. Αν η αντλία εργάζεται σε πιέσεις μικρότερες της κανονικής θα αυξηθεί ή διάρκεια ζωής της. Η διάρκεια ζωής της αντλίας εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως το μέγεθος των διακένων η φύση του υγρού και τα υλικά κατασκευής της. Η διάρκεια ζωής της αντλίας είναι

αντιστρόφως ανάλογη του κύβου του φορτίου. Επομένως η διάρκεια ζωής της αντλίας πρέπει να καθορίζεται για συνεχή εργασία με ορισμένο αριθμό στροφών και ορισμένη πίεση η οποία θεωρείται από τον κατασκευαστή, ως η κανονική πίεση λειτουργίας.

#### 2.6.1.2 Κανονικός αριθμός στροφών

Γενικά αν οι άλλες συνθήκες λειτουργίας της αντλίας είναι σταθερές, η διάρκεια ζωής της αντλίας είναι αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των στροφών της.

#### 2.6.1.3 Θεωρητική παροχή

Για τον υπολογισμό της θεωρητικής παροχής υπολογίζεται ή μετρίεται ο όγκος  $q$  που μετατοπίζεται σε μία περιστροφή του κινουμένου στοιχείου, όταν η αντλία εργάζεται χωρίς φορτίο. Πρακτικά όμως μικρή αύξηση της πίεσης δεν μεταβάλλει αισθητά τον όγκο  $q$ . Αν το  $q$  δίνεται σε [L/στροφή] η θεωρητική παροχή μιας αντλίας που περιστρέφεται με  $n$  στροφές [rpm] είναι:

$$Q_{\theta} = q \times n \quad 2-13$$

Όπου  $Q_{\theta}$  είναι η θεωρητική παροχή σε [L/min]

#### 2.6.1.4 Πραγματική παροχή

Είναι η παροχή που δίνει η αντλία όταν εργάζεται με ορισμένο αριθμό στροφών και ορισμένη πίεση.

#### 2.6.1.5 Διαρροή

Η διαφορά μεταξύ της θεωρητικής και της πραγματικής παροχής είναι η διαρροή, η οποία αντιστοιχεί στην ποσότητα του ρευστού που διαρρέει από την πλευρά της κατάθλιψης στην πλευρά της αναρρόφησης στην μονάδα του χρόνου.

#### 2.6.1.6 Θεωρητική ισχύς

Η θεωρητική ισχύς  $N$  [HP] είναι η ισχύς που απαιτείται για να αποδοθεί η θεωρητική παροχή  $Q_{\theta}$  [L/min] υπό πίεση  $P$  [bar].

$$N_{\theta} = \frac{Q_{\theta} \times P}{450} \quad 2-14$$

Η εισερχόμενη ισχύς πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη θεωρητική για την υπερνίκηση των μηχανικών και υδραυλικών απωλειών (Pope, (1997)).



### 2.6.1.7 Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης

Ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης  $\eta_v$  Είναι ο λόγος της πραγματικής παροχής  $Q$  προς τη θεωρητική παροχή  $Q_\theta$ .

$$\eta_v = \frac{Q}{Q_\theta} \quad 2-15$$

### 2.6.1.8 Μηχανικός βαθμός απόδοσης

Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης  $\eta_m$  είναι ο λόγος της θεωρητικής ισχύς  $N_\theta$  προς την εισερχόμενη ισχύ στον άξονα της αντλίας  $N_\alpha$ .

$$\eta_m = \frac{N_\theta}{N_\alpha} = \frac{Q_\theta \times P}{450 \times N_\alpha} \quad 2-16$$

### 2.6.1.9 Ολικός βαθμός απόδοσης

Ολικός βαθμός απόδοσης είναι το γινόμενο του υδραυλικού βαθμού απόδοσης επί τον μηχανικό βαθμό απόδοσης.

$$\eta = \eta_v \times \eta_m \quad 2-17$$

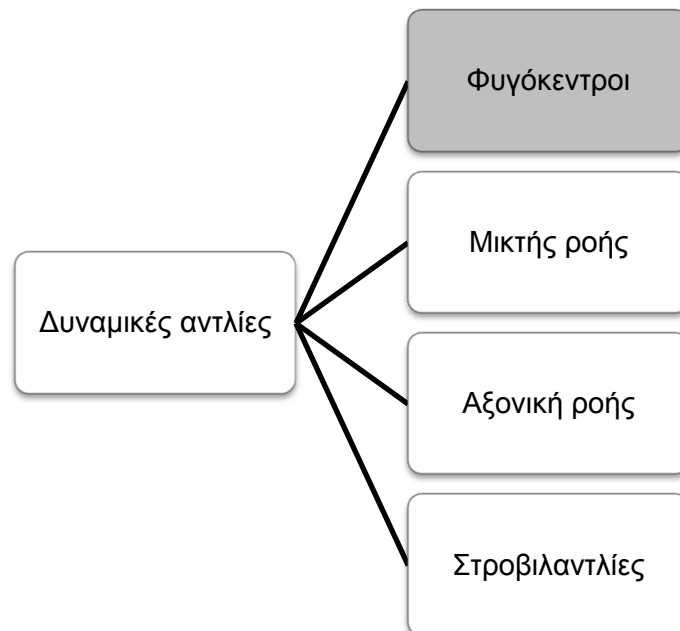
### 2.6.1.10 Κίνηση των αντλιών

Οι ηλεκτροκινητήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως για την κίνηση των αντλιών στα συστήματα ΑΩ είναι 1) οι τριφασικοί επαγωγικοί κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα ή με δακτυλίους, 2) οι σύγχρονοι κινητήρες, 3) οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

Στα μεγάλα συστήματα ΑΩ (>500 m<sup>3</sup>/d) χρησιμοποιούνται οι τριφασικοί επαγωγικοί με βραχυκυκλωμένο δρομέα γιατί είναι απλοί, έχουν μεγάλη ροπή εκκίνησης, και μπορούν να κατασκευαστούν για οσοδήποτε μεγάλης ισχύος. Το μειονέκτημά τους είναι ότι δεν μπορεί να μεταβληθεί η ταχύτητα περιστροφής τους. Η μονοφασικοί κινητήρες κατασκευάζονται για ισχύ μέχρι 10 HP. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι απλοί, κατασκευάζονται για ισχύ από μερικά W έως και πολλά kW. Το μειονέκτημά τους είναι ότι έχουν μεγάλη ροπή εκκίνησης και σχετικά υψηλό κόστος συντήρησης. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος δεν χρησιμοποιούνται πολύ στα συστήματα ΑΩ, παρά μόνο σε ερευνητικό επίπεδο και για σύνδεση συστημάτων ΑΠΕ με μονάδας αφαλάτωσης ΑΩ.

## 2.6.2 Χαρακτηριστικά δυναμικών αντλιών

Οι δυναμικές αντλίες αποτελούνται από ένα ή περισσότερους δρομείς τοποθετημένους σε ένα άξονα, που παίρνει κίνηση από κινητήρα και περιστρέφονται πάντοτε κατά την ίδια φορά μέσα σε ένα περίβλημα (θάλαμος). Επάνω στον περιστρεφόμενο δρομέα είναι τοποθετημένα πτερύγια κατάλληλου σχήματος. Η κατάταξη των δυναμικών αντλιών παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-9, όπου οι φυγόκεντροι αντλίες είναι ο τύπος που χρησιμοποιείται περισσότερο στα συστήματα αφαλάτωσης μεσαίου και μεγάλου μεγέθους ως αντλίες υψηλής πίεσης (>50 m<sup>3</sup>/d) και στα μικρά συστήματα αφαλάτωσης (<50 m<sup>3</sup>/d) χρησιμοποιούνται ως αντλίες τροφοδοσίας. Με έντονο χρώμα είναι οι τύποι αντλιών που χρησιμοποιούνται περισσότερο στις μονάδες αφαλάτωσης.



Εικόνα 2-9: Κατάταξη των δυναμικών αντλιών

Ο υπολογισμός της μεταβολής των χαρακτηριστικών μεγεθών των δυναμικών αντλιών, δηλαδή η παροχή, η πίεση και οι στροφές, πραγματοποιείται με εφαρμογή των παρακάτω εξισώσεων 2-18, 2-19 και 2-20 που ονομάζονται εξισώσεις ομοιότητας των δυναμικών αντλιών όπως αναφέρει ο ΑΚΡΙΤΙΔΗΣ, (1985)

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

2-18

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \quad 2-19$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^3 \quad 2-20$$

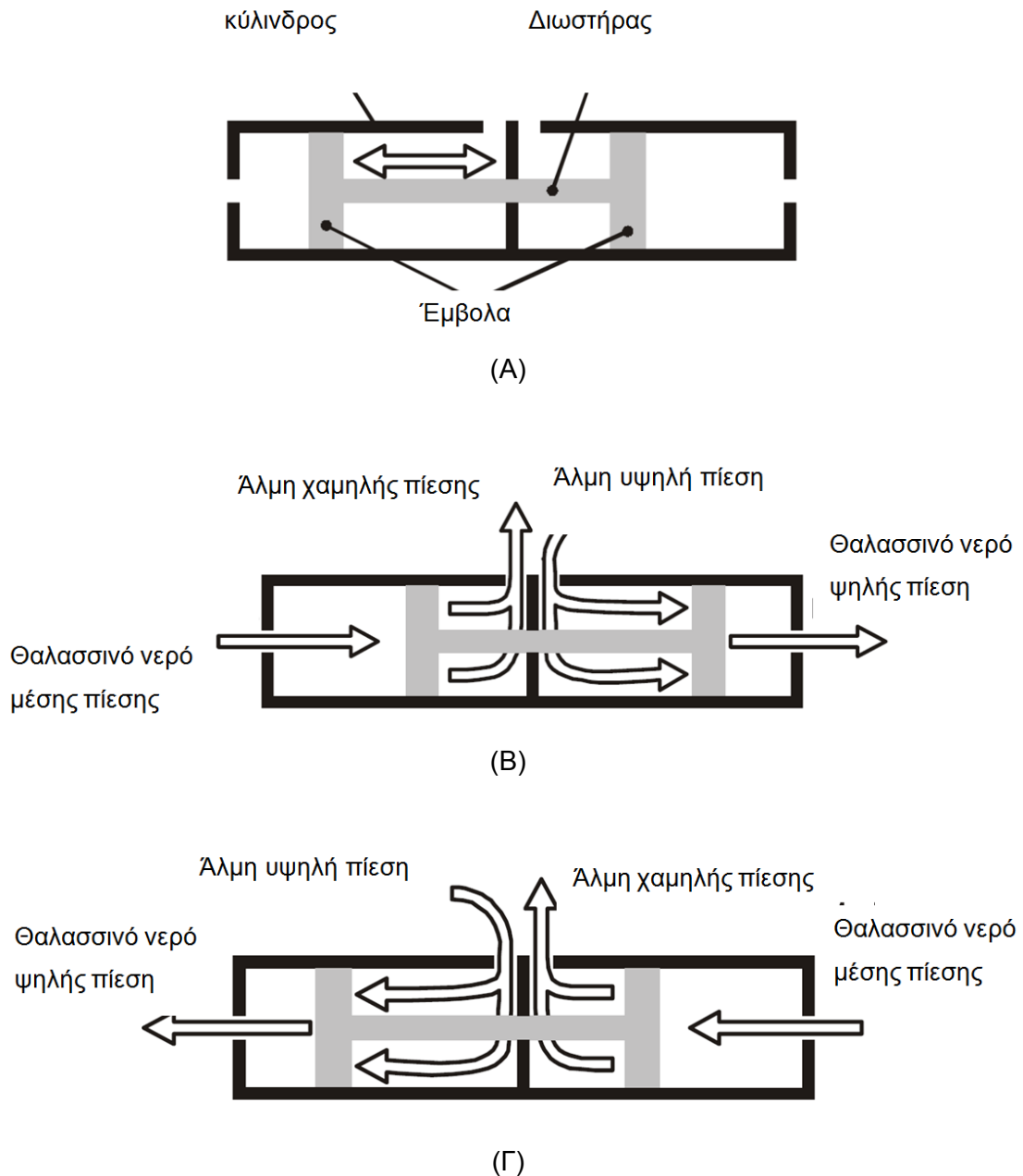
Όπου Q είναι η παροχή, H είναι το η συνολική απαιτούμενη πίεση της αντλίας, N είναι η ισχύς της αντλίας και n είναι οι στροφές της αντλίας.

## 2.7 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, αναφέρει ο *Pinkerton*, (1979).

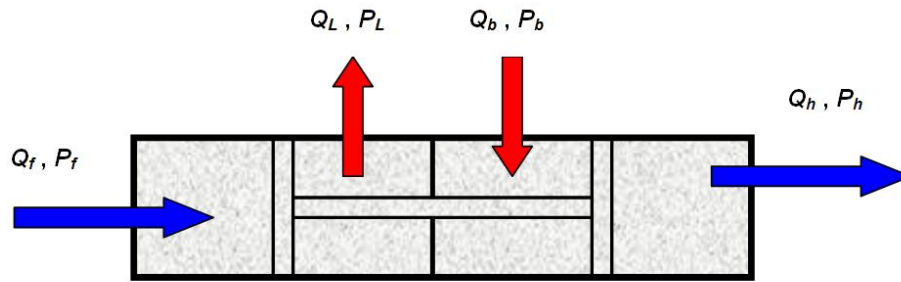
Ο μηχανισμός λειτουργίας της αντλίας Clark παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 2-10. Όπου τα δύο έμβολα τα οποία είναι συνδεδεμένα στον ίδιο διωστήρα, κινούνται δεξιά και αριστερά, βλέπε Εικόνα 2-10 (A), μέσα στο κύλινδρο που του περιλαμβάνει. Τα έμβολα και το διωστήρα δημιουργούν τέσσερις θαλάμους, 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, βλέπε Εικόνα 2-10 (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 ένα από τους άλλους δύο θαλάμους που βρίσκονται πίσω από τα έμβολα. Εικόνα 2-10 (B). Στο δεύτερο στάδιο αντιστρέφεται η λειτουργία μέσου μιας βαλβίδας για να προχωρήσει το θαλασσινό νερό υψηλής πίεσης προς τις μεμβράνης. Η άλμη υψηλής πίεσης αφού ανταλλάσσει την υδραυλική της ενέργεια με το θαλασσινό νερό, εξέρχεται από την αντλία με χαμηλή πίεση (1 bar), Εικόνα 2-10 (Γ), όπως αναφέρουν οι *Permar*, (1995) και ο *Wilson*, (1983).



Εικόνα 2-10: Λειτουργία της αντλίας Clark, πηγή: Thomson, (2003)

Μία ιδανική λειτουργία της αντλίας Clark είναι η λειτουργία χωρίς τριβές, διαρροές, απώλειες στην πίεση και στιγμιαία αντιστρεπτή λειτουργία των εμβόλων. Οι εξισώσεις από 2-18 έως 2-27 περιγράφουν τη λειτουργία της αντλίας, όπως έχει αναφερθεί στην εργασία των Thomson and Miranda, (2000).



Εικόνα 2-11: Σχηματικό διάγραμμα της αντλίας Clark

### 2.7.1 Ισολογισμός παροχής της αντλίας Clark

Αφού η ταχύτητα λειτουργίας του εμβόλου είναι ίδια στα διάφορα μέρη της αντλίας, τότε αυτή μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση 2-21

$$\frac{Q_f}{A_p} = \frac{Q_L}{A_p - A_r} = \frac{Q_b}{A_p - A_r} = \frac{Q_h}{A_p} \quad 2-21$$

Οπού  $A_p$  είναι η διατομή του εμβόλου  $A_r$  είναι η διατομή του σωλήνα.

Άρα:

$$Q_f = \frac{Q_L}{1-R} = \frac{Q_b}{1-R} = Q_h \quad 2-22$$

Όπου  $R$  είναι η θεωρητική ανάκτηση του καθαρού νερού που υπολογίζεται με την εξίσωση 2-23:

$$R = \frac{A_r}{A_p} \quad 2-23$$

Με την αντικατάσταση στην εξίσωση 3-24

$$R = \frac{Q_f - Q_f(1-R)}{Q_f} = \frac{Q_f - Q_b}{Q_f} = \frac{Q_p}{Q_f} \quad 2-24$$

### 2.7.2 Ισολογισμός της πίεσης της αντλίας Clark

Αθροίζοντας τις δυνάμεις που ασκούνται πάνω στο έμβολο της αντλίας:

$$\sum f = P_f A_p - P_L (A_p - A_r) + P_b (A_p - A_r) - P_h A_p = 0 \quad 2-25$$

Άρα

$$P_f + P_b (1 - R) = P_L (1 - R) + P_h \quad 2-26$$

### 2.7.3 Ισολογισμός ισχύος

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας

Ισχύ εισόδου = Ισχύ εξόδου

$$P_f Q_f + P_b Q_b = P_L Q_L + P_h Q_h \quad 2-27$$

### 2.7.4 Ογκομετρική απόδοση της Clark

Η ογκομετρική απόδοση της αντλίας είναι ο λόγος της πραγματικής παροχής της αντλίας προς την θεωρητική παροχή της, όπως αυτό περιγράφεται με την εξίσωση 2-28

$$\eta_v = \frac{Q_p}{Q_f R} \quad 2-28$$

### 2.7.5 Η μηχανική απόδοση της Clark

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 της άλμης).

$$\eta_m = \frac{P_h}{P_f + P_b} \quad 2-29$$

### 2.7.6 Ολική απόδοση της αντλίας

Η ολική απόδοση της αντλίας ορίζεται από το γινόμενο της μηχανικής και της ογκομετρικής απόδοσης.

$$\eta_{clark} = \eta_v \times \eta_m \quad 2-30$$

## 2.8 Συμπεράσματα

- Ανεξάρτητα από το μέγεθος τους, οι μονάδες αφαλάτωσης ΑΩ αποτελούνται από τρία βασικά μέρη, το σύστημα προ-επεξεργασίας, το κυρίως σύστημα αφαλάτωσης και το σύστημα μετ-επεξεργασίας.
- Το κατάλληλο σύστημα προ-επεξεργασίας (χημικά και υδροδυναμικά) είναι πρωταρχικής σημασίας για τη βέλτιστη λειτουργία των μονάδων ΑΩ.
- Η μεμβράνη είναι το σημαντικότερο εξάρτημα στο κυρίως σύστημα μιας μονάδας αφαλάτωσης. Η λειτουργία των μεμβρανών επηρεάζεται από πολλούς παραμέτρους, όπως η πίεση λειτουργίας, η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας, η συγκέντρωση αλάτων στο νερό τροφοδοσίας, η ανάκτηση του αφαλατωμένο νερού και ο βαθμός pH.
- Οι φυγόκεντροι αντλίες, χρησιμοποιούνται στις συμβατικές μονάδες αφαλάτωσης κυρίως ως αντλίες τροφοδοσίας, ενώ οι πολυβάθμιες χρησιμοποιούνται και ως αντλίες υψηλής πίεσης. Οι αντλίες θετικής μετατόπισης χρησιμοποιούνται κυρίως ως αντλίες υψηλής πίεσης, λόγω του μεγάλου βαθμού απόδοσης και της ικανότητας ανάπτυξης υψηλών πιέσεων.
- Η θεωρητική ανάπτυξη της αντλίας Clark ως ανακτητής υδραυλικής ενέργειας της άλμης, μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση των βασικών εξισώσεων εμβολοφόρων αντλιών θετικής μετατόπισης.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:**

# **ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**





### **3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**

#### **3.1 Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αρχικά η συμβατική πειραματική μονάδα ΑΩ καθώς και όλες οι συνιστώσες της. Η μικρή συμβατική μονάδα ΑΩ, δεν εμπεριέχει συσκευή ανάκτησης ενέργειας και τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο. Στη συνέχεια αναφέρονται όλες οι αναβαθμίσεις και μετατροπές στη συμβατική μονάδα ΑΩ. Επίσης περιγράφονται όλα τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και το σύστημα συλλογής δεδομένων.

Επίσης, παρουσιάζεται αναλυτικά ο σχεδιασμός της Φ/Β συστοιχίας και της ανεμογεννήτριας, καθώς και οι συσσωρευτές του συστήματος. Αναλυτικά περιγράφονται οι τοπολογίες σύνδεσης των ΑΠΕ και τη μονάδα ΑΩ. Τελικώς αναφέρονται και αναλύονται τα πειραματικά αποτελέσματα από κάθε τοπολογία.

#### **3.2 Σχεδιασμός της πειραματικής συμβατικής μονάδας ΑΩ (χωρίς ανάκτηση και χωρίς ΑΠΕ)**

Ο σκοπός κάθε σχεδιασμού μιας μονάδας αφαλάτωσης ΑΩ είναι ο προσδιορισμός της δυναμικότητας της μονάδας [ $m^3/d$ ], του αριθμού και της διάταξης των μεμβρανών, του αριθμού και της διάταξης των δοχείων πίεσης (μεμβρανοθήκες), καθώς και η εκτίμηση των ενεργειακών απαιτήσεων της μονάδας ΑΩ ανά μονάδα παραγόμενης ποσότητας νερού (σε  $kWh/m^3$ ).

Ο συμβατικός σχεδιασμός της μονάδας ΑΩ ξεκινά με την καταγραφή των αναγκών σε νερό [ $m^3/d$ ]. Στη συνέχεια προσδιορίζεται ο τύπος του νερού τροφοδοσίας (θαλασσινό ή υφάλμυρο) με πλήρη χημική ανάλυση. Πραγματοποιείται μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία υπολογισμού των αριθμών των μεμβρανών και η διάταξή τους μέχρι να επιτευχθούν δύο παράλληλοι στόχοι: 1) η επιθυμητή ποσότητα αφαλατωμένου νερού να καλύπτει τις ανάγκες σε αφαλατωμένο νερό και, 2) η συγκέντρωση των αλάτων στο αφαλατωμένο νερό να είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές του πόσιμου νερού (500 ppm). Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται με χρήση λογισμικών σχεδιασμού και προσομοίωσης μεμβρανών που είναι διαθέσιμα από τους κατασκευαστές των μεμβρανών. Τέτοια λογισμικά είναι για παράδειγμα το Reverse Osmosis System Analysis ROSA της εταιρίας DOW chemicals και το Integrated Membrane Solution Design IMSdesign της εταιρίας Hydronautics.

### **3.2.1 Δεδομένα και υποθέσεις σχεδιασμού**

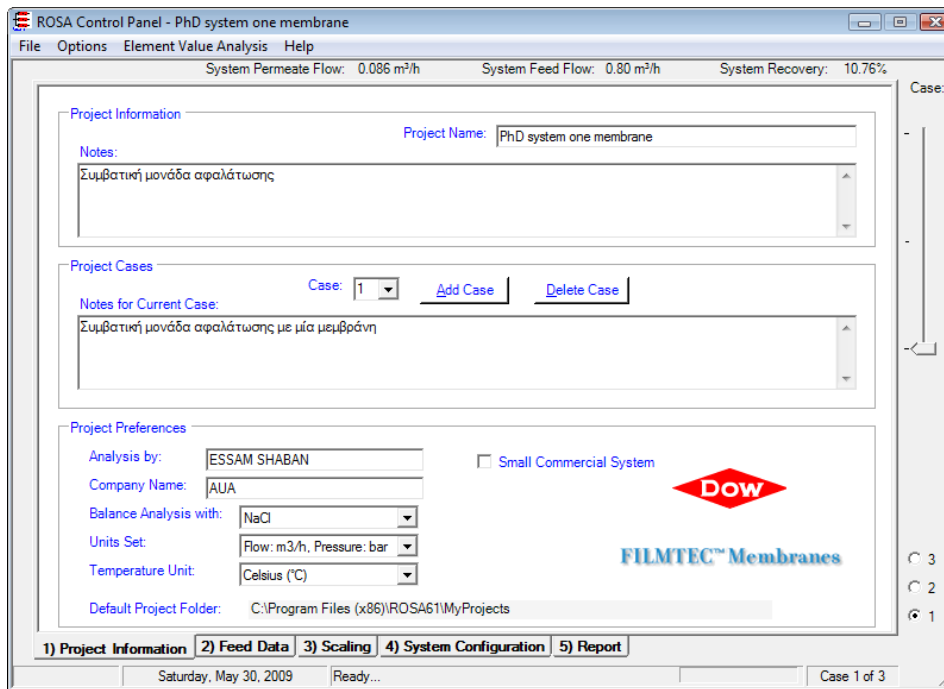
- Το νερό τροφοδοσίας είναι τεχνητό θαλασσινό με συγκέντρωση αλάτων 30000 ppm (35 mS/cm).
- Χρησιμοποιείται μόνο μία μεμβράνη και μία μεμβρανοθήκη για να επιτευχθεί ένα οικονομικό σύστημα στα πλαίσια του διαθέσιμου προϋπολογισμού (3.700,00 € για το έτος 2003)
- Δεν χρησιμοποιείται συσκευή ανάκτησης σε αυτό το στάδιο.
- Θερμοκρασία νερού τροφοδοσίας 20 °C.
- Χρησιμοποιείται μια μεμβράνη AΩ FILMTEC SW30-2540
- Ο βαθμός pH είναι 7.
- Παροχή νερού τροφοδοσίας 1 m<sup>3</sup>/h.
- Ο συντελεστής ρύπανσης της μεμβράνης (Fouling Factor) είναι 0.85. Ο συντελεστής αυτός υποδηλώνει την ηλικία της μεμβράνης, με ένα συντελεστή ίσο 1 να υποδηλώνει μία καινούργια μεμβράνη. Ο σχεδιασμός όμως βασίζεται στην πρόβλεψη λειτουργίας της μεμβράνης μετά από περίπου δύο έτη λειτουργίας (συντελεστή 0.85).
- Χρησιμοποιείται το λογισμικό ROSA Version. 6.1.5, που ανήκει στην κατασκευάστρια εταιρία της μεμβράνης

### **3.2.2 Αποτελέσματα του σχεδιασμού**

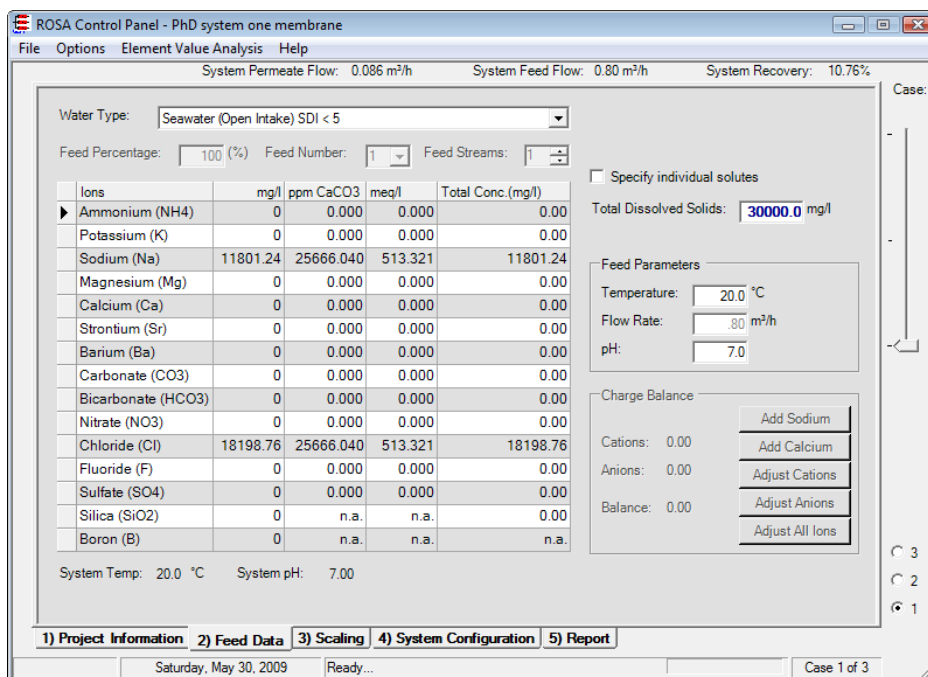
Εφαρμόζοντας τις προαναφερθέντες υποθέσεις και δεδομένα στο λογισμικό ROSA όπως παρουσιάζεται στα παρακάτω βήματα

Στο πρώτο φύλλο εισόδου δεδομένων εισάγονται τα γενικά δεδομένα όπως το όνομα το αρχείο και πιθανών κάποιες σημειώσεις. Επίσης ρυθμίζονται οι μονάδες τα οποία χρησιμοποιούνται σε όλη τη διαδικασία του σχεδιασμού (Εικόνα 3-1).

Στο δεύτερο φύλλο εισόδου δεδομένων (Εικόνα 3-2) εισάγονται τα στοιχεία του νερού τροφοδοσίας (συγκέντρωση αλάτων, θερμοκρασία, ο αριθμός pH και πλήρες χημική ανάλυση, εφόσον υπάρχει). Ο υπολογισμός των επικαθίσεων αλάτων στις μεμβράνες δεν πραγματοποιείται διότι δεν είναι διαθέσιμη πλήρες χημική ανάλυση του νερού τροφοδοσίας.



Εικόνα 3-1: Φύλλο εισαγωγής γενικών δεδομένων



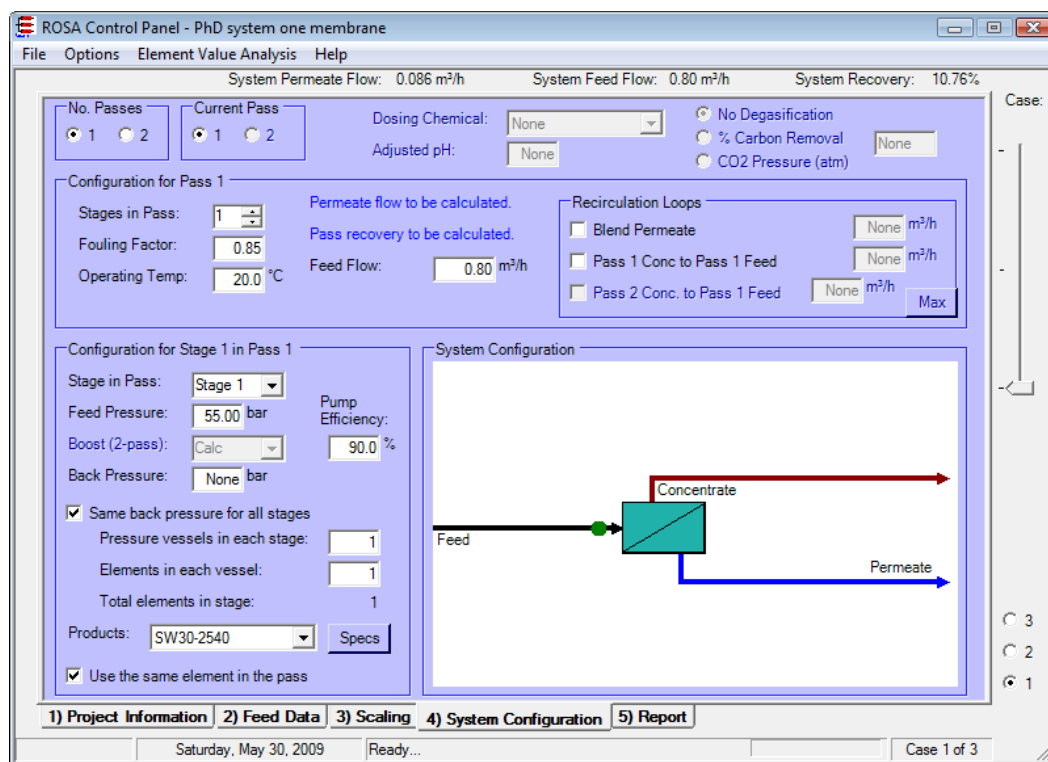
Εικόνα 3-2: Φύλλο εισαγωγής δεδομένων νερού τροφοδοσίας

Τα δεδομένα εισόδου του σχεδιασμού που εμφανίζονται στην Εικόνα 3-1 και Εικόνα 3-2 συνοψίζονται στον Πίνακα 3-1.

Πίνακας 3-1: δεδομένα του σχεδιασμού

|                                      |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| Συγκέντρωση αλάτων νερού τροφοδοσίας | 30000.00 mg/L          |
| Προέλευση του νερού τροφοδοσίας      | Τεχνητό θαλασσινό νερό |
| Πίεση εισόδου της μεμβράνης          | 55.00 bar              |
| Θερμοκρασία νερού τροφοδοσίας        | 20.0°C                 |
| Συντελεστής ρύπανσης της μεμβράνης   | 0.85                   |
| Αριθμός pH                           | 7.00                   |

Στο επόμενο βήμα εισάγονται οι βαθμίδες αφαλάτωσης, ο αριθμός των μεμβρανών, ο αριθμός των δοχείων πίεσης, ο βαθμός απόδοσης της αντλίας υψηλής πίεσης. Ο υπολογισμός εκτελείται αφού επιλεγεί κάποιο μοντέλο μεμβράνης (Εικόνα 3-3).



Εικόνα 3-3: Διαμόρφωση της μονάδας αφαλάτωσης ΑΩ

Τα αποτελέσματα σχεδιασμού και προσομοίωσης της μονάδας ΑΩ παρουσιάζονται στην Εικόνα 3-4 και Εικόνα 3-5. Επίσης τα αποτελέσματα αυτά καταγράφονται αναλυτικά στον πίνακα 3-2.

**Project Information:** Συμβατική μονάδα αφαλάτωσης

**System Details**

|  |                        |                      |                        |                   |                          |
|--|------------------------|----------------------|------------------------|-------------------|--------------------------|
| Feed Flow to Stage 1                                 | 0.80 m <sup>3</sup> /h | Pass 1 Permeate Flow | 0.09 m <sup>3</sup> /h | Osmotic Pressure: |                          |
| Raw Water Flow to System                             | 0.80 m <sup>3</sup> /h | Pass 1 Recovery      | 10.76 %                | Feed              | 23.11 bar                |
| Feed Pressure  | 55.00 bar              | Feed Temperature     | 20.0 C                 | Concentrate       | 25.94 bar                |
| Fouling Factor                                       | 0.85                   | Feed TDS             | 30000.00 mg/l          | Average           | 24.52 bar                |
| Chem. Dose   | None                   | Number of Elements   | 1                      | Average NDP       | 30.08 bar                |
| Total Active Area                                    | 2.60 M <sup>2</sup>    | Average Pass 1 Flux  | 33.09 l/mh             | Power             | 1.36 kW                  |
| Water Classification: Seawater (Open Intake) SDI < 5 |                        |                      |                        | Specific Energy   | 15.78 kWh/m <sup>3</sup> |

| Stage | Element   | #PV | #Ele | Feed Flow (m <sup>3</sup> /h) | Feed Press (bar) | Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h) | Conc Flow (m <sup>3</sup> /h) | Conc Press (bar) | Perm Flow (m <sup>3</sup> /h) | Avg Flux (l/mh) | Perm Press (bar) | Boost Press (bar) | Perm TDS (mg/l) |
|-------|-----------|-----|------|-------------------------------|------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|
| 1     | SW30-2540 | 1   | 1    | 0.80                          | 54.66            | 0.00                            | 0.71                          | 54.28            | 0.09                          | 33.09           | 0.00             | 55.00             | 164.11          |

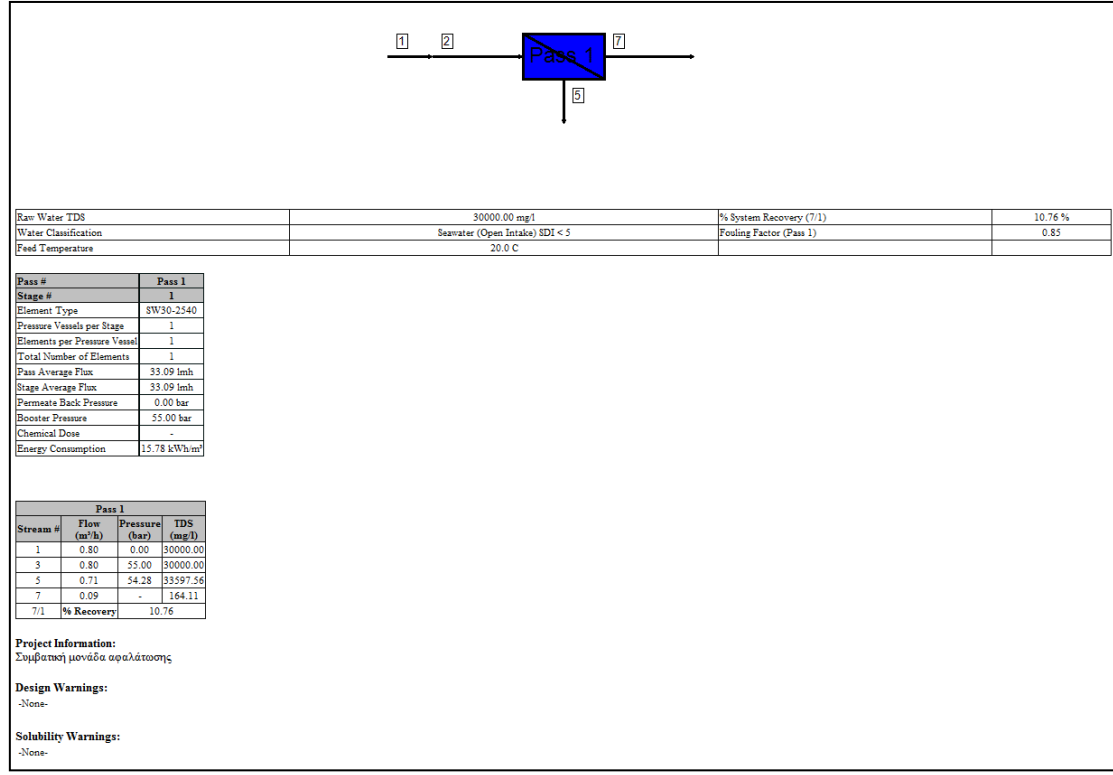
| Pass Streams (mg/l as Ion) |          |               |             |          |        |
|----------------------------|----------|---------------|-------------|----------|--------|
| Name                       | Feed     | Adjusted Feed | Concentrate |          | Total  |
|                            |          |               | Stage 1     | Permeate |        |
| NH4                        |          | 0.00          | 0.00        | 0.00     | 0.00   |
| K                          |          | 0.00          | 0.00        | 0.00     | 0.00   |
| Na                         | 11801.24 | 11801.24      | 13216.43    | 64.56    | 64.56  |
| Mg                         |          | 0.00          | 0.00        | 0.00     | 0.00   |
| Ca                         |          | 0.00          | 0.00        | 0.00     | 0.00   |
| Sr                         |          | 0.00          | 0.00        | 0.00     | 0.00   |
| Ba                         |          | 0.00          | 0.00        | 0.00     | 0.00   |
| CO <sub>3</sub>            |          | 0.00          | 0.00        | 0.00     | 0.00   |
| HCO <sub>3</sub>           |          | 0.00          | 0.00        | 0.00     | 0.00   |
| NO <sub>3</sub>            |          | 0.00          | 0.00        | 0.00     | 0.00   |
| Cl                         | 18198.76 | 18198.76      | 20381.13    | 99.55    | 99.55  |
| F                          |          | 0.00          | 0.00        | 0.00     | 0.00   |
| SO <sub>4</sub>            |          | 0.00          | 0.00        | 0.00     | 0.00   |
| SiO <sub>2</sub>           |          | 0.00          | 0.00        | 0.00     | 0.00   |
| Boron                      |          | 0.00          | 0.00        | 0.00     | 0.00   |
| CO <sub>2</sub>            |          | 0.00          | 0.00        | 0.00     | 0.00   |
| TDS                        | 30000.00 | 30000.00      | 33597.56    | 164.11   | 164.11 |
| pH                         | N/A      | N/A           | N/A         | N/A      | N/A    |

**Design Warnings:**  
-None-

**Solubility Warnings:**  
-None-

**Stage Details**

Εικόνα 3-4: Δεδομένα εξόδου προσομοίωσης της μεμβράνης



Εικόνα 3-5: Βασικά στοιχεία του σχεδιασμού της μονάδας ΑΩ

Πίνακας 3-2: Σύνοψη αποτελεσμάτων του σχεδιασμού της συμβατικής μονάδας αφαλάτωσης ΑΩ

|  |                          |
|--|--------------------------|
| Τύπος μεμβράνης                        | SW30-2540                |
| Αριθμός δοχείων πίεσης                 | 1                        |
| Αριθμός μεμβρανών σε κάθε μεμβρανοθήκη | 1                        |
| Συνολικός αριθμός μεμβρανών            | 1                        |
| Ανάκτηση αφαλατωμένου νερού            | 10.76 %                  |
| Ειδική κατανάλωση ενέργειας            | 15.78 kWh/m <sup>3</sup> |
| Ροή αφαλατωμένου νερού                 | 0.09 m <sup>3</sup> /h   |
| Ροή άλμης                              | 0.71 m <sup>3</sup> /h   |
| Συγκέντρωση αλάτων αφαλατωμένου νερού  | 164.11 mg/L              |
| Συγκέντρωση αλάτων της άλμης           | 33597.56 mg/L            |

### 3.3 Περιγραφή της συμβατικής μονάδας ΑΩ (χωρίς ανάκτηση και χωρίς ΑΠΕ)

Στη βάση των συμπερασμάτων του σχεδιασμού της μονάδας ΑΩ, έγινε προμήθεια μιας συμβατικής μονάδας που αποτελείται από τα υποσυστήματα που περιγράφονται στη συνέχεια.

#### Δεξαμενή τροφοδοσίας

Η δεξαμενή τροφοδοσίας (Εικόνα 3-6) είναι κατασκευασμένη από μαύρο πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, χωρητικότητας 1 m<sup>3</sup>. Στη δεξαμενή αυτή παρασκευάζεται το τεχνητό θαλασσινό νερό τροφοδοσίας, διαλύοντας χλωριούχο νάτριο (NaCl) σε νερό του δικτύου της πόλης.



Εικόνα 3-6: Η δεξαμενή τροφοδοσίας

### **Αντλία τροφοδοσίας**

Η αντλία τροφοδοσίας ECOJET 120 που απεικονίζετε στην Εικόνα 3-7, αντλεί το νερό από τη δεξαμενή τροφοδοσίας και το οδηγεί προς τη μονάδα ΑΩ διαμέσων των φίλτρων. Ο κινητήρας της αντλίας είναι μονοφασικός ασύγχρονος ισχύος 1 kW. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας και του κινητήρα φαίνονται στον πίνακα 3-3.



Εικόνα 3-7: Η αντλία τροφοδοσίας ECOJET 120

Πίνακας 3-3: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα και της αντλίας τροφοδοσίας

|                           |                                    |
|---------------------------|------------------------------------|
| Τύπος αντλίας             | Φυγόκεντρη                         |
| Μοντέλο                   | ECOJET 120                         |
| Μέγιστο βάθος αναρρόφησης | 7.6 m                              |
| Μέγιστη πίεση             | 5 bar                              |
| Μέγιστη παροχή            | 3.6 m <sup>3</sup> /h              |
| 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                             |

### **Σύστημα προ-επεξεργασίας του νερού τροφοδοσίας**

Αφού το διάλυμα τροφοδοσίας προέρχεται από διάλυμα NaCl και νερό του δικτύου άρα δεν χρειάζεται ιδιαίτερο σύστημα προ-επεξεργασίας. Το σύστημα προ-επεξεργασίας του νερού τροφοδοσίας αποτελείται από τα εξής μέρη: (Εικόνα 3-8)

- Φίλτρο куτταρίνης άνθρακα για συγκράτηση του ελεύθερου χλωρίου που υπάρχει στο νερό της πόλης.
- Φίλτρο αιωρημάτων με φύσιγγα από πολυπροπυλένιο 25 μm για την συγκράτηση αιωρούμενων σωματιδίων.
- Φίλτρο куτταρίνης 5 μm για τελική φίλτρανση πριν το νερό οδηγηθεί στην αντλία υψηλής πίεσης και από εκεί στην μεμβράνη της αντίστροφης ώσμωσης.

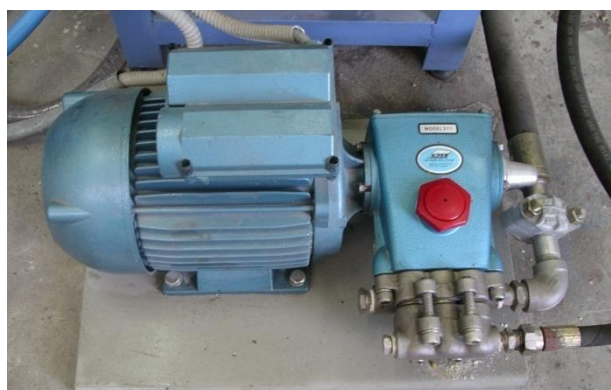




Εικόνα 3-8: Φίλτρα προεπεξεργασίας του νερού

### Αντλία Υψηλής πίεσης

Η αντλία υψηλής πίεσης (Εικόνα 3-9) είναι μια εμβολοφόρος αντλία που ανυψώνει την πίεση του νερού στην κατάλληλη τιμή για να εισέλθει στη μεμβράνη. Ο κινητήρας της αντλίας είναι εξαλλασσόμενο ρεύματος (EP) μονοφασικός ασύγχρονος, ισχύος 2.2 kW. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας φαίνονται στον Πίνακα 3-4 .



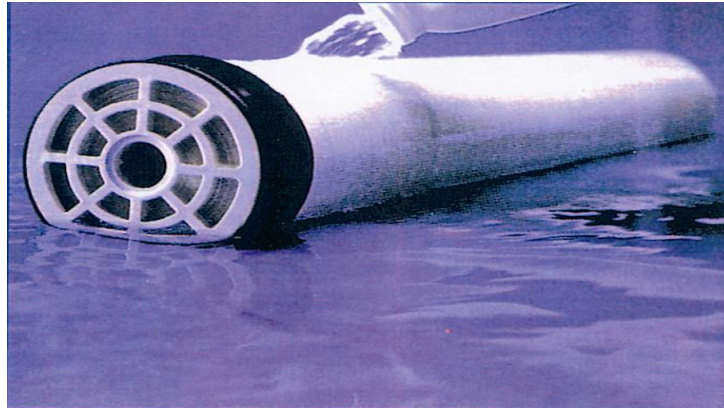
Εικόνα 3-9: Ο κινητήρας και η αντλία υψηλής πίεσης

Πίνακας 3-4: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα και της αντλίας υψηλής πίεσης

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| Τύπος αντλίας               | Εμβολοφόρος                                  |
| Μοντέλο                     | 3 Frame Plunger CAT Pump stainless steel 271 |
| Ονομαστική παροχή           | 792 L/h                                      |
| Εύρος πίεσης                | 7 - 105 bar                                  |
| Ονομαστικό αριθμό στροφών   | 1509 RPM                                     |
| Φάσεις κινητήρα             | EP Μονοφασικός ασύγχρονος κινητήρας          |
| Τάση κινητήρα               | 220V   |
| Ένταση ρεύματος λειτουργίας | 12.5 A                                       |
| Ισχύς κινητήρα              | 2.2 kW                                       |

### Η μεμβράνη και η μεμβρανοθήκη

Η μεμβράνη Filmtec SW30-2540 (Εικόνα 3-10) 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 3-11). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μεμβράνης φαίνονται στον πίνακα 3-5..



Εικόνα 3-10: Η μεμβράνη (σπειροειδούς περιέλιξης)



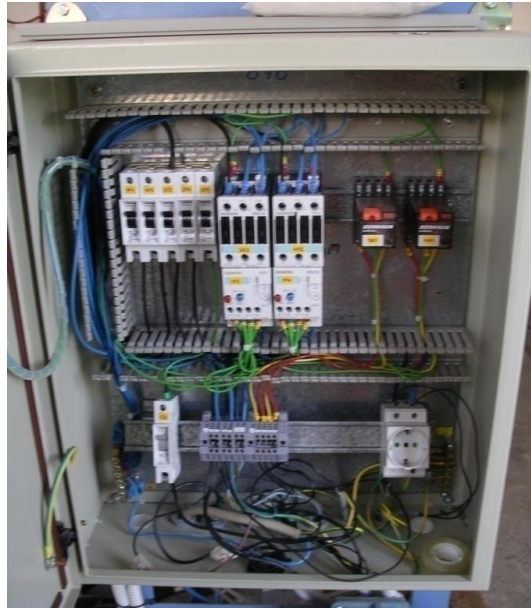
Εικόνα 3-11: Η μεμβρανοθήκη Code Line

Πίνακας 3-5: 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 <sup>3</sup> /h                      |
| Παροχή παραγόμενου νερού   | 83 L/h                                     |
| Ικανότητα απόρριψης αλάτων | 99.2%                                      |
| Ανάκτηση ενός στοιχείου    | 8%   |

### Πίνακας ισχύος

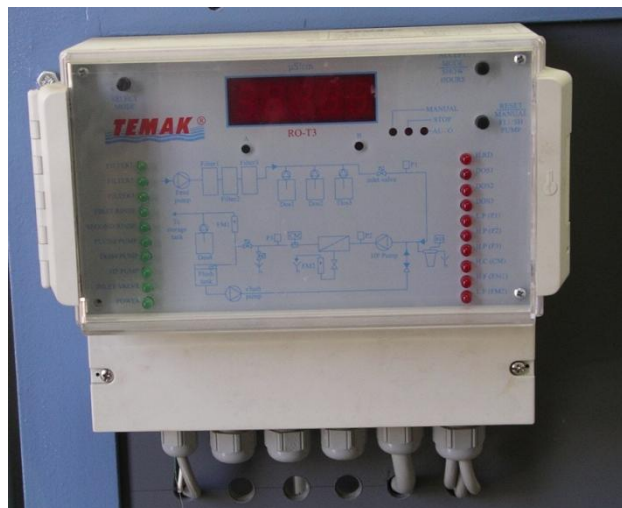
Περιλαμβάνει το κύκλωμα ισχύος της αντλίας τροφοδοσίας και της αντλίας υψηλής πίεσης καθώς και τους διακόπτες αυτοματισμού των αντλιών (Εικόνα 3-12).



Εικόνα 3-12: Ο πίνακας ισχύος

### **Πίνακας ελέγχου**

Είναι ένας ηλεκτρονικός πίνακας (Εικόνα 2-8) με μικροεπεξεργαστή. Περιέχει και το αγωγιμόμετρο για τη μέτρηση της ποιότητας του παραγόμενου νερού σε  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Ελέγχει συνεχώς, (όταν το σύστημα είναι σε λειτουργία), αν η πίεση στην είσοδο της αντίστροφης ώσμωσης και η πίεση στην είσοδο της μεμβράνης είναι στα αποδεκτά επίπεδα αλλιώς ο πίνακας ελέγχου σταματάει τη λειτουργία των κινητήρων τροφοδοσίας και υψηλής πίεσης.



Εικόνα 3-13: Ο πίνακας ελέγχου

### Αισθητήρια της συμβατικής μονάδας ΑΩ

- Αναλογικά μανόμετρα στην είσοδο και στην έξοδο των φίλτρων προ-επεξεργασίας.
- Αναλογικό μανόμετρο στην είσοδο και στην έξοδο της μεμβράνης.
- Αναλογικό θερμόμετρο στην είσοδο της αντίστροφης ώσμωσης.
- Ψηφιακό αγωγιμόμετρο στην γραμμή του αφαλατωμένου νερού.
- Αναλογικά ροόμετρα στην γραμμή του αφαλατομένου νερού και στη γραμμή της άλμης.
- Πρεσοστάτης στην είσοδο της αντλίας υψηλής πίεσης. Προστατεύει την αντλία από εν ξηρώ λειτουργία.
- Πρεσοστάτης 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 στην είσοδο και έξοδο των μεμβρανών καθώς και στην έξοδο της αντλίας τροφοδοσίας.
- Μεταδότες για την μέτρηση της παροχής στην γραμμή του αφαλατωμένου νερού και στην γραμμή της άλμης.
- Μεταδότες ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην γραμμή του αφαλατωμένου νερού και στην γραμμή της άλμης.
- Μεταδότες ισχύος για μέτρηση της ισχύς των δύο κινητήρων τροφοδοσίας και υψηλής πίεσης.

#### **3.4 Λειτουργία της συμβατικής μονάδας ΑΩ**

Αρχικά γίνεται προετοιμασία του τεχνητού θαλασσινού νερού, διαλύοντας 25 kg NaCl σε 1 m<sup>3</sup> 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 αντλία τροφοδοσίας αντλεί το τεχνητό θαλασσινό νερό από την δεξαμενή και το οδηγεί, σε πρώτη φάση, στην μεμβράνη για να γίνει η πλύση πριν την λειτουργία της μονάδας.

Μετά από πέντε λεπτά, ολοκληρώνεται η διαδικασία καθαρισμού των μεμβρανών και ξεκινάει η αντλία υψηλής πίεσης και αρχίζει ουσιαστικά η διεργασία της αφαλάτωσης. Με την

βοήθεια της βάνας στραγγαλισμού στην έξοδο της άλμης, αυξάνεται η πίεση εισόδου της μεμβράνης (δημιουργία αντίστασης στη γραμμή της άλμης και κατά συνέπεια αντίσταση στην αντλία υψηλής πίεσης).

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού ελέγχεται συνεχώς και αν είναι μεγαλύτερη από μια προκαθορισμένη τιμή (1000  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ), το νερό αυτό οδηγείται στην γραμμή της άλμης.

Στο τέλος της λειτουργίας, ανοίγεται η βάνα στραγγαλισμού σταδιακά μειώνεται η πίεση εισόδου της μεμβράνης και τελικά σταματάει η αντλία υψηλής πίεσης. Η αντλία τροφοδοσίας συνεχίζει να λειτουργεί για 15 λεπτά για την πλήση της μεμβράνης πριν να σταματήσει η μονάδα.

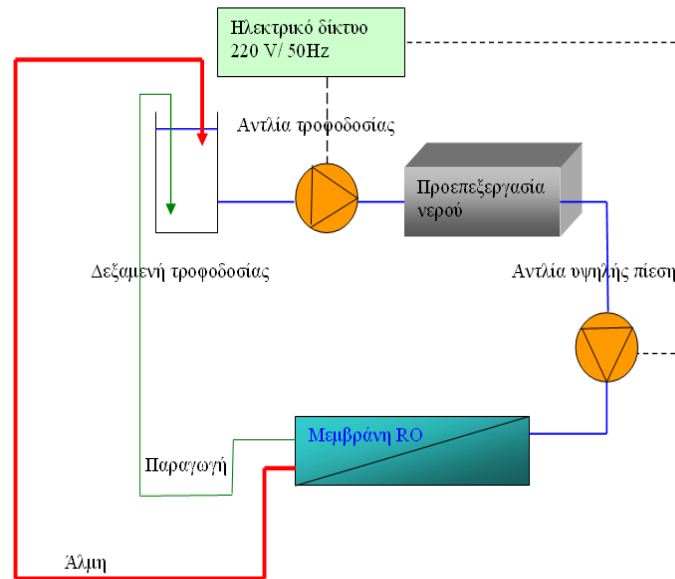
Οι δύο κινητήρες του συστήματος τροφοδοτούνται με μονοφασικό ηλεκτρικό ρεύμα από το δίκτυο (220 V - 50 HZ).

Το σύστημα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης φαίνεται στην Εικόνα 3-14 και το σχηματικό του διάγραμμα στη Εικόνα 3-15.





Εικόνα 3-14: Η μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης



Εικόνα 3-15: Σχηματικό διάγραμμα της συμβατικής μονάδας ΑΩ

### 3.5 Πειραματική διερεύνηση λειτουργίας της συμβατικής μονάδας ΑΩ

Η συμβατική μονάδα ΑΩ που είναι διαθέσιμη εμπορικά δεν περιλαμβάνει συσκευή ανάκτησης της υδραυλικής ενέργειας και τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα από το ηλεκτρικό δίκτυο. Σκοπός της πειραματικής διερεύνησης της συμβατικής μονάδας ήταν ο πλήρης χαρακτηρισμός της, με τρόπο που να είναι δυνατή η χρησιμοποίηση των επιδόσεων της ως βάση σύγκρισης για την αξιολόγηση των τροποποιήσεων που θα εξεταστούν στη συνέχεια.

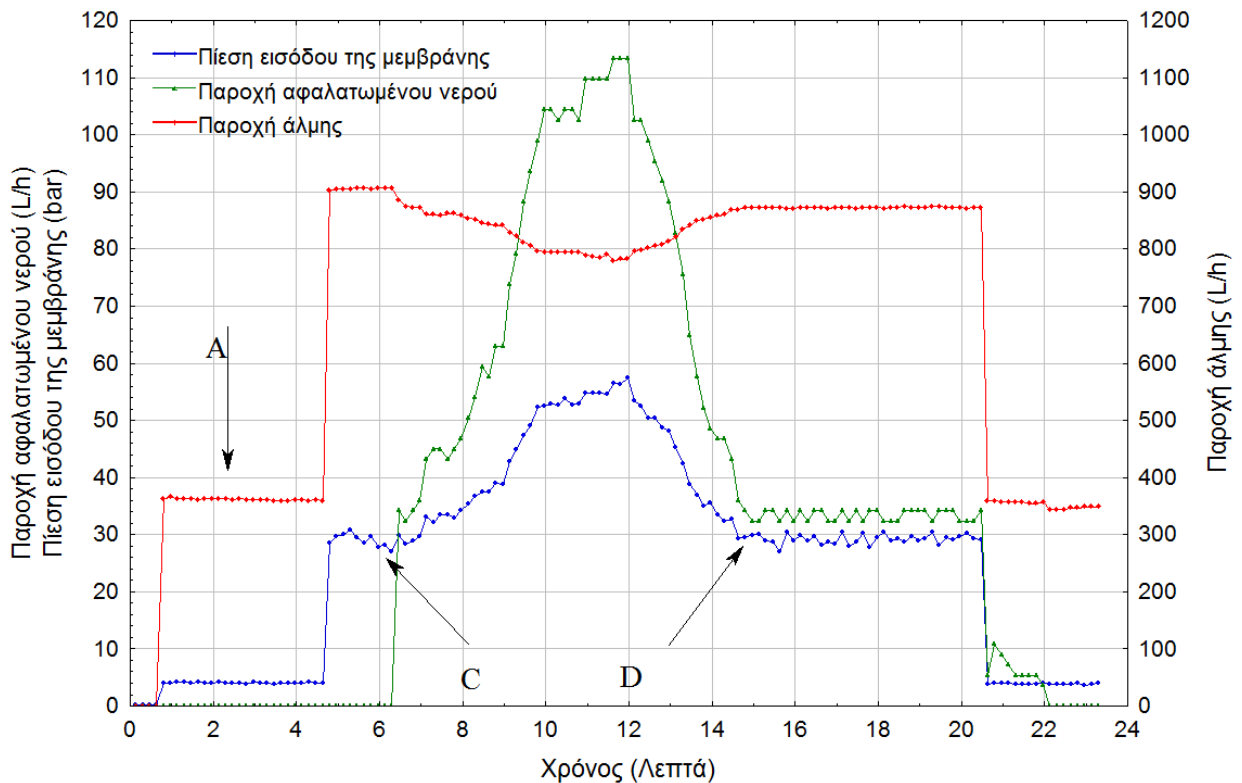
Η πειραματική διερεύνηση της συμβατικής μονάδας ΑΩ αφορά την καταγραφή της ποιότητας (ηλεκτρική αγωγιμότητα) και της ποσότητας του αφαλατωμένου νερού καθώς και την κατανάλωση ενέργειας της μονάδας. Τέλος καταγράφεται η επίδραση της μεταβολής της πίεσης λειτουργίας στην παροχή αφαλατωμένου νερού και στην κατανάλωση ενέργειας.

#### 3.5.1 Παραγωγή αφαλατωμένου νερού και άλμης

Στην αρχή της λειτουργίας της μονάδας, η αντλία τροφοδοσίας αντλεί περίπου 400 L/h θαλασσινό νερό από τη δεξαμενή τροφοδοσίας προς την είσοδο της μεμβράνης ΑΩ μέσω των φίλτρων προ-επεξεργασίας, όπου γίνεται πλύση της μεμβράνης για περίπου 5 λεπτά (περιοχή Α στη Εικόνα 3-16). Στη συνέχεια ξεκινάει η αντλία υψηλής πίεσης, καθώς είναι τελείως ανοιχτή η βάνα στραγγαλισμού. Η πίεση εισόδου της μεμβράνης αυξάνεται σταδιακά από 30 bar έως 58 bar και ξανά από 58 bar έως 30 bar για να καταγραφούν οι διάφοροι παράμετροι λειτουργίας της μονάδας (σημεία C και D στην Εικόνα 3-16) με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η παροχή αφαλατωμένου νερού από 34 έως 115 L/h. Από την επεξεργασία

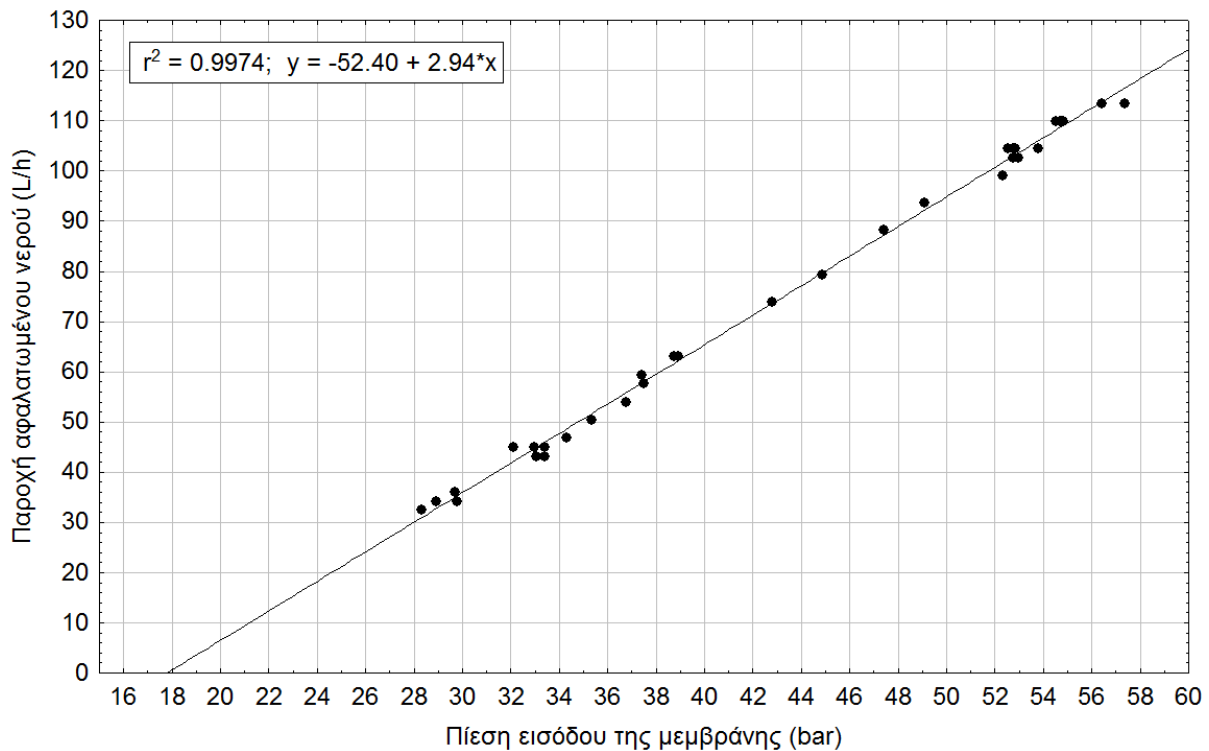
των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η μεταβολή αυτή είναι γραμμική σε σχέση με τη μεταβολή της πίεσης, με συντελεστή συσχέτισης 99.7%, όπως αυτό φαίνεται στη

Εικόνα 3-17. Η παραγωγή της άλμης μεταβάλλεται από 900 L/h στην αρχή της λειτουργίας της αντλίας υψηλής πίεσης και μειώνεται έως 784 L/h στη μεγαλύτερη τιμή της πίεσης εισόδου της μεμβράνης. Η ανάκτηση του αφαλατωμένου νερού μεταβάλλεται από 3.7% έως 12.7%. Σημειώνεται ότι η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας ήταν σταθερή (27°C) καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.



Εικόνα 3-16: Η επίδραση της μεταβολής της πίεσης στην ποσότητα του νερού

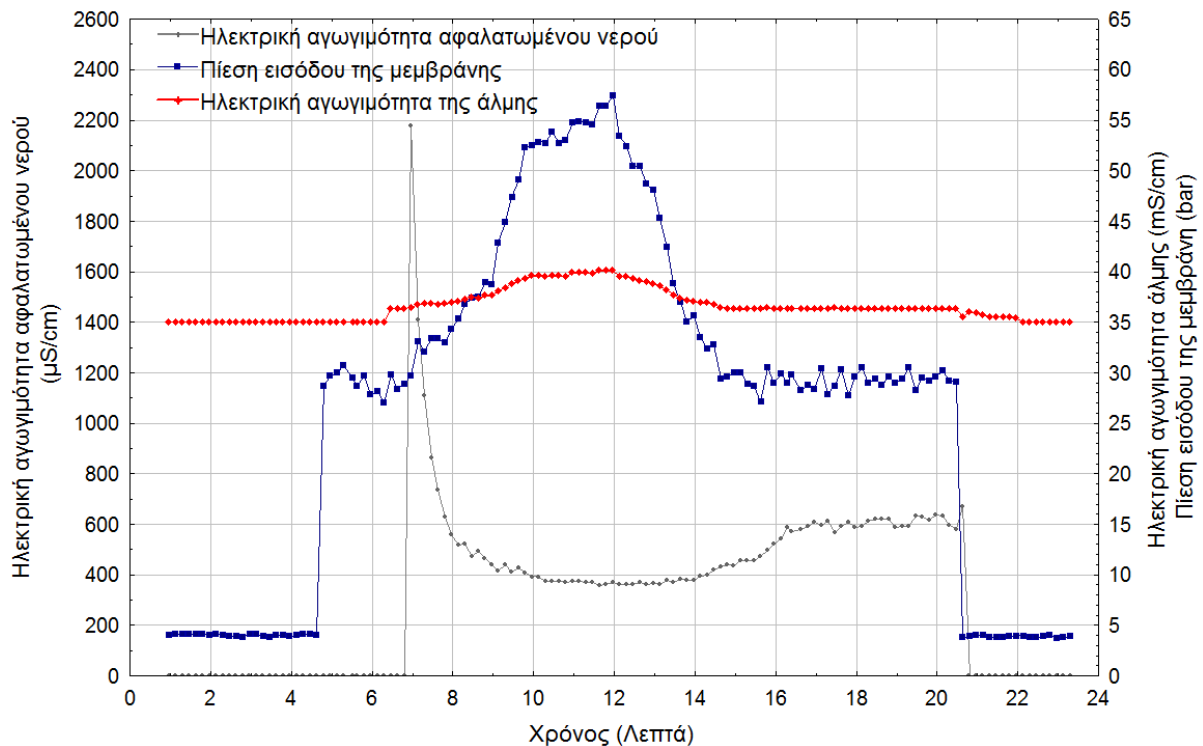




Εικόνα 3-17: Η γραμμική σχέση μεταξύ πίεσης εισόδου και η παροχή αφαλατωμένου νερού

### 3.5.2 Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού

Στην αρχή της λειτουργίας της μονάδας ΑΩ, όλη η ποσότητα του νερού τροφοδοσίας χρησιμοποιείται στην πλύση της μεμβράνης με αποτέλεσμα η άλμη να έχει την ίδια ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού τροφοδοσίας χωρίς να υπάρχει παραγωγή αφαλατωμένου νερού. Στη συνέχεια όταν αυξάνεται σταδιακά η πίεση εισόδου, η ηλεκτρική αγωγιμότητα μειώνεται από 2700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  έως 440  $\mu\text{S}/\text{cm}$  σε διάρκεια 2 λεπτών. Αντίθετα η ηλεκτρική αγωγιμότητα της άλμης αυξάνεται από 35  $\text{mS}/\text{cm}$  έως 40  $\text{mS}/\text{cm}$ , βλέπε Εικόνα 3-18.



Εικόνα 3-18: Η επίδραση της μεταβολής της πίεσης στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού

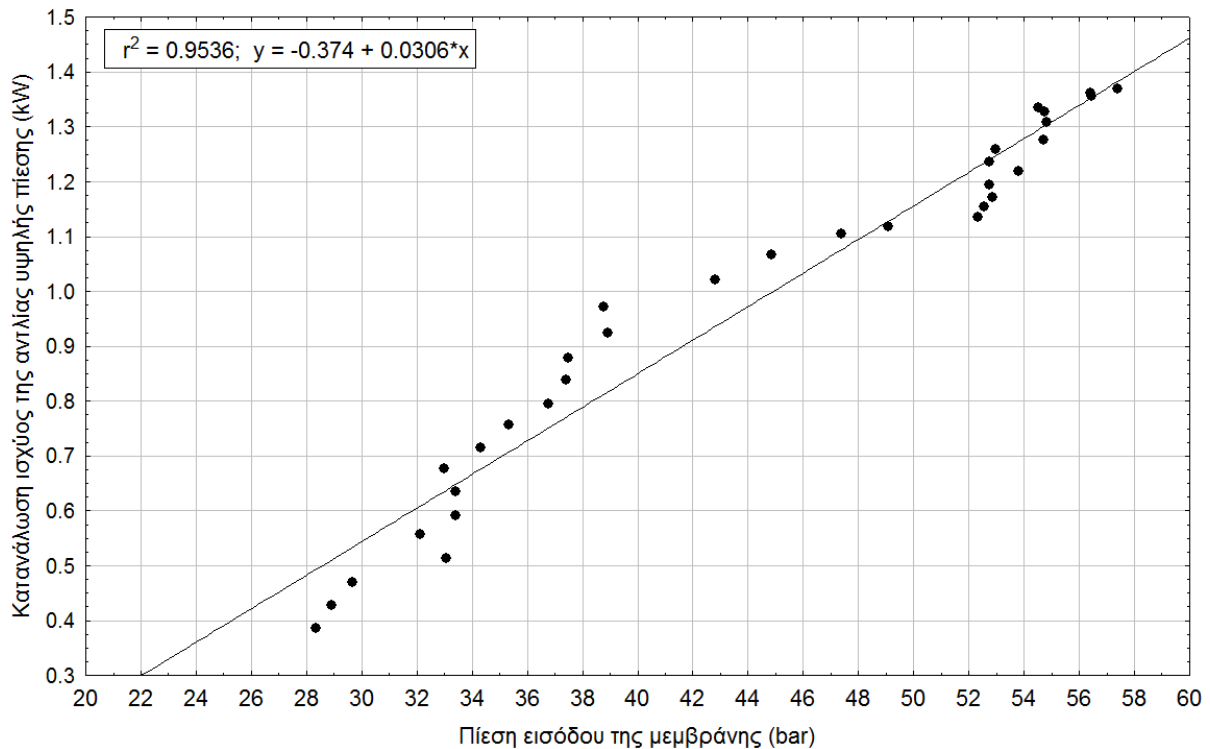
### 3.5.3 Κατανάλωση ενέργειας του συστήματος

Η κατανάλωση ισχύος της αντλίας τροφοδοσίας, ήταν σταθερή (800 W), ενώ η κατανάλωση ισχύος της αντλίας υψηλής πίεσης, μεταβάλλεται από μηδέν έως 1400 W. Άρα στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας της μεμβράνης (55 bar όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2), η συνολική κατανάλωση ισχύος, δηλαδή η κατανάλωση της αντλίας τροφοδοσίας και της αντλίας υψηλής πίεσης, υπολογίζεται απλά με το άθροισμα των δύο καταναλώσεων ( $800+1300=2100W$ ) και η αντίστοιχη παραγόμενη ποσότητα νερού ήταν 115 L/h, όπως αναφέρθηκε στην Εικόνα 3-16. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας υπολογίστηκε σε  $18.3 \text{ kWh/m}^3$ , ( $2100 \text{ Wh}/115 \text{ L/h}$ ). Η τιμή αυτή της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας είναι μία συνηθισμένη τιμή στα μικρά συμβατικά συστήματα ΑΩ όπως αναφέρουν οι *Tzen, et al.*, (1998) και είναι κοντά στην τιμή των  $16 \text{ kWh/m}^3$  που υπολογίστηκε στο στάδιο σχεδιασμού της μονάδας, Πίνακας 3-2. Η διαφορά στην κατανάλωση ενέργειας του σχεδιασμού και τις πραγματικές τιμές οφείλεται στις απώλειες ενέργειας στη μονάδα λόγω των μικρών διατομών των σωληνώσεων υψηλής πίεσης.

Στην

Εικόνα 3-19 παρουσιάζεται η γραμμική συσχέτιση της ισχύος που καταναλώνεται στην αντλία υψηλής πίεσης σε σχέση με την πίεση εισόδου της μεμβράνης. Ο συντελεστής

γραμμικής συσχέτισης που υπολογίστηκε σε 95% υποδηλώνει μία ικανοποιητική γραμμική συσχέτιση.



Εικόνα 3-19: Η γραμμική σχέση μεταξύ της πίεσης εισόδου της μεμβράνης και της ισχύος της αντλίας υψηλής πίεσης

### 3.5.4 Κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της συμβατικής μονάδας με ΑΠΕ

Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιήθηκε μελέτη σχεδιασμού ενός Φ/Β συστήματος για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της συμβατικής μονάδας ΑΩ. Ο σχεδιασμός της Φ/Β συστοιχίας, αντιστροφέα και των συσσωρευτών πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό ΟΜΗΡΟΣ. Ο ΟΜΗΡΟΣ είναι ένα πρόγραμμα βελτιστοποίησης ενεργειακών συστημάτων που απλοποιεί σε μεγάλο βαθμό το σχεδιασμό τους. Όταν σχεδιάζετε ένα ενεργειακό σύστημα, πρέπει να λαμβάνονται πολλές αποφάσεις για τη διαμόρφωση του συστήματος όπως ποια υποσυστήματα θα πρέπει να περιληφθούν και ποιο το μέγεθός τους. Ο μεγάλος αριθμός επιλογών τόσο σε τεχνολογίες όσο και στρατηγικές καθιστούν αυτές τις αποφάσεις δύσκολες. Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης και ανάλυσης ευαισθησίας του ΟΜΗΡΟΥ καθιστούν ευκολότερη την αξιολόγηση πολλών πιθανών διαμορφώσεων του συστήματος.

Για να χρησιμοποιείται ο ΟΜΗΡΟΣ, πρέπει να εισάγονται ως δεδομένα διάφορες πληροφορίες (πληροφορίες για τα φορτία, τα συστατικά, και τους πόρους). Ο ΟΜΗΡΟΣ υπολογίζει και επιδεικνύει τα αποτελέσματα σε πίνακες και γραφικές παραστάσεις.

Η χρήση του ΟΜΗΡΟΥ είναι μια επαναληπτική διαδικασία. Μπορεί κανείς να αρχίσει με τις κατά προσέγγιση εκτιμήσεις των τιμών για τις απαιτούμενες παραμέτρους, να ελέγξει τα αποτελέσματα, να καθορίσει τις εκτιμήσεις και να επαναλαμβάνει τη διαδικασία για να βρεί τις πιο λογικές τιμές για τα δεδομένα εισόδου.

Ο ΟΜΗΡΟΣ χρησιμοποιείται για να προσομοιωθεί ένα ενεργειακό σύστημα, να βελτιστοποιηθούν τις επιλογές σχεδιασμού για την οικονομική αποτελεσματικότητα ή για να εκτελεστεί μια ανάλυση ευαισθησίας στους παράγοντες όπως οι δαπάνες εγκατάστασης και κόστους των καυσίμων.

Ο ΟΜΗΡΟΣ διαμορφώνει τα τμήματα των συστημάτων, τους διαθέσιμους ενεργειακούς πόρους, και τα φορτία σε ωριαία βάση για ένα έτος. Οι ενεργειακές ροές και οι δαπάνες είναι σταθερές κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης ώρας. Ο ΟΜΗΡΟΣ μπορεί να συνθέσει τα ωριαία στοιχεία των πόρων από τους μηνιαίους μέσους όρους που εισάγονται στους πίνακες, ή μπορεί να εισάγονται τα μετρημένα πειραματικά δεδομένα από κατάλληλα μορφοποιημένα αρχεία.

Ο ΟΜΗΡΟΣ είναι πρώτιστα ένα οικονομικό πρότυπο. Μερικοί σημαντικοί τεχνικοί περιορισμοί, συμπεριλαμβανομένων των επιπέδων τάσης γραμμής, της ωριαίας απόδοσης των συστατικών, και των σύνθετων στρατηγικών λειτουργίας γεννητριών diesel είναι πέρα από το πεδίο ενός οικονομικού προσανατολισμού προγράμματος όπως ο ΟΜΗΡΟΣ. Προγράμματα όπως το Hybrid2 και το TRNSYS είναι καταλληλότερα για την αναλυτική προσομοίωση κάθε τέτοιου συστήματος παραγωγής ενέργειας.

Ο ΟΜΗΡΟΣ προσομοιώνει τη λειτουργία ενός συστήματος με τον υπολογισμό της ενεργειακής ισορροπίας για κάθε μια από τις 8.760 ώρες σε ένα έτος. Για κάθε ώρα, ΟΜΗΡΟΣ συγκρίνει την ηλεκτρική και θερμική απαίτηση στην ώρα με την ενέργεια που το σύστημα μπορεί να παρέχει σε εκείνη την ώρα, και υπολογίζει τις ροές της ενέργειας σε και από κάθε συστατικό του συστήματος. Για τα συστήματα που περιλαμβάνουν τις μπαταρίες ή τις γεννήτριες, ο ΟΜΗΡΟΣ αποφασίζει επίσης για κάθε ώρα πώς να ενεργοποιήσει τις γεννήτριες και πώς να φορτίσει είτε να εκφορτίσει τους συσσωρευτές.

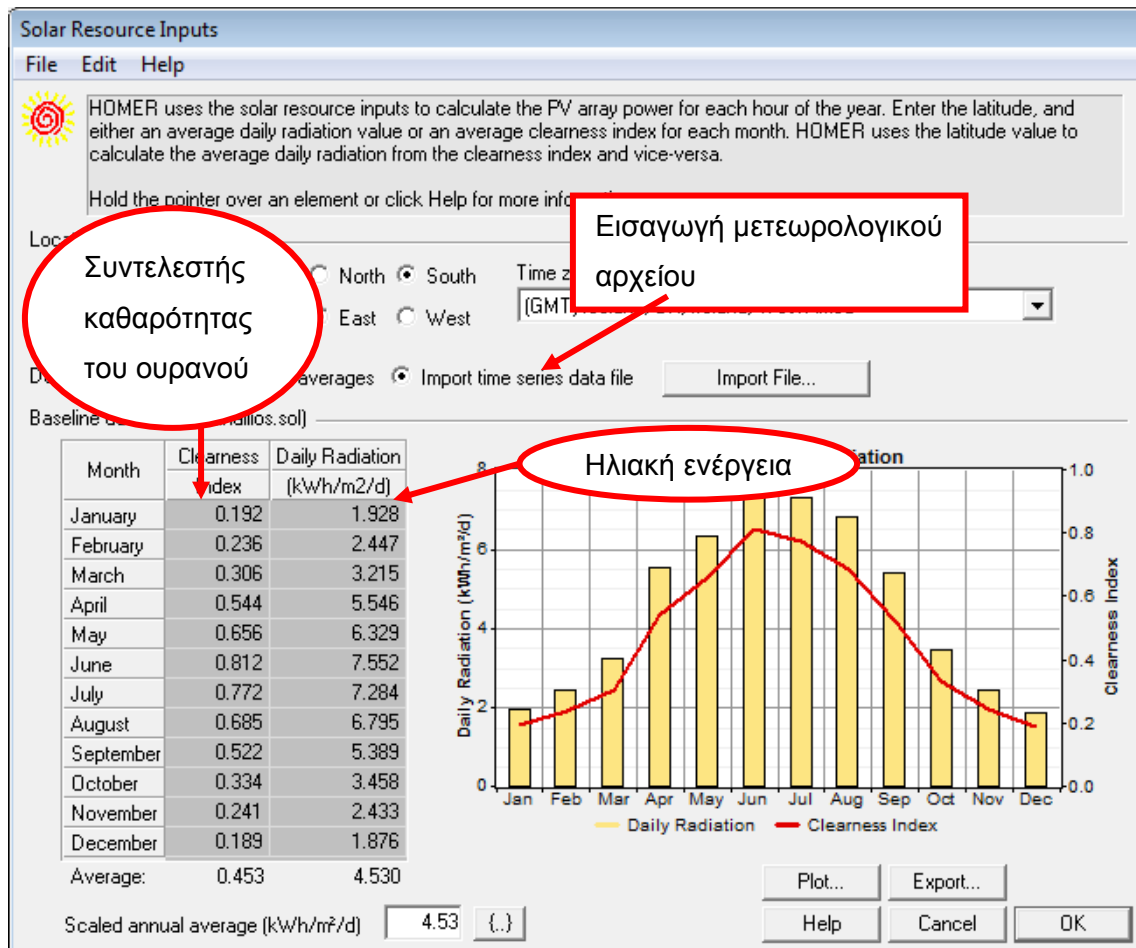
Ο ΟΜΗΡΟΣ εκτελεί αυτούς τους υπολογισμούς ενεργειακής ισορροπίας για κάθε διαμόρφωση συστημάτων που εξετάζεται. Έπειτα καθορίζει εάν μια διαμόρφωση είναι εφικτή, δηλ., εάν μπορεί να ικανοποιήσει την ηλεκτρική απαίτηση υπό τους όρους που καθορίστηκαν, και υπολογίζει το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος για τη διάρκεια ζωής του προγράμματος. Οι υπολογισμοί δαπανών περιλαμβάνουν τις δαπάνες όπως το κεφάλαιο, το κόστος αντικατάστασης, τη λειτουργία και τη συντήρηση, τα καύσιμα και τους τόκους.

Μετά από τις προσομοιώσεις όλων των πιθανών διαμορφώσεων συστημάτων, ο ΟΜΗΡΟΣ επιδεικνύει έναν κατάλογο διαμορφώσεων, που ταξινομείται κατά το καθαρό

παρόν κόστος (μερικές φορές αποκαλούμενο κόστος κύκλου της ζωής), το οποίο μπορείτε να χρησιμοποιηθεί για να συγκριθούν οι επιλογές σχεδιασμού των συστημάτων.

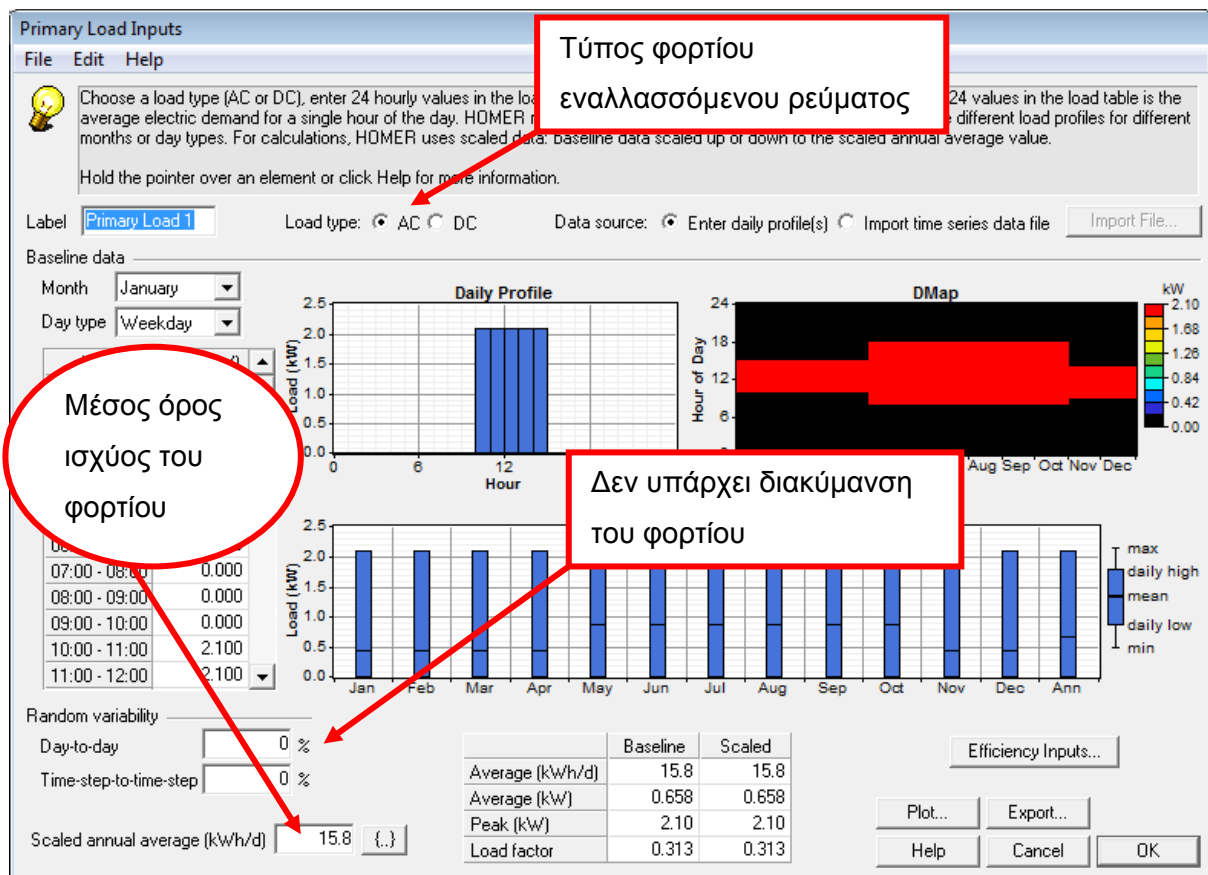
Ο σχεδιασμός ξεκινάει με την εισαγωγή των δεδομένων του ηλιακού δυναμικού της Αθήνας από το μετεωρολογικό αρχείο (Βλέπε Εικόνα 3-20).

Εικόνα 3-20



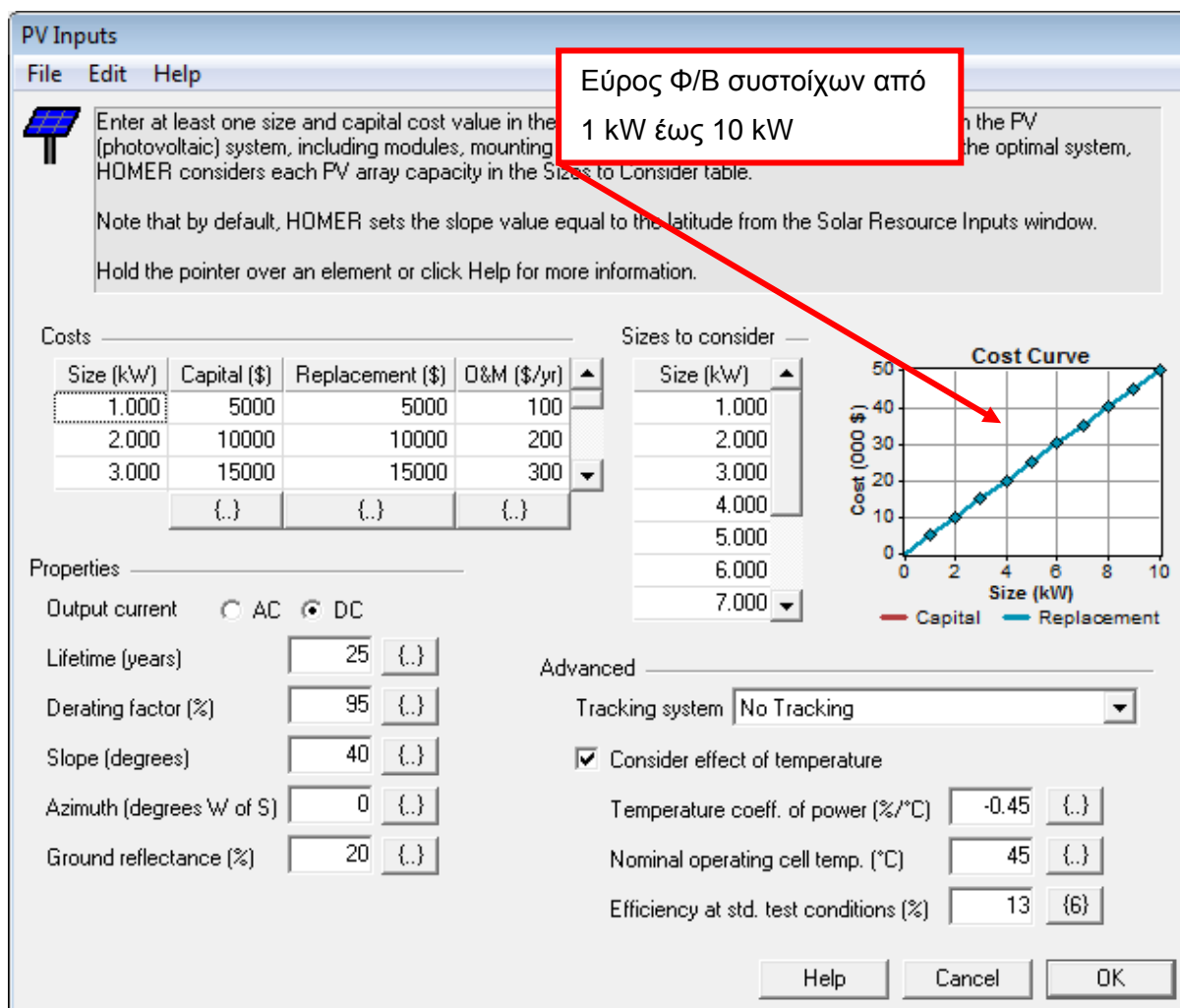
Εικόνα 3-20: Δεδομένα ηλιακού δυναμικού της Αθήνας

Εισάγονται τα δεδομένα του φορτίου, δηλαδή αν είναι συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύματος, η κατανομή του φορτίου ανά μήνα και ανά ώρα και τέλος εισάγονται δεδομένα για τη νη μερήσια και ανά ώρα διακύμανση του φορτίου (Βλέπε Εικόνα 3-21). Για το σχεδιασμό του συστήματος ΑΠΕ, υποτέθηκε ότι η μονάδα ΑΩ λειτουργεί 10 ώρες κατά τους θερινούς μήνες και 5 ώρες κατά τους χειμερινούς μήνες, με ηλεκτρικές καταναλώσεις 10,5 και 21 kWh/d αντίστοιχα.



Εικόνα 3-21: Δεδομένα του φορτίου

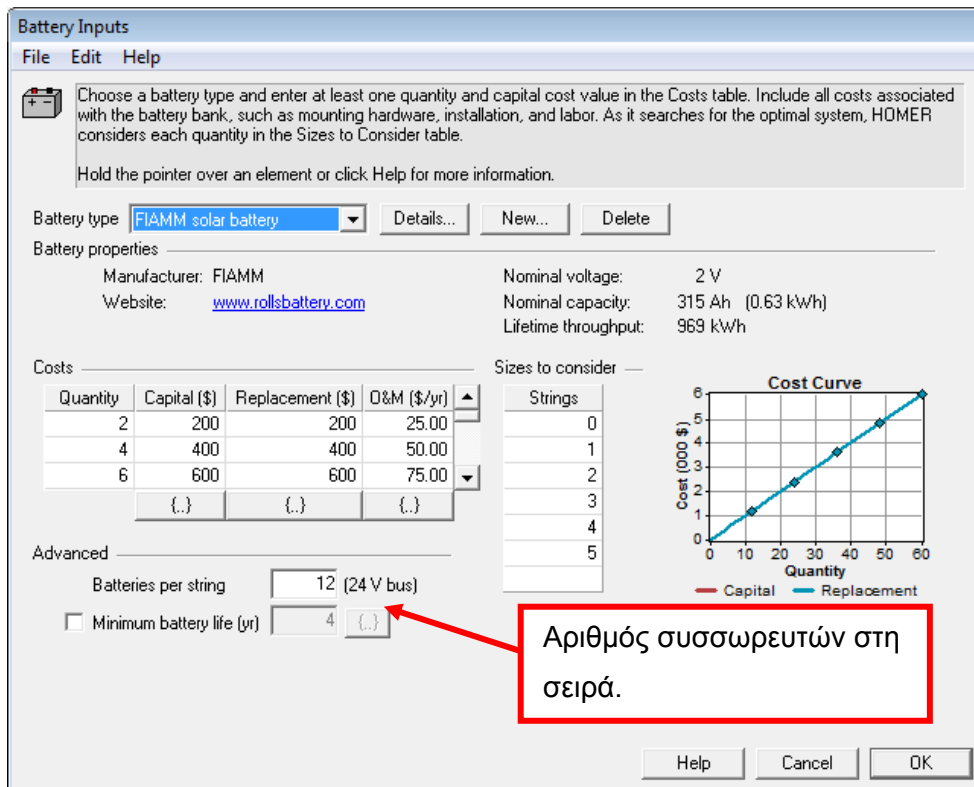
Για το σχεδιασμό των Φ/Β συστοιχιών, εισάγονται δεδομένα για το μέγεθος των Φ/Β συστοιχιών από τα οποία θα προκύπτει το βέλτιστο μέγεθος. Δηλαδή εισάγεται μεγέθη Φ/Β από 1 kW έως 10 kW και ο ΟΜΗΡΟΣ να βρει το βέλτιστο μέγεθος. Επίσης εισάγονται δεδομένα για το χρόνο ζωής των συστοιχιών, ανάκλαση του εδάφους, κλήση των Φ/Β συστοιχιών, και ο προσανατολισμός τους.



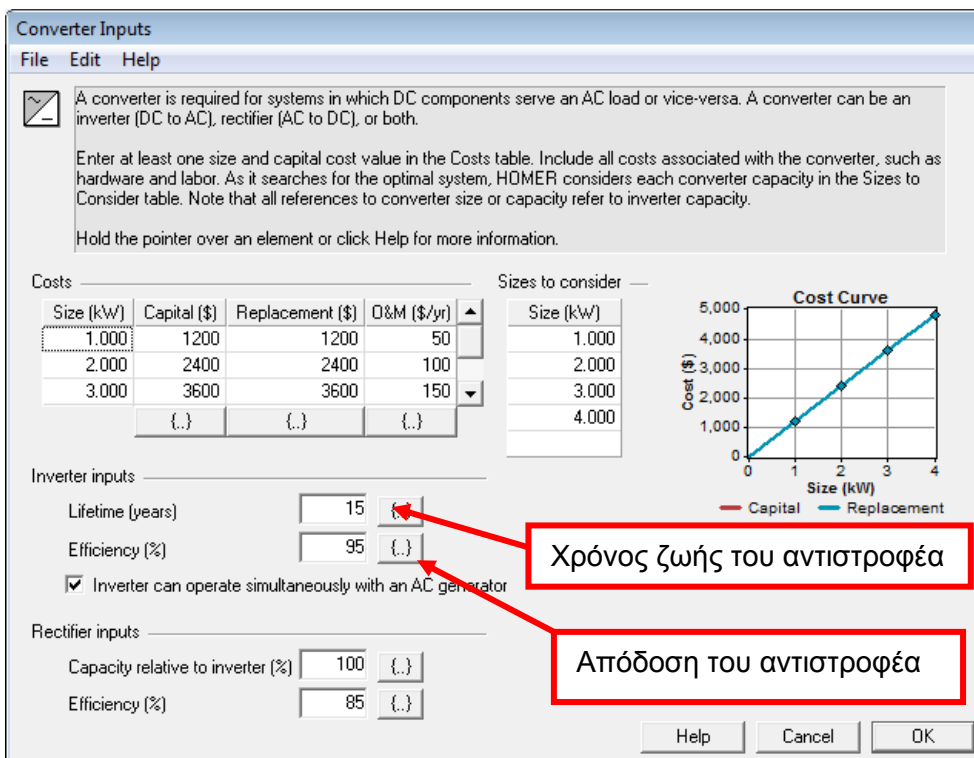
Εικόνα 3-22: Δεδομένα των Φ/Β συστοίχων

Επιλέγονται ή εισάγονται τα δεδομένα των συσσωρευτών αφού επιλέγεται πρώτα ο τύπος των συσσωρευτών από τη βάση δεδομένων του ΟΜΗΡΟΥ. Επίσης εισάγονται δεδομένα όπως ο αριθμός των συσσωρευτών στη σειρά, το εύρος των μεγεθών των συσσωρευτών και τα ανάλογα κόστη τους (βλέπε Εικόνα 3-23).

Εισάγονται τα δεδομένα του αντιστροφέα, όπως ο χρόνος ζωής, ο βαθμός απόδοσης και το εύρος της ισχύος του αντιστροφέα και τα ανάλογα κόστη. (βλέπε Εικόνα 3-24).



Εικόνα 3-23: Δεδομένα των συσσωρευτών

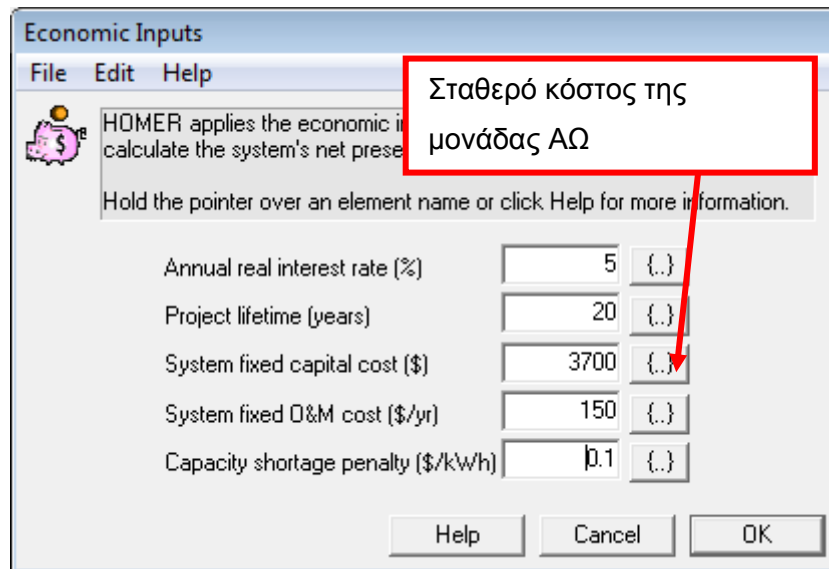


Εικόνα 3-24: Δεδομένα του αντιστροφέα



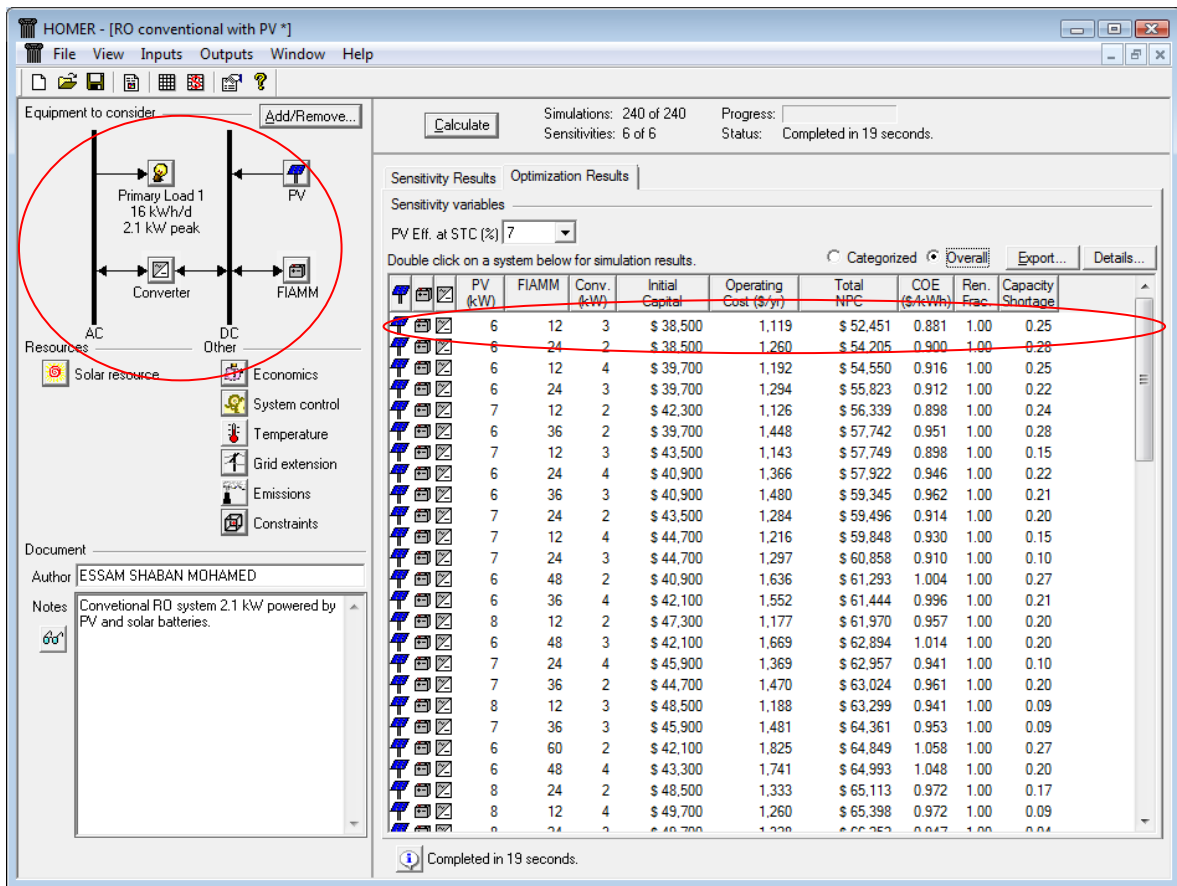
Εισάγονται κάποια γενικά οικονομικά δεδομένα όπως τον επιτόκιο, οικονομικό χρόνο ζωής του συνολικού συστήματος, το σταθερό κόστος της μονάδας ΑΩ και το κόστος συντήρησης και λειτουργίας της μονάδα ΑΩ. Αυτά τα οικονομικά δεδομένα σχέση με το φορτίο, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η μονάδα ΑΩ (βλέπε Εικόνα 3-25).

Εικόνα 3-25



Εικόνα 3-25: Γενικά οικονομικά δεδομένα

Σε αυτό το στάδιο ο ΟΜΗΡΟΣ είναι έτοιμος να προτείνει το βέλτιστο τεχνικά και οικονομικά Φ/Β σύστημα. Φαίνεται στην Εικόνα 3-26 ότι το βέλτιστο σύστημα εμφανίζεται στην αρχή των προτεινόμενων συστημάτων.



Εικόνα 3-26: Τα αποτελέσματα σχεδιασμού του ΟΜΗΡΟΥ

Το προτεινόμενο Φ/Β σύστημα για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της συμβατικής μονάδας ΑΩ έχει τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στον πίνακα 3-6.

Πίνακας 3-6: Σύνοψη των αποτελεσμάτων σχεδιασμού της Φ/Β συστοιχίας για τη συμβατική μονάδα ΑΩ

|  |                           |
|--|---------------------------|
| Μέγεθος της Φ/Β συστοιχίας   | 6 kW                      |
| Αριθμός συσσωρευτών στη σειρά  | 12 συσσωρευτές 24V/315 Ah |
| Ισχύ αντιστροφέα   | 3 kW                      |
| Αρχικό κόστος αγοράς και εγκατάστασης                                  | 38500 €                   |
| Κόστος παραγωγής της ενέργειας   | 0.881 €/kWh               |
| Ετήσιο ισοδύναμο κόστος  | 4209 €/yr                 |
| Κόστος του αφαλατωμένου νερού<br>(για παραγωγή 190 m <sup>3</sup> /yr) | 22 €/m <sup>3</sup>       |

### 3.6 Σχεδιασμός της τροποποιημένης μονάδας ΑΩ

Όπως συμπεραίνεται από το σχεδιασμό και την πειραματική διερεύνηση της συμβατικής μονάδας ότι η ειδική κατανάλωση ενέργειας βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα (18 kWh/m<sup>3</sup>) με αποτέλεσμα να αυξηθούν οι απαιτήσεις σε εγκαταστημένη ισχύς της Φ/Β συστοιχίας. Η συμβατότητα της μονάδας ΑΩ για σύνδεση με ΑΠΕ προϋποθέτει κάποιες μετατροπές στην μονάδα με στόχο:

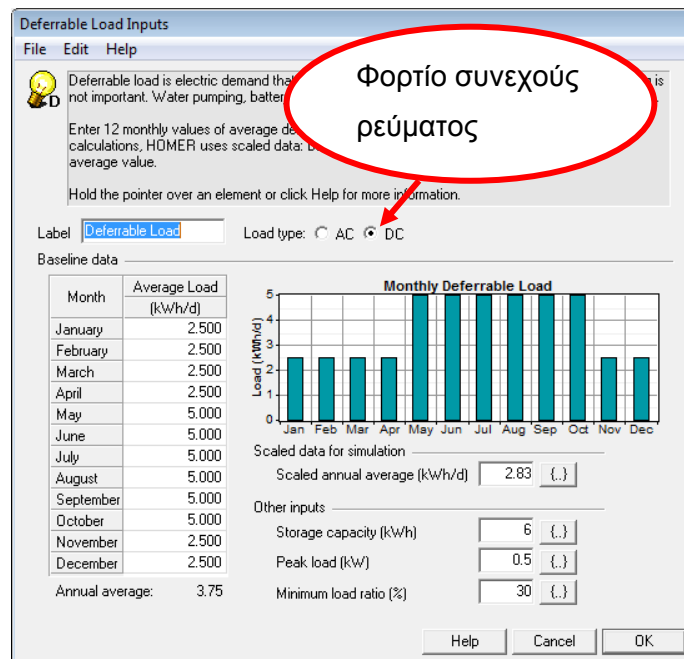
- Μείωση της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας
- Μείωση του κόστους του νερού
- Μείωση της εγκαταστημένης ισχύος της Φ/Β συστοιχίας
- Αύξηση του ποσοστού ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού
- Μείωση του αρχικού κόστους αγοράς και εγκατάστασης
- Η δυνατότητα χρήσης του συνεχές ρεύματος
- Η δυνατότητα της απευθείας σύνδεσης της μονάδας ΑΩ με τη Φ/Β συστοιχία
- Η απαλλαγή από τον αντιστροφέα
- Η δυνατότητα μελέτης της μονάδας ΑΩ σε μεταβλητές συνθήκες

Για να επιτευχθεί η συμβατότητα της μονάδας ΑΩ για σύνδεση με ΑΠΕ προτάθηκαν οι εξής μετατροπές στην μονάδα ΑΩ:

- Πρόσθεση μία δεύτερη μεμβράνη ΑΩ συνδεδεμένη στη σειρά καθώς και μία μεμβρανοθήκη υψηλής πίεσης, με στόχο την αύξηση του ποσοστού ανάκτησης.
- Εγκατάσταση ανακτητή υδραυλικής ενέργειας τύπου Clark rump, με στόχο τη μείωση της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας.
- Εγκατάσταση μικρής αντλίας τροφοδοσίας θετικής μετατόπισης περιστροφική με σύρτες απαραίτητη για τη μεταφορά του θαλασσινού νερού προς την αντλία Clark. Επίσης επιλέχτηκε ένας ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος με στόχο την μελλοντική σύνδεσή του με ηλιακούς συσσωρευτές καθώς και την απευθείας σύνδεσή του με τις Φ/Β συστοιχίες.

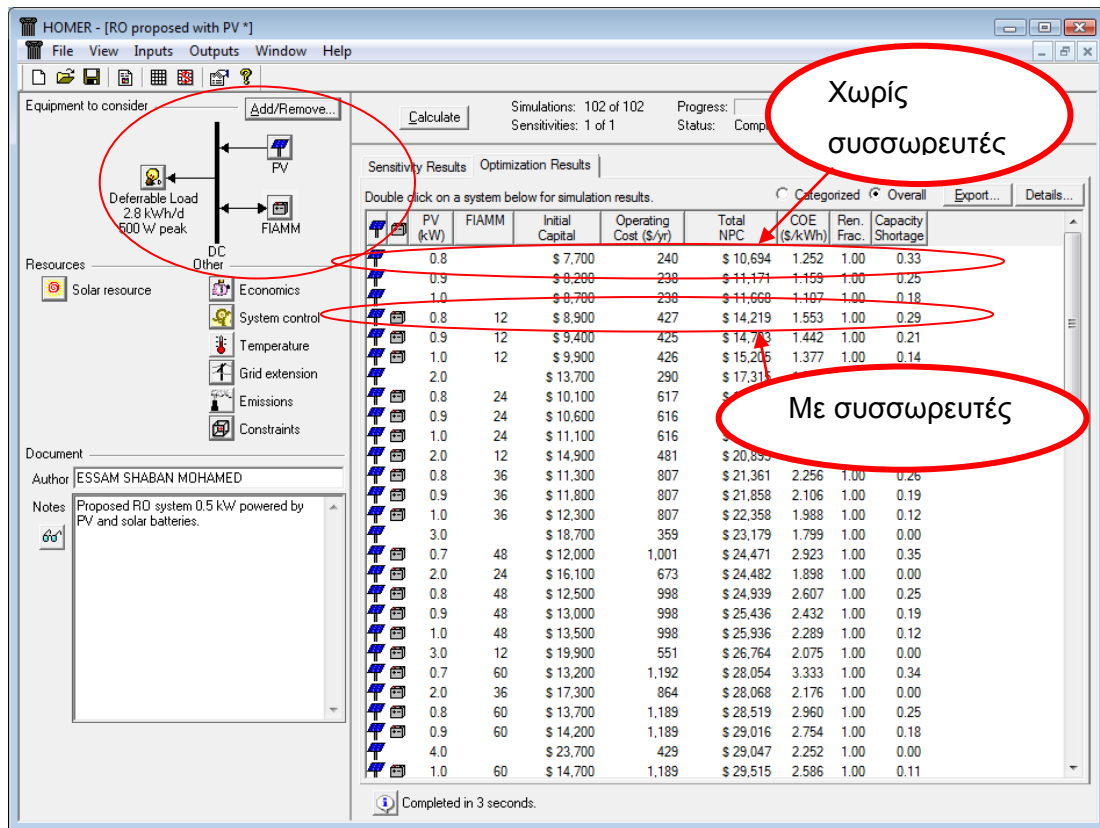
### 3.6.1 Σχεδιασμός της Φ/Β συστοιχίας

Ακολουθώντας τα ίδια βήματα σχεδιασμού με τον ΟΜΗΡΟ αλλάζοντας μόνο την ισχύ του κινητήρα (510 W είναι η απαιτούμενη ισχύς για τη λειτουργία της αντλίας τροφοδοσίας δηλαδή με την εφαρμογή της εξίσωσης 2-4 για τον υπολογισμό της ισχύος του κινητήρα) και τον τύπο σύνδεσης από εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα (βλέπε Εικόνα 3-27).



Εικόνα 3-27: Δεδομένα φορτίο ΣΡ

Τα αποτελέσματα του σχεδιασμού φαίνονται στην Εικόνα 3-28 όπου παρατηρείται ότι μια Φ/Β συστοιχία 800 W και 12 ηλιακούς συσσωρευτές 315Ah/24 V, μπορούν να καλύπτουν τις ενεργειακές απαιτήσεις του προτεινόμενου συστήματος.



Εικόνα 3-28: Αποτελέσματα σχεδιασμού της τροποποιημένης μονάδας ΑΩ

Παρατηρείται στην Εικόνα 3-28 επίσης ότι ο ΟΜΗΡΟΣ πρότεινε ένα σύστημα μόνο με Φ/Β συστοιχία. Η σύνοψη των αποτελεσμάτων αυτών και η σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα της συμβατικής μονάδα παρουσιάζονται στον πίνακα 3-7.

Πίνακας 3-7: Σύνοψη των αποτελεσμάτων σχεδιασμού με ΟΜΗΡΟ για την προτεινόμενη μονάδα ΑΩ

|  | Συμβατική μονάδα  | Τροποποιημένη μονάδα με απευθείας σύνδεση                   | Τροποποιημένη μονάδα με συσσωρευτές                        |
|--|---|---|--|
| Μέγεθος της Φ/Β συστοιχίας                           | 6 kW  | 0.8 kW  | 0.8 kW   |
| Αριθμός συσσωρευτών στη σειρά συσσωρευτές 24V/315 Ah | 12  | 0   | 12   |
| Ισχύς αντιστροφέα                                    | 3 kW  | 0   | 0  |
| Αρχικό κόστος αγοράς και εγκατάστασης                | 38500 €   | 7700 €  | 8900 €   |
| Κόστος παραγωγής της ενέργειας                       | 0.881 €/kWh   | 1.25 €/kWh  | 1.55 €/kWh   |
| Ετήσιο ισοδύναμο κόστος                              | 4209 €/yr   | 858 €/yr  | 1141 €/yr  |
| Κόστος του αφαλατωμένου νερού                        | 22 €/m <sup>3</sup> (για παραγωγή 190 m <sup>3</sup> /yr) | 3.53 €/m <sup>3</sup> (για παραγωγή 243 m <sup>3</sup> /yr) | 3.7 €/m <sup>3</sup> (για παραγωγή 243 m <sup>3</sup> /yr) |

Στην πρόχειρη οικονομική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε παράλληλα με το σχεδιασμό στον ΟΜΗΡΟ, δεν έχουν συμπεριληφθεί ετήσια εργατικά κόστη, ενοικίασης της γης και κόστος χημικών για τη μονάδα αφαλάτωσης. η αναλυτική οικονομική ανάλυση θα πραγματοποιηθεί αργότερα στο κεφάλαιο 5.

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3-7 παρατηρούνται τα εξής:

- Μειώθηκε η εγκαταστημένη ισχύς της Φ/Β συστοιχίας από 6 σε 0.8 kW (μείωση κατά 86%), αυτό οφείλεται κυρίως στην ανάκτηση της υδραυλικής ενέργειας της άλμης με την αντλία Clark καθώς και στην αύξηση της παραγωγής του αφαλατωμένου νερού εξαιτίας της προσθήκης νέας μεμβράνης (από 190 m<sup>3</sup>/yr έως 243 m<sup>3</sup>/yr).
- Η χρήση κινητήρα συνεχούς ρεύματος είχε ως αποτέλεσμα να μην χρησιμοποιείται αντιστροφέας.
- Μείωση κατά περίπου 75% στο αρχικό και στο ετήσιο ισοδύναμο κόστος.
- Μειώθηκε κατά 80% το κόστος παραγωγής του νερού ως αποτέλεσμα της μείωσης του αρχικού και ετήσιου κόστους καθώς και λόγω της αύξησης της παραγόμενης ποσότητας αφυδατωμένου νερού.

Ως αποτέλεσμα των θετικών συμπερασμάτων του σχεδιασμού της τροποποιημένης μονάδας, εγκαταστάθηκε και τροποποιήθηκε η συμβατική μονάδα όπως προαναφέρθηκε στο σχεδιασμό. Επίσης εγκαταστάθηκε μια ανεμογεννήτρια για την μελέτη τη δυνατότητας του υβριδικού σχεδιασμού. Παρακάτω περιγράφεται η τροποποιημένη μονάδα ΑΩ, η Φ/Β συστοιχία και η συστοιχία των ηλιακών συσσωρευτών, όπως αναφέρει ο *Mohamed, et al.*, (2005).

### 3.6.2 Περιγραφή του πρωτότυπου τροποποιημένου συστήματος

#### 3.6.2.1 Η Φ/Β συστοιχία , συσσωρευτές και ο ρυθμιστής φόρτισης

Το φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από 18 Φ/Β πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου Arco-solar, με συνολική ονομαστική ισχύς αιχμής 846 W<sub>p</sub> (βλέπε. Εικόνα 3-29<sup>Α</sup>). Δύο Φ/Β πλαίσια είναι συνδεδεμένα στη σειρά για να επιτευχθεί κατάλληλη τάση φόρτισης και εννιά είναι συνδεδεμένα παράλληλα για να επιτευχθεί το επιθυμητό ρεύμα. Η παραγόμενη ισχύς σε μορφή συνεχούς ρεύματος και τάσης, μεταφέρεται μέσω του ρυθμιστή φόρτισης (βλέπε. Εικόνα 3-29B) στους ηλιακούς συσσωρευτές (Εικόνα 3-29Δ) μολύβδου οξέος ανοιχτού τύπου. Ο ρυθμιστής φόρτισης λειτουργεί και ως ελεγκτής φορτίου που συνδέει το κινητήρα με τους συσσωρευτές όταν η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών φτάνει το ανώτερο όριο (90%) που ρυθμίζεται από τον χρήστη και διακόπτει την λειτουργία του κινητήρα όταν η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών φτάνει το κατώτερο ρυθμιζόμενο όριο (30%). Επιπλέον το σύστημα περιλαμβάνει ένα μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, με την εμπορική ονομασία (Linear Current Booster, LCB) ο οποίος είναι ένας μετατροπέας ΣΡ/ΣΡ που μειώνει την τάση εξόδου και αυξάνει το ρεύμα για να ξεκινήσει πρώιμα ο κινητήρας σε συνθήκες χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας και να σταματήσει όψιμα σε συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας κατά τη δύση του ηλίου (βλέπε Εικόνα 3-29Γ. Για παράδειγμα όταν η Φ/Β συστοιχία παράγει τάση 30 V /3 A στην αρχή της ημέρας, και η ελάχιστη τάση του κινητήρα για να αρχίσει να περιστρέφεται είναι 15 V, τότε εφαρμόζοντας τις εξισώσεις 3-1 και 3-2 για να υπολογιστεί το κέρδος από πλευράς ισχύος και ρεύματος.

$$P_{ex} = (V_{pv} - V_{bat}) \times I_{pv} \times 0.85 \quad 3-1$$

$$I_{ex} = \frac{P_{ex}}{V_{bat}} \quad 3-2$$

$$P_{ex} = (30 - 15) \times 3 \times 0.85 = 38.25 \text{ W}$$

$$I_{ex} = \frac{38.25}{15} = 2.55 \text{ A}$$

Όπου  $P_{ex}$  είναι το ενεργειακό κέρδος [W],  $V_{pv}$  τάση της Φ/Β συστοιχίας [V],  $V_{bat}$  τάση του συσσωρευτή [V],  $I_{ex}$  είναι ο κέρδος στο ρεύμα εξόδου του μετατροπέα [A] και  $I_{pv}$  το ρεύμα της Φ/Β συστοιχίας [A]. σημειώνεται ότι η απόδοση του μετατροπέα είναι 85%.

Άρα το συνολικό ρεύμα που θα τροφοδοτήσει το κινητήρα είναι 5.55 A (3+2.55) και όχι 3 A που παράγεται από τη Φ/Β συστοιχία, έτσι θα μπορούσε ο κινητήρας να περιστρέφεται αργά ίσως για να καλύπτει τις ανάγκες της μονάδας ΑΩ σε πλύση των μεμβρανών με καθαρό αφραλατωμένο νερό, μια διεργασία που χρειάζεται ελάχιστη ενέργεια της τάξης του 50 W.



A



B



Γ



Δ

Εικόνα 3-29: (A) Τα φ/Β πλαίσια, (B) Ο ρυθμιστής φόρτισης (Γ) Ο μετατροπέας υποβιβασμού και (Δ) Ο ηλιακός συσσωρευτής

Τα τεχνικά στοιχεία του Φ/Β συστήματος φαίνονται στον πίνακα 3-8.



Πίνακας 3-8: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Φ/Β πλαισίου, του ρυθμιστή φόρτισης, του μετατροπέα υποβιβασμού και των συσσωρευτών

| <b>Φωτοβολταϊκά πλαίσια</b>          | Arco Solar        | <b>Ρυθμιστή φόρτισης</b>     | Steca Tarom 235  |
|--------------------------------------|-------------------|------------------------------|------------------|
| Ονομαστική ισχύς                     | 47 W <sub>p</sub> | Τάση συστήματος              | 24 V             |
| Ρεύμα μέγιστης ισχύος                | 3.3 A             | Ονομαστικό ρεύμα             | 35 A             |
| Τάση σημείου μέγιστης ισχύς          | 14.2 V            | Μέγιστο ρεύμα                | 45 A             |
| Ρεύμα βραχυκύκλωσης                  | 3.9 A             |                              | FIAMM TMHD 425/3 |
| Τάση ανοιχτού κυκλώματος             | 22 V              | <b>Συσσωρευτές</b>           |                  |
| Αριθμός πλαισίων παράλληλα           | 9                 | Χωρητικότητα                 | 315 Ah           |
| Αριθμός πλαισίων σε σειρά            | 2                 | Τάση ενός στοιχείου          | 2 V              |
| <b>Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης</b> | LCB-20            | Αριθμός στοιχείων σε σειρά   | 12               |
| Ρεύμα εισόδου                        | 20 A              | Αριθμός παράλληλων στοιχείων | 1                |
| Μέγιστη τάση εισόδου                 | 50 V              |                              |                  |
| Μέγιστο ρεύμα εξόδου                 | 45 A              |                              |                  |
| Τάση εξόδου                          | 12 - 36 V         |                              |                  |

### 3.6.2.2 Το σύστημα της ανεμογεννήτριας

Η ανεμογεννήτρια αποτελείται, (Βλέπε.

Εικόνα 3-30 Α), από τον πύργο στήριξης ύψους 6 m ο οποίος είναι τοποθετημένος πάνω στην οροφή το κτιρίου ύψους 4 m. Η γεννήτρια είναι μία τριφασική γεννήτρια εναλλασσομένου ρεύματος μεταβλητής συχνότητας και τάσης. Η γεννήτρια λειτουργεί χωρίς ψήκτρες και είναι μονίμου μαγνήτη. Η τριφασική ισχύς μεταφέρεται και μετατρέπεται σε συνεχούς ρεύματος μέσω του ανορθωτή / ρυθμιστή φόρτισης, (Βλ.

Εικόνα 3-30 Β). Ο ανορθωτής μετατρέπει την τριφασική ισχύ σε συνεχές και ο ρυθμιστής φόρτισης προστατεύει και ρυθμίζει τη φόρτιση των συσσωρευτών παράλληλα με το ρυθμιστή φόρτισης της Φ/Β συστοιχίας. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας και του ανορθωτή / ρυθμιστή φόρτισης φαίνονται στον πίνακα 3-9.

Πίνακας 3-9: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας

|                              |                 |
|------------------------------|-----------------|
| Τύπος                        | WHISPER H80     |
| Διάμετρος δρομέα             | 3 m             |
| Ύψος ιστού                   | 6 m             |
| Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας | 3.5 m/s         |
| Ονομαστική ισχύς             | 1000 W – 10 m/s |



A



B

Εικόνα 3-30: Η ανεμογεννήτρια και ο ανορθωτής - ρυθμιστής φόρτισης

### 3.6.2.3 Η τροποποιημένη μονάδα αφαλάτωσης

Οι μετατροπές στη μονάδα αφαλάτωσης έγιναν με σκοπό την μείωση της εγκαταστημένης ισχύος, την μείωση της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας και την μετατροπή του συστήματος από εναλλασσόμενο (ΕΡ) σε συνεχές ρεύμα (ΣΡ). Μια τέτοια μονάδα αφαλάτωσης θα είναι συμβατή για απευθείας σύνδεση με τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι μετατροπές ήταν ως εξής:

- Προσθήκη μεμβράνης ΑΩ και μεμβρανοθήκης στη σειρά με την πρώτη με σκοπό την αύξηση του ποσοστού ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού .
- Κατάργηση των κινητήρων ΕΡ και των αντλιών τροφοδοσίας και υψηλής πίεσης.
- Προσθήκη κινητήρα συνεχούς ρεύματος 510 W και περιστροφική αντλία θετικής μετατόπισης, (Βλέπε. Εικόνα 3-31 Α).
- Προσθήκη ανακτητή υδραυλικής ενέργειας της άλμης τύπου εναλλάκτη πίεσεως (Βλέπε. Εικόνα 3-31 Β).

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας, του κινητήρα και του ανακτητή ενέργειας παρουσιάζονται στον πίνακα 3-10.



A



B

Εικόνα 3-31: Ο κινητήρας με την περιστροφική αντλία (A) και η αντλία Clark (B)

Πίνακας 3-10: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, περιστροφικής αντλίας και του ανακτητή

|                                    |                      |                               |                        |
|------------------------------------|----------------------|-------------------------------|------------------------|
| <b>Κινητήρας συνεχούς ρεύματος</b> | Drive systems LV74.9 | <b>Ανακτητή ενέργειας</b>     | Eco systems E – 25/590 |
| Ονομαστική ισχύς                   | 510 W                | Ονομαστική παροχή τροφοδοσίας | 760 L/h                |
| Τάση λειτουργίας                   | 24 V                 | Ονομαστική παραγωγή νερού     | 90 L/h                 |
| Μέγιστο ρεύμα                      | 25 A                 | Ονομαστική πίεση λειτουργίας  | 50 bar                 |
| Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής    | 1500 rpm             | Ονομαστική πίεση τροφοδοσίας  | 12 bar                 |
| <b>Περιστροφική αντλία</b>         | Fluid-o-tech PO700   |                               |                        |
| Μέγιστη πίεση                      | 16 bar               |                               |                        |
| Παροχή σε 1450 rpm                 | 800 L/h              |                               |                        |

#### 3.6.2.4 Τα πρόσθετα όργανα μέτρησης της τροποποιημένης μονάδας

Τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά είναι ως εξής:

##### Ο μετεωρολογικός σταθμός

Είναι ένας μετεωρολογικός σταθμός (Βλέπε Εικόνα 3-32) τοποθετημένος στο ύψος της ανεμογεννήτριας (6 m) και αποτελείται από τα εξής όργανα:

##### Ανεμόμετρο

Ανεμόμετρο για την μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου (βλέπε τον πίνακα 3-11)



Εικόνα 3-32: Αισθητήρια για τη μέτρηση μετεωρολογικών μεγεθών (Α) – Πυρανόμετρο για μέτρηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας

Πίνακας 3-11: Τεχνικά χαρακτηριστικά του ανεμόμετρου

|                  |  |
|------------------|--|
| Τύπου ανεμόμετρο | Vector Instruments Low power A100L2 anemometer |
| Περιοχή μέτρησης | 0 – 78 m/s                                     |
| Σήμα εξόδου      | 0 – 2.5 V single ended                         |
| Ακρίβεια         | ±1% (1 -57 m/s) and 2% (57 – 78 m/s)           |

#### Ανεμοδείκτης

Ανεμοδείκτης για την μέτρηση της κατεύθυνσης του ανέμου, βλέπε τον πίνακα 3-12.

Πίνακας 3-12: Τεχνικά χαρακτηριστικά του ανεμοδείκτη

|                   |  |
|-------------------|--|
| Τύπου Ανεμοδείκτη | NRG Systems 200 series wind direction sensor |
| Περιοχή μέτρησης  | 0 – 360°                                     |
| Σήμα εξόδου       | 0 – 360 mV                                   |
| Γραμμικότητα      | ±1%  |

#### Θερμόμετρο- Υγρασιόμετρο

Θερμόμετρο για την μέτρηση της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας και υγρασιόμετρο για τη μέτρηση της ατμοσφαιρικής υγρασίας, βλέπε τον πίνακα 3-13.

Πίνακας 3-13: Τεχνικά χαρακτηριστικά του θερμομέτρου - υγρασιόμετρου

| Τύπου                          | GREISINGER Humidity / Temperature Meas. Device |
|--------------------------------|--|
| Περιοχή μέτρησης (Temperature) | -30 – 120°C                                    |
| Περιοχή μέτρησης (Humidity)    | 0 – 100%                                       |
| Σήμα εξόδου                    | 4 -20mA  |
| Ακρίβεια                       | ±2%  |

#### Πυρανόμετρο

Πυρανόμετρο για τη μέτρηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στη κλήση των Φ/Β πλαισίων, βλέπε τον πίνακα 3-14.

Πίνακας 3-14: Τεχνικά χαρακτηριστικά του πυρανομέτρου

|                         |                           |
|-------------------------|---------------------------|
| Τύπου Ανεμοδείκτη       | EPPLEY PSP                |
| Περιοχή μέτρησης        | 0 – 1200 W/m <sup>2</sup> |
| Συντελεστής ευαισθησίας | 130 W/m <sup>2</sup> /mV  |

#### **Ο μεταδότης πίεσης**

Υπάρχουν τρεις μεταδότες πίεσης (Εικόνα 3-33Α). Ένα στην έξοδο της αντλίας τροφοδοσίας (βλέπε τον πίνακα 3-15)

Πίνακας 3-15: Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη της πίεσης στην κατάθλιψη της αντλίας τροφοδοσίας

|                  |                   |
|------------------|-------------------|
| Τύπου            | WIKA Eco - Tronic |
| Περιοχή μέτρησης | 0 – 17 bar        |
| Σήμα εξόδου      | 4 -20mA           |
| Ακρίβεια         | <1%               |

Δύο στην είσοδο της μεμβράνης ΑΩ και στην είσοδο της μονάδας ανάκτησης της υδραυλικής ενέργειας (Clark Pump). (βλέπε τον πίνακα 3-16)

Πίνακας 3-16: Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη της υψηλής πίεσης

|                  |                   |
|------------------|-------------------|
| Τύπου            | WIKA Eco - Tronic |
| Περιοχή μέτρησης | 0 – 100 bar       |
| Σήμα εξόδου      | 4 -20mA           |
| Ακρίβεια         | <1%               |

#### **Ο μεταδότης παροχής**

Για τη μέτρηση της παροχής του αφαλατουμένου νερού (βλέπε Εικόνα 3-33 Β) και (βλέπε τον πίνακα 3-17)

Πίνακας 3-17: Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη παροχής αφαλατωμένου νερού

|                  |                        |
|------------------|------------------------|
| Τύπου            | GREISINGER FHKK - PVDF |
| Περιοχή μέτρησης | 0.03 – 5 L/min         |
| Σήμα εξόδου      | Παλμούς NPN            |
| Ακρίβεια         | ±2%                    |

Για τη μέτρηση της παροχής της άλμης (βλέπε Εικόνα 3-33 Γ) και (βλέπε τον πίνακα 3.18)

Πίνακας 3-18: Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη παροχής της άλμης

|                  |              |
|------------------|--------------|
| Τύπου            | SIKA VTH     |
| Περιοχή μέτρησης | 2 – 40 L/min |
| Σήμα εξόδου      | Παλμούς NPN  |
| Ακρίβεια         | ±1%          |

### Μεταδότες ηλεκτρικής αγωγιμότητας

Για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του αφαλατωμένου νερού και της άλμης, χρησιμοποιούνται μεταδότες ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού είναι συνάρτηση των ολικών διαλυμένων αλάτων στο νερό.

Για το παραγόμενο νερό (βλέπε Εικόνα 3-33 Δ) και (βλέπε τον πίνακα 3-19)

Πίνακας 3-19: Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του αφαλατωμένου νερού

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

Για την άλμη (βλέπε Εικόνα 3-33 Ε) και (βλέπε τον πίνακα 3-20)

Πίνακας 3-20: Τεχνικά χαρακτηριστικά του μεταδότη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας της άλμης

|                  |                 |
|------------------|-----------------|
| Τύπου            | HANNA HI 8931A  |
| Περιοχή μέτρησης | 0 – 199.9 mS/cm |
| Σήμα εξόδου      | 4 – 20 mA       |
| Ακρίβεια         | ±2%             |

### Αναλογικός μετρητής στροφών

Για την μέτρηση των στροφών του κινητήρα χρησιμοποιήθηκε ο μεταδότης που φαίνεται στην (Εικόνα 3-33 Η). Όλα τα μετρούμενα μεγέθη καταγράφονται από ψηφιακό

σύστημα συλλογής δεδομένων που συνδέεται με υπολογιστή για την τελική αποθήκευση των δεδομένων. Το σύστημα συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε ήταν το CR10X της Campbell SCIENTIFIC.



A



B



Γ



Δ



E



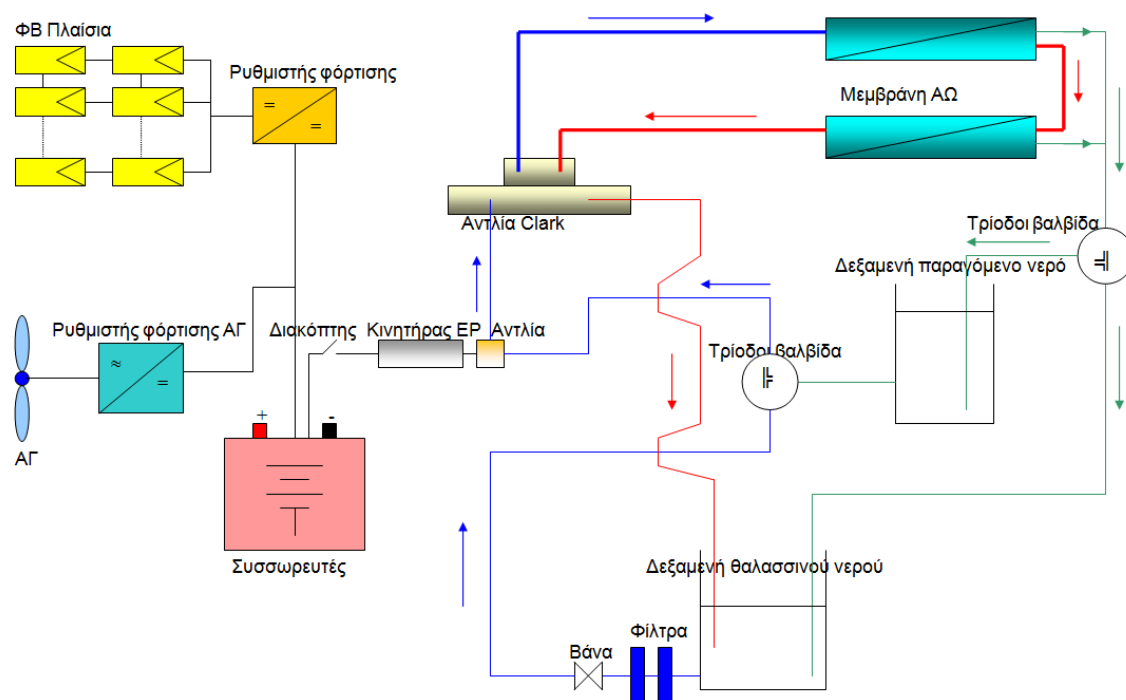
Η

Εικόνα 3-33: Τα διάφορα όργανα του συστήματος, Α) μεταδότης πίεσης, Β) μεταδότης ροής αφαλατωμένου νερού, Γ) μεταδότης πίεσης της άλμης, Δ) μεταδότης ηλεκτρικής αγωγιμότητας του αφαλατωμένου νερού, Ε) μεταδότης αγωγιμότητας της άλμης και Η) όργανο μέτρησης των στροφών του κινητήρα

### 3.6.3 Περιγραφή λειτουργίας του τροποποιημένου συστήματος

- Η περιστροφική αντλία αντλεί το διάλυμα NaCl προς τον ανακτητή ενέργειας μέσω των φίλτρων κυτταρίνης άνθρακα (βλέπε Εικόνα 3-34).
- Καθώς συνεχίζεται η άντληση με 10 bar, η πίεση εισόδου της μεμβράνης αυξάνεται σταδιακά με τη βοήθεια της πίεσης της άλμης.
- Η πίεση της άλμης προστίθεται στην πίεση της περιστροφικής αντλίας και η μονάδα ΑΩ φτάνει σε ισορροπημένη πίεση λειτουργίας. Η τιμή της πίεσης λειτουργίας εξαρτάται από τη συγκέντρωση των αλάτων στο διάλυμα τροφοδοσίας.
- Η διαδικασία της αφαλάτωσης συνεχίζεται μέχρι το κατώτερο όριο φόρτισης των συσσωρευτών να φτάσει στην προκαθορισμένη τιμή από το χρήστη (30%).

- Μία τρίοδη βαλβίδα κατευθύνει το νερό τροφοδοσίας από τη δεξαμενή τεχνητού θαλασσινού νερού προς την αντλία τροφοδοσίας ή κατευθύνει το αφαλατωμένο νερό που βρίσκεται στην μικρή δεξαμενή προς την αντλία τροφοδοσίας επίσης για πλήυση των μεμβρανών.
- Μία δεύτερη τρίοδη βαλβίδα που λειτουργεί αυτόματα με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού. Όταν η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού ξεπερνά τα 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (προκαθορισμένο από το χρήστη), το νερό αυτό διοχετεύεται στη γραμμή της άλμης, ενώ όταν είναι μικρότερα από τη τιμή αυτή το νερό περνά στη γραμμή του αφαλατωμένου νερού.
- Η ηλεκτρική ενέργεια από τη Φ/Β συστοιχία κατευθύνεται στους συσσωρευτές μέσω του ρυθμιστή φόρτισης.
- Η ηλεκτρική ενέργεια από τη ανεμογεννήτρια κατευθύνεται στους συσσωρευτές μέσω του ανορθωτή/ελεγκτή φόρτισης, βλέπε Εικόνα 3-34.



Εικόνα 3-34: Σχηματικό διάγραμμα του υβριδικού συστήματος ΑΩ

### 3.7 Εργαστηριακή διερεύνηση χαρακτηριστικών μεγεθών του κινητήρα ΣΡ

Είναι επιθυμητό να γνωρίζει κανείς τις παραμέτρους του κινητήρα καθώς έτσι έχει την πλήρη εικόνα του, είναι δηλαδή γνωστές οι σχέσεις μεταξύ ροπής, στροφών, τάση και κατανάλωση ρεύματος. Το γεγονός ότι ο κινητήρας ΣΡ είναι το μοναδικό φορτίο στο



σύστημα και σε αυτόν βασίζεται η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και η παραγωγή της μηχανικής ενέργειας στον άξονα της περιστροφικής αντλίας, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει μία λεπτομερής πειραματική μελέτη της λειτουργίας του κινητήρα.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος. Οι παράμετροι που μετρήθηκαν ήταν το ρεύμα, η τάση, οι στροφές και η ροπή του κινητήρα με σκοπό την πλήρη καταγραφή και κατανόηση των καμπυλών λειτουργίας του κινητήρα που δεν ήταν διαθέσιμα από τον κατασκευαστή. Ο κινητήρας τοποθετήθηκε στην ηλεκτρομαγνητική πέδη (βλέπε Εικόνα 3-35) και ύστερα ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

- Σταθεροποιείται η τάση τροφοδοσίας στα επίπεδα 15, 20 και 25 Volts, η τάση 15V ήταν η μικρότερη τάση που μπορούσε να δώσει ο υπάρχον εξοπλισμός (για κινητήρες μέχρι 50 kW), (Εικόνα 3-36, Εικόνα 3-35 και Εικόνα 3-37).
- Σε κάθε επίπεδο τάσης καταγράφονται η ροπή, ρεύμα και στροφές του κινητήρα.
- Τελικά υπολογίζεται η αποδοτικότητα του κινητήρα στα διάφορα σημεία λειτουργίας από την εξίσωση 3-3. Η αποδοτικότητα υπολογίζεται ως ο λόγος της μηχανικής ισχύος (εξίσωση 3-4) προς την απορροφούμενη ηλεκτρική ισχύ (Εξίσωση 3-5) όπως αναφέρει ο Τσατσαρέλης, (1997).

$$\eta = \frac{E_{mech}}{E_{elec}} \times 100 \quad 3-3$$

$$P_{mech} = \frac{T_{rq} \times N \times 1000}{9550} \quad 3-4$$

$$P_{elec} = I \times V \quad 3-5$$

Όπου  $\eta$  είναι η αποδοτικότητα του κινητήρα [%],  $P_{mech}$  είναι η μηχανική ισχύς [W],  $P_{elec}$  είναι η ηλεκτρική ισχύς [W],  $T_{rq}$  είναι η ροπή [Nm],  $N$  είναι οι στροφές του κινητήρα [rpm],  $I$  είναι το ρεύμα [A] και  $V$  είναι η τάση του κινητήρα [V].



Εικόνα 3-35: Το ηλεκτρικό κινητήρα πάνω στη ηλεκτρομαγνητική πέδη



Εικόνα 3-36: Πηγή τάσης συνεχούς ρεύματος



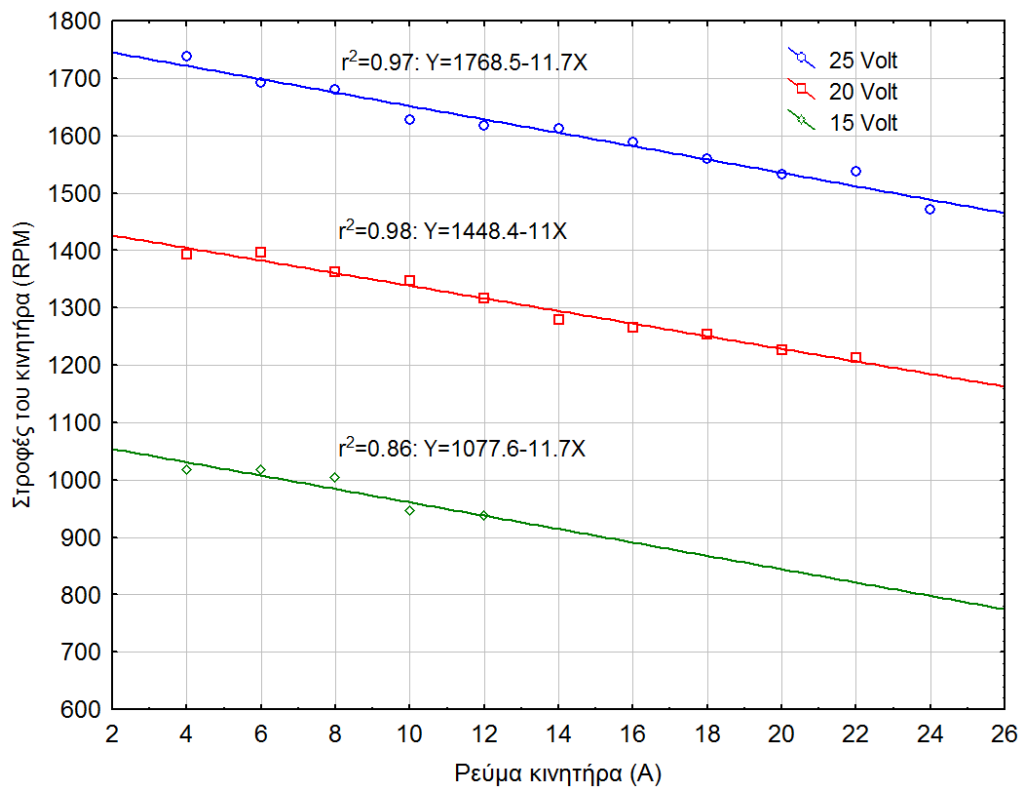
Εικόνα 3-37: Βολτόμετρο και Αμπερόμετρο

Τα αποτελέσματα στην  
Εικόνα 3-38 προέκυψαν από τη σταθεροποίηση της τάσης του κινητήρα σε ένα από τα τρία επίπεδα 15, 20 και 25 V. Για κάθε επίπεδο τάσης καταγράφονται οι στροφές και το καταναλισκόμενο ρεύμα του κινητήρα. Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του καταναλισκόμενου

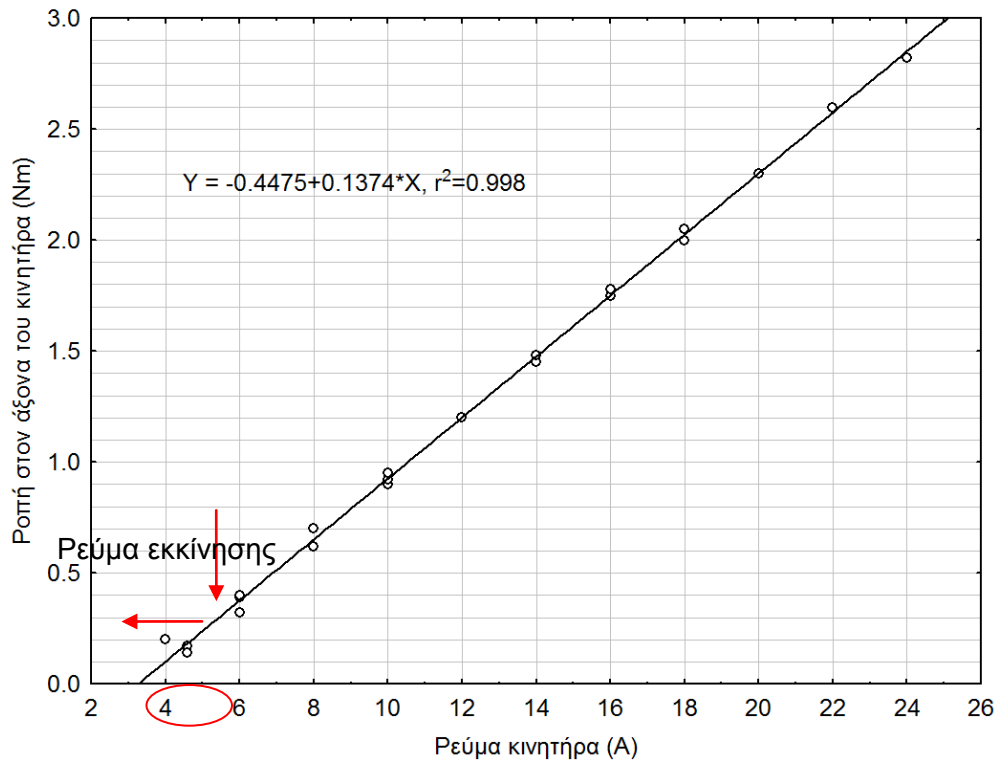
ρεύματος μειώνει τις στροφές του κινητήρα κυρίως λόγω της γραμμικής αύξησης της ροπής όπως φαίνεται στην

Εικόνα 3-39. Παρατηρείται επίσης ότι η αύξηση της τάσης του κινητήρα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των στροφών του κινητήρα.

Στην Εικόνα 3-39 παρατηρείται η γραμμική σχέση (με μεγάλο συντελεστή συσχέτισης) μεταξύ του ρεύματος και της ροπής του κινητήρα. Στην ίδια εικόνα παρατηρούμε ότι χρειάζεται τουλάχιστον 4.5 A για να ξεκινήσει ο κινητήρας και να παράγει ροπή και ότι η μέγιστη ροπή του κινητήρα στα 25 A και 25 V είναι 2.8 Nm.

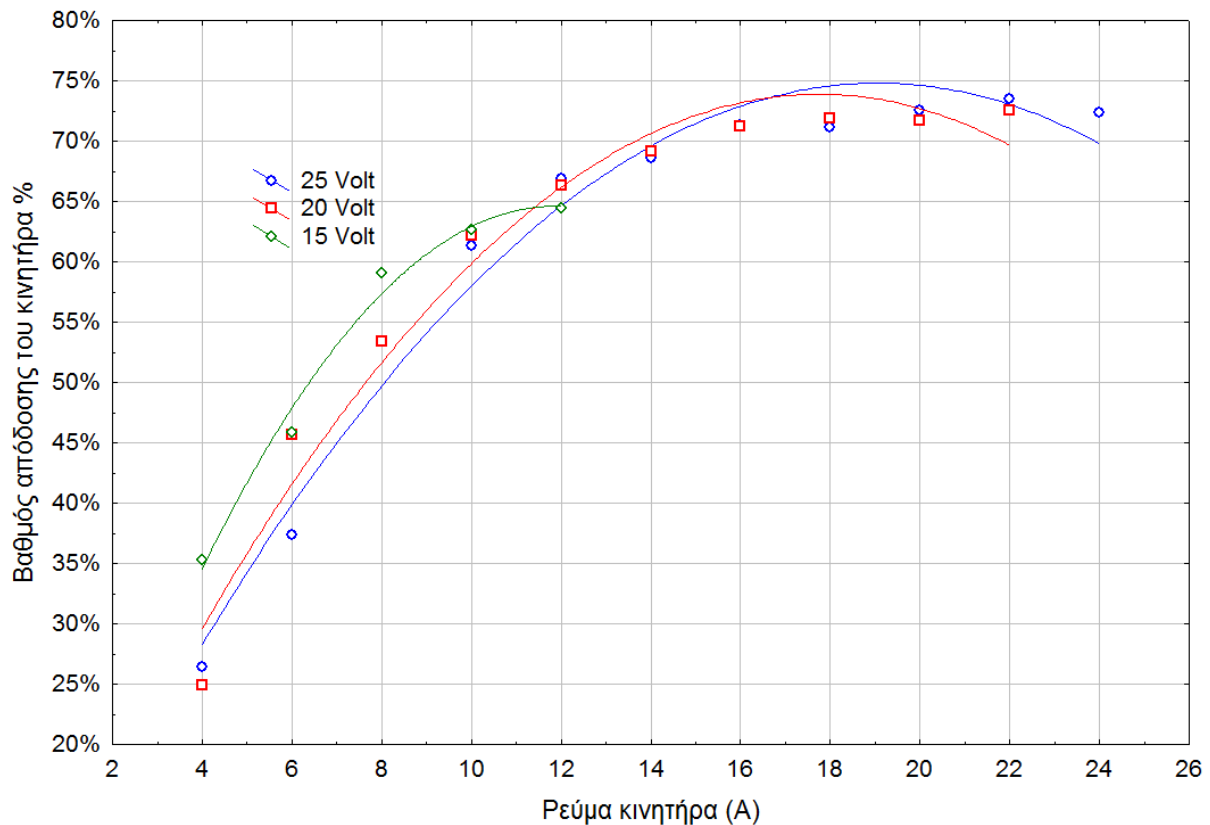


Εικόνα 3-38: Επίδραση της μεταβολής του ρεύματος και της τάσης στις στροφές του κινητήρα



Εικόνα 3-39: Επίδραση του ρεύματος στη ροπή του κινητήρα

Στην Εικόνα 3-40 εφαρμόζοντας τις εξισώσεις 3-3, 3-4 και 3-5, και χρησιμοποιώντας τα μετρούμενα μεγέθη της τάσης και του ρεύματος, προκύπτουν οι καμπύλες αποδοτικότητας του κινητήρα σε διάφορα επίπεδα ισχύος του κινητήρα (τάση και ρεύμα). Παρατηρείται ότι ο μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης του κινητήρα (74%) επιτυγχάνεται κατά τη λειτουργία του στην ονομαστική του ισχύ δηλαδή 25 V και 25 A.



Εικόνα 3-40: Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα σε διάφορα σημεία λειτουργίας

### 3.8 Συμπεριφορά της μονάδας ΑΩ σε συνθήκες μεταβλητής τάσης λειτουργίας

Σκοπός της διερεύνησης ήταν να διερευνηθεί η επίδραση της μεταβολής της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα ΣΡ στους διάφορους παραμέτρους της μονάδας ΑΩ (πίεση, παροχή αφαλατωμένου νερού, κατανάλωση ρεύματος και η ειδική κατανάλωση ενέργειας). Η μεταβλητή τάσης λειτουργίας είναι μια χαρακτηριστική παράμετρος σε μονάδες ΑΩ που τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια απευθείας από πηγές που χαρακτηρίζονται με διακυμάνσεις της παραγόμενης ηλεκτρικής τάσης όπως είναι τα συστήματα ΑΠΕ.

Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της συστοιχίας των ηλιακών συσσωρευτών που περιγράφηκε νωρίτερα (315 Ah/2 V – 12 στοιχεία στη σειρά συνολικής τάσης 24 V). Η τάση της συστοιχίας σε κατάσταση πλήρους φόρτισης μετρήθηκε και ήταν 28 V. Με την αφαίρεση ενός συσσωρευτή κάθε φορά επιτυγχάνεται τα επίπεδα τάσης 26, 24, 22, 20, 18, 16, 14, και 12 V. Σε κάθε επίπεδο τάσης, καταγράφηκαν οι παράμετροι της μονάδας ΑΩ όπως η πίεση της αντλίας τροφοδοσίας, η πίεση εισόδου της μεμβράνης, η πίεση της άλμης, η παροχή αφαλατωμένου νερού, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού, και η κατανάλωση ρεύματος.

Είναι γνωστό ότι το καταναλισκόμενο ρεύμα του κινητήρα υπολογίζεται από την εξίσωση 3-6:

$$I = \frac{V - E_a}{R_\Omega} \quad 3-6$$

Όπου  $I$  [A] είναι το ρεύμα που καταναλώνει ο κινητήρας,  $V$  [V] είναι η τάση της πηγής ΣΡ,  $E_a$  [V] είναι η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη και  $R_\Omega$  [Ω] είναι η ολική αντίσταση του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου του κινητήρα. Δεδομένου ότι η ολική αντίσταση είναι σταθερή για κάθε κινητήρα, τότε η κατανάλωση ρεύματος του κινητήρα είναι ευθέως ανάλογη με την τάση τροφοδοσίας.

Στην Εικόνα 3-41 παρουσιάζεται η γραμμική συσχέτιση μεταξύ της τάσης τροφοδοσίας (των συσσωρευτών) και του καταναλισκόμενου ρεύματος του κινητήρα με μεγάλο συντελεστή συσχέτισης (99%).

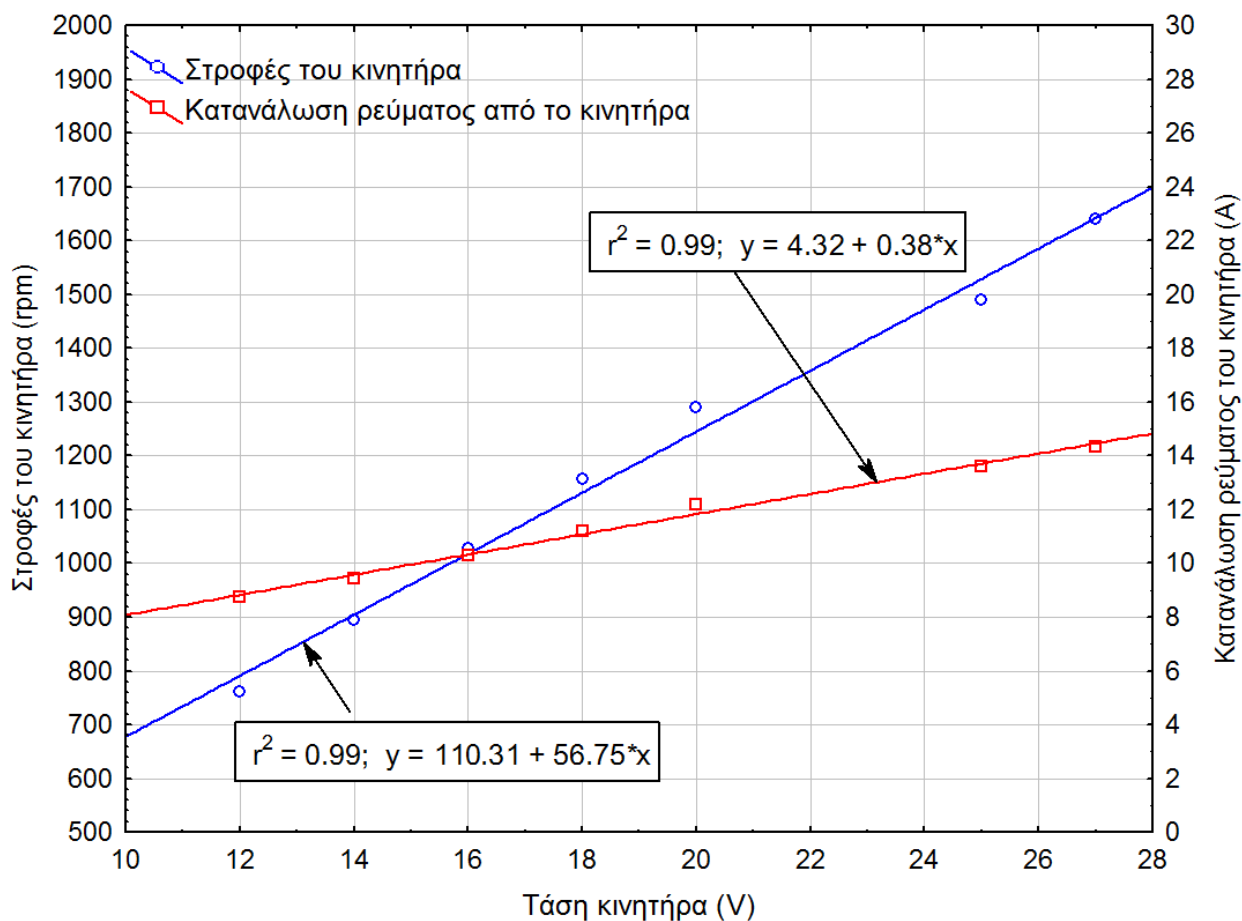
Επίσης η αντιηλεκτρεγερτική μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 3-7:

$$E_a = K_u \Phi N \quad 3-7$$

Όπου  $K_u \Phi$  είναι η μαγνητική ροή [V/sec] και  $N$  είναι οι στροφές του κινητήρα [στροφ/sec]. Με αντικατάσταση της εξίσωσης 3-7 στην εξίσωση 3-6 προκύπτει η εξίσωση 3-8 όπου διαπιστώνεται η ευθέως ανάλογη σχέση μεταξύ της τάσης τροφοδοσίας και των στροφών του κινητήρα.

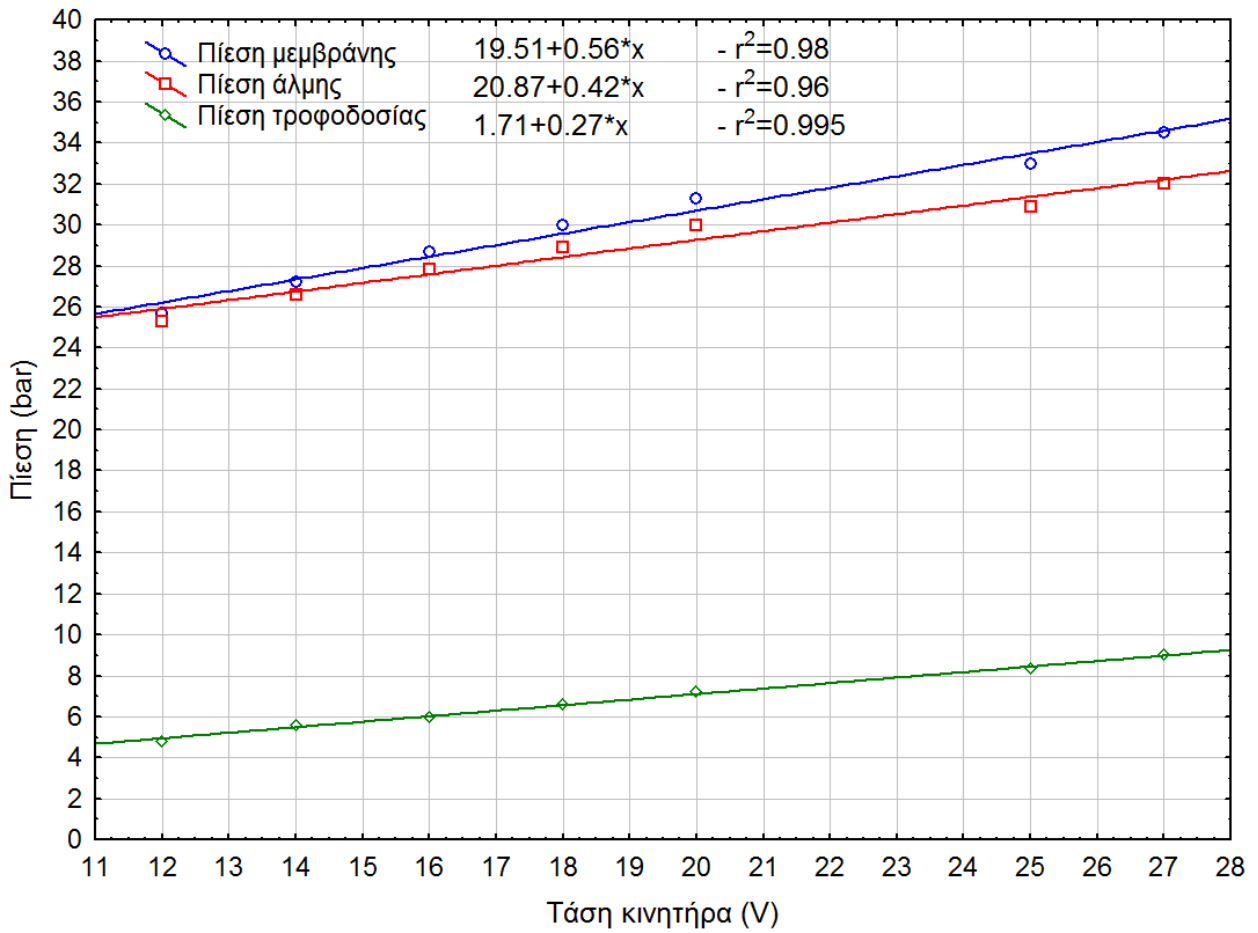
$$N = \frac{V - IR}{K_u \Phi} \quad 3-8$$

Από τις εξισώσεις 3-6, 3-7 και 3-8 τα οποία υιοθετήθηκαν από τον Βασιλακόπουλο, (1976), αποδεικνύεται θεωρητικά η γραμμική σχέση της τάσης με τις στροφές και τη κατανάλωση ρεύματος. Στην Εικόνα 3-41 απεικονίζεται η γραμμική σχέση της τάσης τροφοδοσίας και των στροφών του κινητήρα με συντελεστή γραμμικής συσχέτισης 99%



Εικόνα 3-41: Επίδραση μεταβολής της τάσης τροφοδοσίας στην κατανάλωση ρεύματος και στις στροφές του κινητήρα

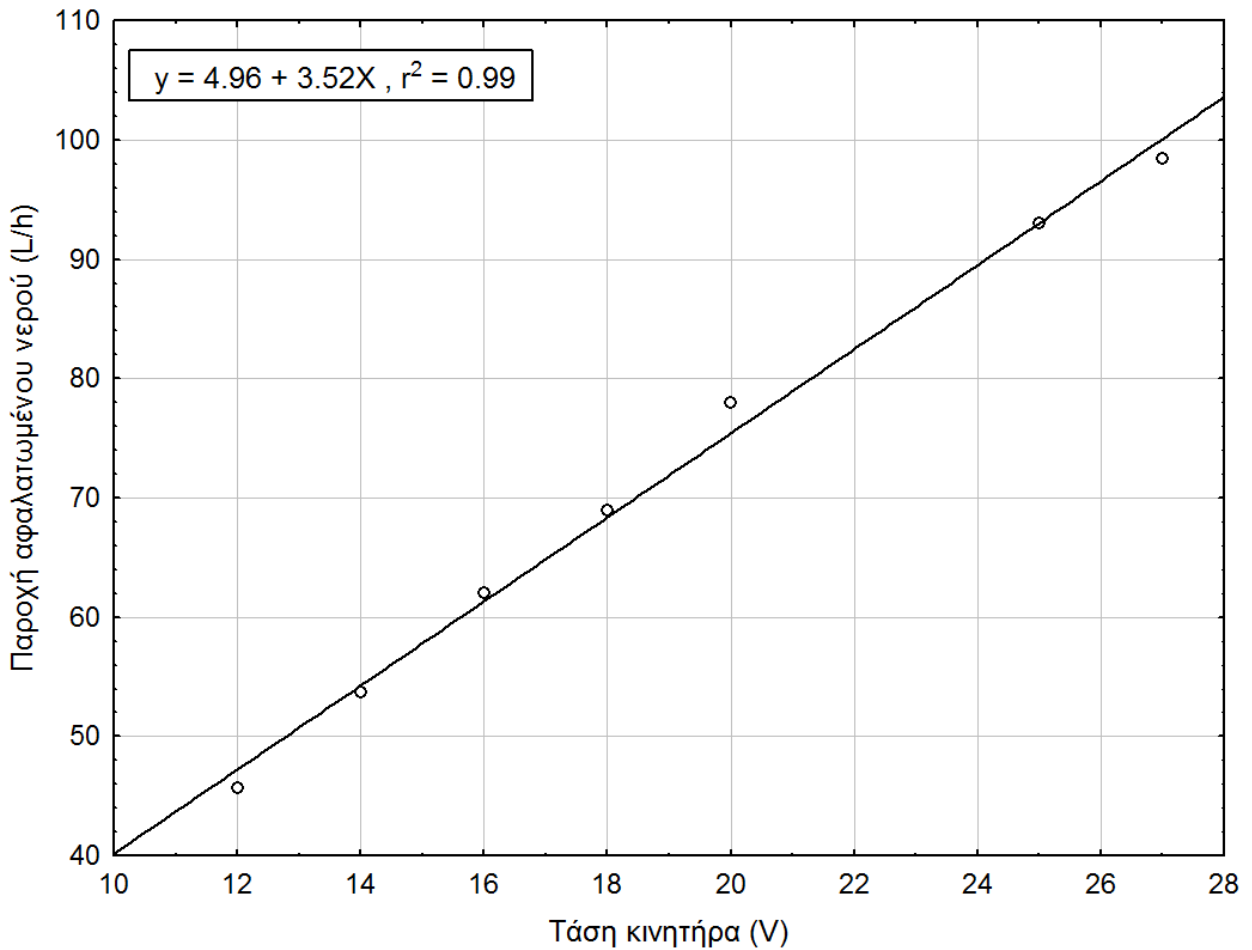
Όπως προαναφέρθηκε στην εξίσωση 2-11 στο δεύτερο κεφάλαιο, η αύξηση της τάσης τροφοδοσίας και κατά συνέπεια η αύξηση του καταναλισκόμενου ρεύματος του κινητήρα (αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος), είναι ευθέως ανάλογη με την πίεση λειτουργίας της αντλίας. Στην Εικόνα 3-42 απεικονίζεται η γραμμική σχέση μεταξύ της τάσης τροφοδοσίας και της πίεσης της αντλίας τροφοδοσίας με συντελεστή γραμμικής συσχέτισης 99%. Η πίεση εισόδου της μεμβράνης καθώς και η πίεση της άλμης είναι ευθέως ανάλογες με την πίεση της αντλίας τροφοδοσίας όπως είχε αναφερθεί στην εξίσωση 2-18. Παρατηρείται στην Εικόνα 3-42 ότι η διαφορά μεταξύ της πίεσης εισόδου της μεμβράνης και της πίεσης τροφοδοσίας δεν είναι σταθερή και κυμαίνεται μεταξύ 20.9 και 25.5 bar. Ομοίως η διαφορά πίεσης μεταξύ της πίεσης της μεμβράνης και της πίεσης της άλμης κυμαίνεται μεταξύ 0.38 και 2.5 bar. Αυτή η διαφορά της πίεσης αντιπροσωπεύει τις απώλειες πίεσης μέσα στη μεμβράνη και της μεμβρανοθήκης.



Εικόνα 3-42: Επίδραση της μεταβολής τάσης τροφοδοσίας στις πιέσεις της μονάδας ΑΩ

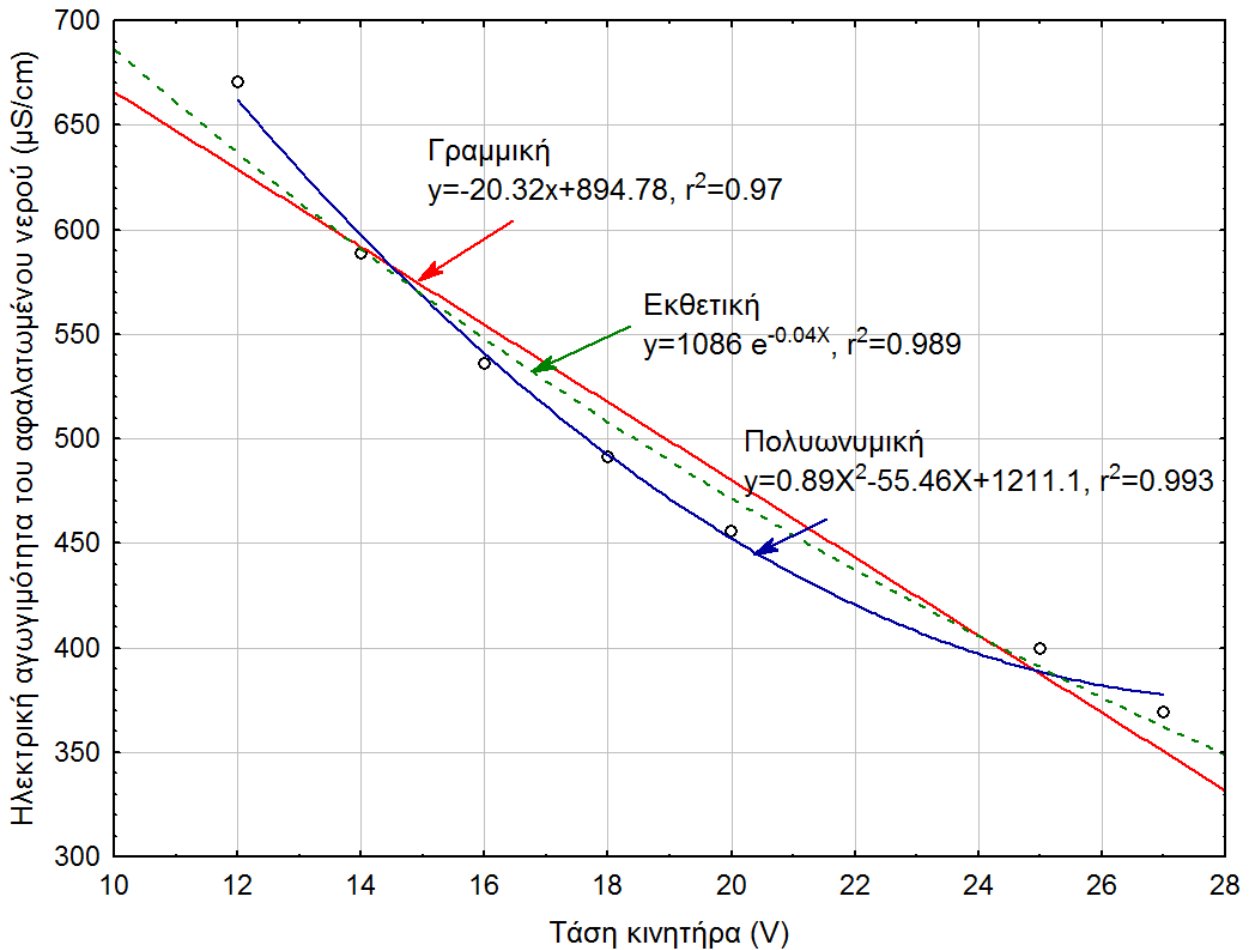
Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 2 επίσης, οι περιστροφικές αντλίες θετικής μετατόπισης απομονώνουν μία ποσότητα υγρού ανάμεσα στα αντλητικά στοιχεία και την ωθούν προς το σωλήνα κατάθλιψης. Έτσι η παροχή της αντλίας τροφοδοσίας είναι ευθέως ανάλογη με τον αριθμό στροφών του κινητήρα. Κάτω από σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, η παροχή αφαλατωμένου νερού είναι ανάλογη με την παροχή του νερού τροφοδοσίας. Άρα αναμένεται μια γραμμική σχέση μεταξύ της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα και της παροχής του αφαλατωμένου νερού όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-43, όπου καταγράφηκε ένας συντελεστής συσχέτισης 99%.





Εικόνα 3-43: Επίδραση μεταβολής τάσης τροφοδοσίας στην παροχή αφαλατωμένου νερού

Όσον αφορά την ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού, εξετάστηκε αν η συσχέτιση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του αφαλατωμένου νερού με την τάση του κινητήρα είναι γραμμική, πολυωνυμική ή εκθετική. Η συσχέτιση των πειραματικών δεδομένων έδειξαν ότι η πολυωνυμική σχέση έχει το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτιση (99.3%), και ταυτόχρονα αντιπροσωπεύει καλύτερα των πειραματικών δεδομένων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-44.



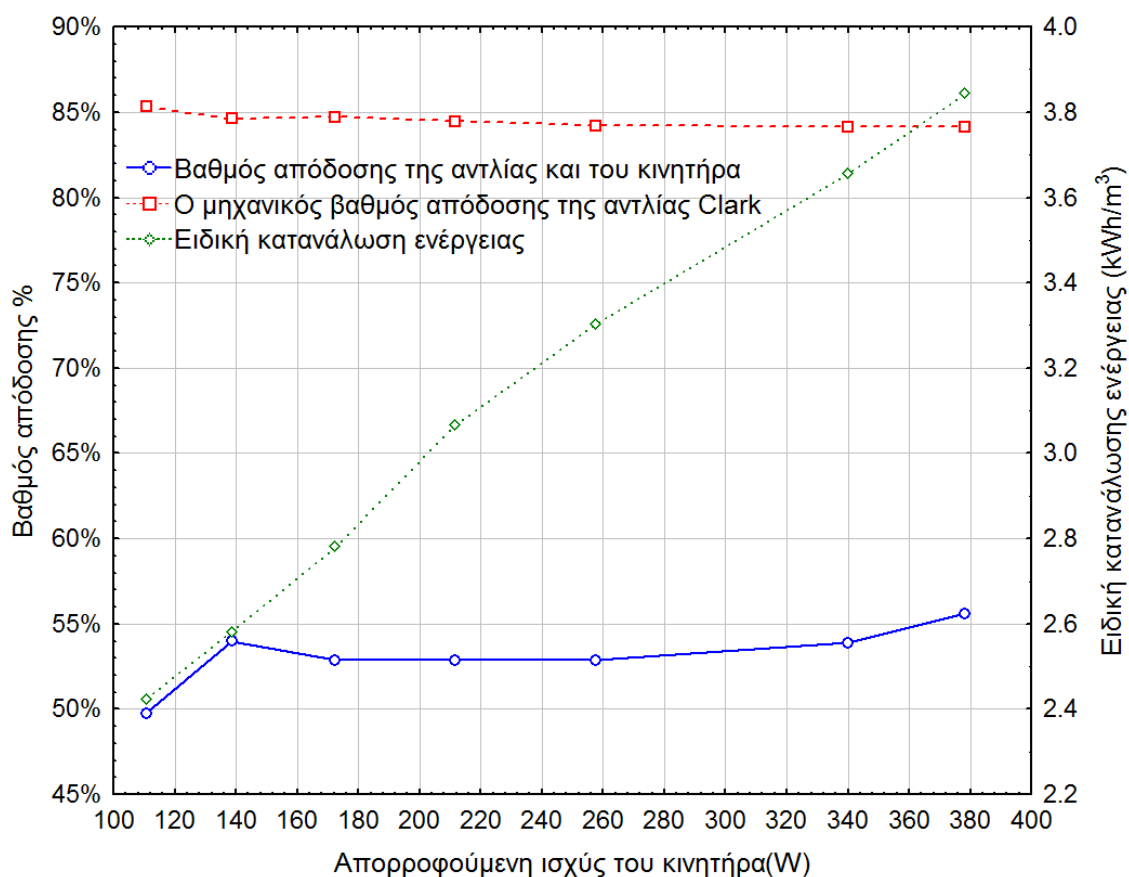
Εικόνα 3-44: Επίδραση μεταβολής της τάσης τροφοδοσίας στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού

Στην Εικόνα 3-45 παρουσιάζεται ο μηχανικός βαθμός απόδοσης της αντλίας Clark όπως αυτό έχει οριστεί στην εξίσωση 2-26. Παρατηρείται ότι ο μηχανικός βαθμός απόδοσης κυμαίνεται μεταξύ 84 και 85%. Επίσης φαίνεται στην Εικόνα 3-45 ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα και της αντλίας τροφοδοσίας, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 50 και 56%, όπως αυτό περιγράφεται από την εξίσωση 2-13. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση 3-9.

$$S_{EC} = \frac{E_m}{Q_p} \quad 3-9$$

Όπου  $S_{EC}$  είναι η ειδική κατανάλωση ενέργειας [kWh/m<sup>3</sup>],  $E_m$  είναι η καταναλισκόμενη ενέργεια από το κινητήρα και  $Q_p$  είναι η παραγόμενη ποσότητα αφαλατωμένου νερού [m<sup>3</sup>]. Στην Εικόνα 3-45 επίσης, παρουσιάζεται η ειδική κατανάλωση ενέργειας της μονάδας ΑΩ της οποίας οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 2.42 και 3.84 kWh/m<sup>3</sup>, (βλέπε Εικόνα 3-45).

Σημειώνεται ότι η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας κατά τη διάρκεια της πειραματικής διερεύνησης ήταν 28 °C και η συγκέντρωση αλάτων 31000 ppm. Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 2, η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει της ροή του αφαλατωμένου νερού και κατά συνέπεια μειώνει την ειδική κατανάλωση ενέργειας ενώ η αύξηση της συγκέντρωσης των αλάτων στο νερό τροφοδοσίας αυξάνει την ειδική κατανάλωση ενέργειας λόγω μύωσης της ροής του αφαλατωμένου νερού. Το ποσοστό ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού το οποίο περιγράφηκε από την εξίσωση 2-2 υπολογίστηκε για κάθε μεταβολή της τάσης και βρέθηκε σταθερό και ίσο με 11%. Δηλαδή επιβεβαιώνεται η εξίσωση 2-23 η οποία περιγράφει τον ποσοστό ανάκτησης ως σταθερή τιμή που ισούται με το λόγο της διατομής του εμβόλου προς τη διατομή του διωστήρα της αντλίας Clark.

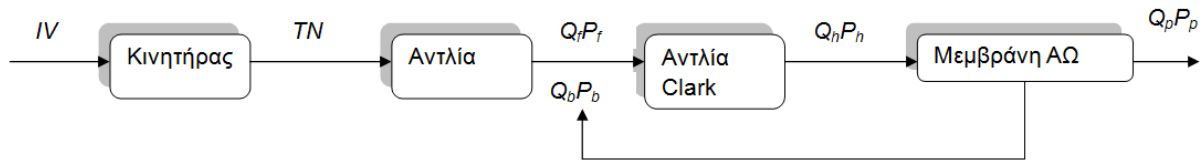


Εικόνα 3-45: Επίδραση μεταβολής της απορροφούμενης ισχύος του κινητήρα στο βαθμό απόδοσης του αντλητικού συστήματος και στην ειδική κατανάλωση ενέργειας

### 3.9 Ενεργειακός βαθμός απόδοσης των διαφόρων τμημάτων της μονάδας ΑΩ

Ο υπολογισμός των ενεργειακών βαθμών αποδόσεων των διαφόρων τμημάτων της μονάδας πραγματοποιείται με σκοπό την εύρεση των σημείων με την χαμηλότερη αποδοτικότητα ή με τη μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας, με στόχο τη μελλοντική βελτίωση της.

Στην Εικόνα 3-46 απεικονίζεται ένα σχηματικό διάγραμμα για τα διάφορα τμήματα μονάδας ΑΩ με ανακτητή ενέργειας.



Εικόνα 3-46: Σχηματικό διάγραμμα μονάδας ΑΩ με ανάκτηση ενέργειας

Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα  $\eta_{\text{κινητήρα}}$  υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης 3-3, ενώ ο βαθμός απόδοσης της αντλίας  $\eta_{\text{αντλία}}$  υπολογίζεται ως ο λόγος της παραγόμενης υδραυλικής ενέργειας προς τη μηχανική ενέργεια στον άξονα της αντλίας όπως αυτός περιγράφεται από την εξίσωση 3-10.

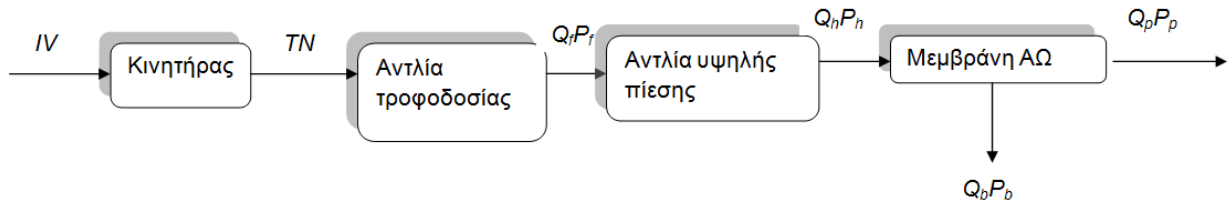
$$\eta_{\text{αντλία}} = \frac{Q_f P_f}{T_{rq} N} \quad 3-10$$

Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης της αντλίας Clark  $\eta_m$  υπολογίζεται από την εξίσωση 2-29, ενώ ο βαθμός απόδοσης της μεμβράνης  $\eta_{\text{μεμβράνη}}$  υπολογίζεται από την εξίσωση 3-11 για μονάδες με ανακτητή ενέργειας και εξίσωση 3-12 για μονάδες χωρίς ανακτητή ενέργειας, όπου παρατηρείται ότι όλοι οι βαθμοί απόδοσης υπολογίζονται ως ο λόγος της εξερχόμενης ισχύος από το σύστημα προς την εισερχόμενη ισχύς σε αυτό. Η ογκομετρική απόδοση των αντλιών τροφοδοσίας και της Clark δεν υπολογίστηκαν θεωρώντας ότι οι αντλίες λειτουργούν χωρίς διαρροές, στη πραγματικότητα η διαρροή (εσωτερική διαρροή μέσα στην αντλία και εξωτερική) μειώνει τον ολικό βαθμό απόδοσης κατά 1 – 2% όπως αναφέρουν οι Thomson and Miranda, (2000)

$$\eta_{\text{μεμβράνη}} = \frac{Q_p P_p + Q_b P_b}{Q_h P_h} \quad 3-11$$

$$\eta_{\text{μεμβράνη}2} = \frac{Q_p P_p}{Q_h P_h} \quad 3-12$$

Στην Εικόνα 3-47 απεικονίζεται τα διάφορα τμήματα μονάδας ΑΩ χωρίς ανακτητή, παρατηρείται ότι η ενέργεια της άλμης η οποία αποτελεί 85% της εισερχόμενης ενέργειας στη μεμβράνη απλά χάνεται στη βάνα στραγγαλισμού στην έξοδο της γραμμής της άλμης.



Εικόνα 3-47: Σχηματικό διάγραμμα μονάδας ΑΩ χωρίς ανάκτηση ενέργειας

Στον πίνακα 3-21 παρουσιάζονται οι διάφοροι υπολογισμοί των βαθμών αποδόσεων των διαφόρων τμημάτων της μονάδας ΑΩ με και χωρίς συσκευή ανάκτησης ενέργειας. Οι αριθμητικές τιμές στη δεξιά στήλη του πίνακα 3-21 υπολογίστηκαν από τη μέση τιμή της ροπής, ρεύματος και ισχύος που καταγράφηκαν πειραματικά στις εικόνες 3-38 και 3-39 για τάση λειτουργίας 25 V.

Πίνακας 3-21: Ο βαθμός απόδοσης των διαφόρων τμημάτων της μονάδας ΑΩ

| Βαθμός απόδοσης                              | Εξίσωση υπολογισμού  | Αριθμητική τιμή   |
|--|--|---|
| Βαθμός απόδοσης του κινητήρα                 | $\eta_{\text{κινητήρα}} = \frac{T_{rq} N}{IV}$               | $\eta_{\text{κινητήρα}} = \frac{218.57}{340} = 0.64$                                  |
| Βαθμός απόδοσης της αντλίας τροφοδοσίας      | $\eta_{\text{αντλία}} = \frac{Q_f P_f}{T_{rq} N}$            | $\eta_{\text{αντλία}} = \frac{183}{218.57} = 0.84$                                    |
| Μηχανικός βαθμός απόδοσης της αντλίας Clark  | $\eta_m = \frac{P_h}{P_f + P_b}$                             | $\eta_{\text{mech-Clark}} = \frac{33}{8.32 + 30.9} = 0.84$                            |
| Βαθμός απόδοσης της μεμβράνης με ανάκτηση    | $\eta_{\text{μεμβράνη}} = \frac{Q_p P_p + Q_b P_b}{Q_h P_h}$ | $\eta_{\text{μεμβράνη}} = \frac{93 \times 1 + 716 \times 30.9}{809 \times 33} = 0.83$ |
| Βαθμός απόδοσης της μεμβράνης χωρίς ανάκτηση | $\eta_{\text{μεμβράνη2}} = \frac{Q_p P_p}{Q_h P_h}$          | $\eta_{\text{μεμβράνη2}} = \frac{93 \times 1}{809 \times 33} = 0.003$                 |

Ο ολικός βαθμός απόδοσης της μονάδας υπολογίζεται ως το γινόμενο όλων των βαθμών αποδόσεων της μονάδας, βλέπε εξισώσεις 3-13 και 3-14.

Ολικός βαθμός απόδοσης της μονάδας ΑΩ χωρίς ανάκτηση

$$\eta_{\text{Ολικό2}} = \eta_{\text{κινητήρα}} \times \eta_{\text{αντλία}} \times \eta_{\text{αντλία2}} \times \eta_{\text{μεμβράνη}} \quad 3-13$$

$$\eta_{\text{Ολικό}} = 0.64 \times 0.84 \times 0.9 \times 0.003 = 0.0015$$

Ολικός βαθμός απόδοσης της μονάδας ΑΩ με ανάκτηση

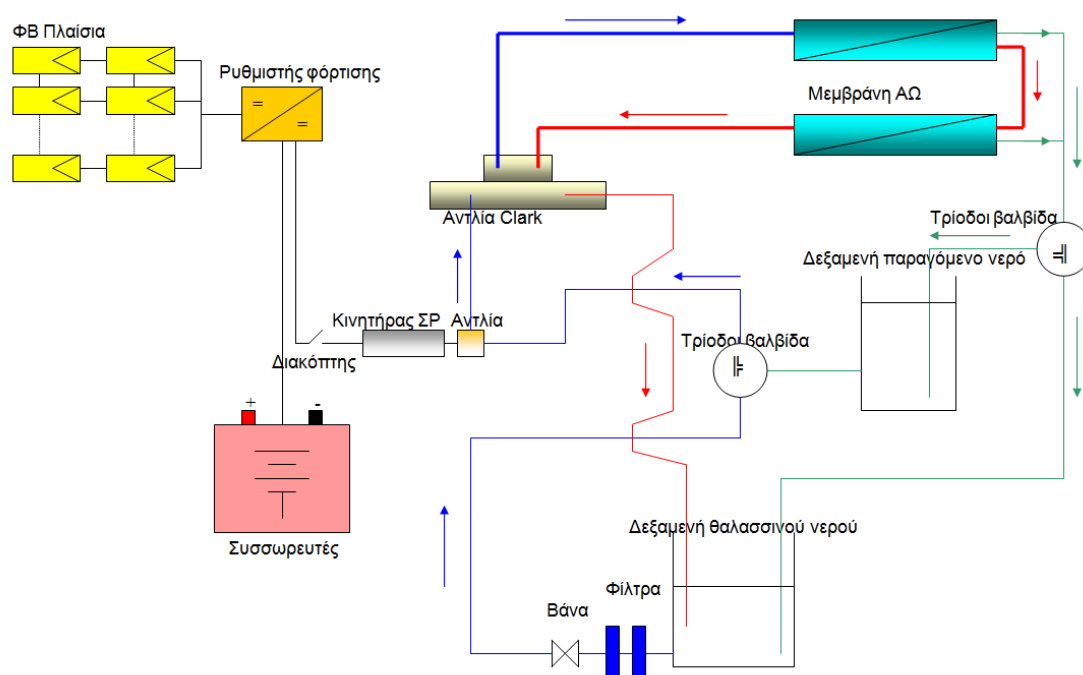
$$\eta_{\text{Ολικό}} = \eta_{\text{κινητήρα}} \times \eta_{\text{αντλία}} \times \eta_m \times \eta_{\text{μεμβράνη}} \quad 3-14$$

$$\eta_{\text{Ολικό}} = 0.64 \times 0.84 \times 0.84 \times 0.83 = 0.37$$

Παρατηρείται ότι ο μικρός ολικός βαθμός απόδοσης της μονάδας χωρίς ανακτητή οφείλεται στη σπατάλη ενέργειας λόγω μη χρήσης ανακτητή ενέργειας. Παρατηρείται επίσης ότι ο κινητήρας ΣΡ έχει το μικρότερο βαθμό απόδοσης από όλα τα άλλα τμήματα της μονάδας γεγονός που επιβάλλει της χρήση κινητήρων με μεγάλο βαθμό απόδοσης.

### 3.10 Λειτουργία της μονάδας ΑΩ με συσσωρευτές και Φ/Β συστοιχία

Σε αυτό το στάδιο η μονάδα ΑΩ τίθεται σε λειτουργία σε πραγματικές συνθήκες, δηλαδή σύνδεση της μονάδας ΑΩ με Φ/Β συστοιχία, συσσωρευτές και ρυθμιστή φόρτισης, βλέπε Εικόνα 3-48. Σε αυτή την τοπολογία, το παραγόμενο συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα των Φ/Β συστοιχιών περνά μέσω του ρυθμιστή φόρτισης στους συσσωρευτές και από του συσσωρευτές προς το κινητήρα επίσης μέσω του ρυθμιστή φόρτισης, όπως αναφέρουν οι *Mohamed, et al.*, (2006).



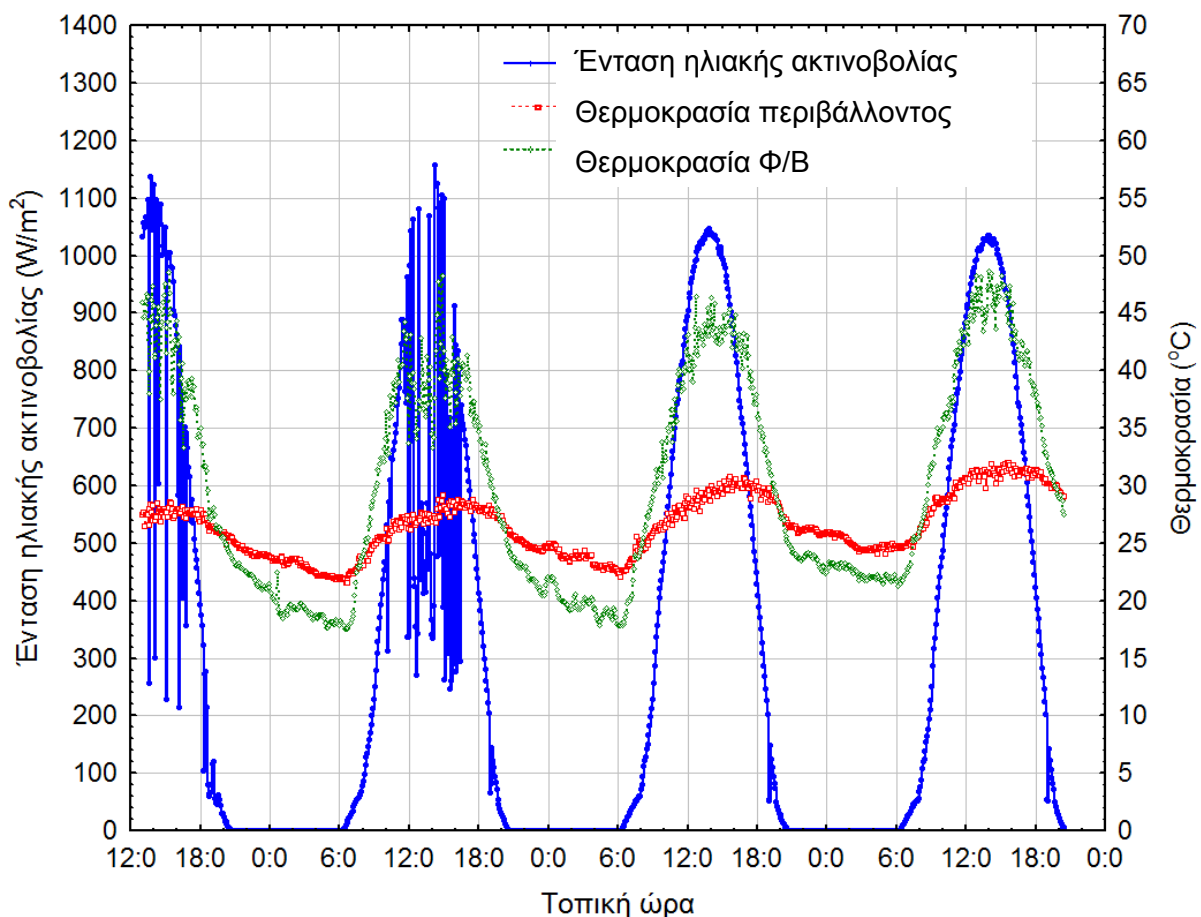
Εικόνα 3-48: Σύνδεση των Φ/Β πλαίσιων με την μονάδα ΑΩ μέσω συσσωρευτών

#### 3.10.1 Λειτουργία του ρυθμιστή φόρτισης

Ο ρυθμιστής φόρτισης επιτρέπει την μεταφορά της ενέργειας από τη Φ/Β συστοιχία προς τους συσσωρευτές, μέχρι η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών να φτάσει στο ανώτερο όριο φόρτισης (28 V ή 100% State Of Charge SOC) το οποίο ρυθμίζεται εξ αρχής από το χρήστη. Η περίσσεια ενέργειας σε αυτή την περίπτωση χάνεται και δεν συλλέγεται από το ρυθμιστή. Επιτρέπει επίσης τη μεταφορά ενέργειας από τους συσσωρευτές προς το

κινητήρα μέχρι η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών φτάνει στο κατώτερο όριο (23 V ή SOC 30%) που ρυθμίζεται επίσης από το χρήστη. Μετά από τη διακοπή λειτουργίας του κινητήρα λόγω εκφόρτισης των συσσωρευτών, ο κινητήρας τίθεται σε λειτουργία μόνο όταν η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών ξεπερνά ένα όριο λειτουργίας (25.3 V SOC >50%). Η περίσσεια ενέργειας αποθηκεύεται στους συσσωρευτές και τα ελλείμματα, καλύπτονται από την αποθηκευμένη ενέργεια στους συσσωρευτές.

Η τοπολογία αυτή μελετήθηκε για αρκετές μέρες κατά τον μήνα Ιούνιο 2006 με μετεωρολογικά δεδομένα (ένταση ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασία του αέρα) που εμφανίζονται στην Εικόνα 3-49, αντιπροσωπευτικά παρουσιάζονται οι μέρες 10-11-12-13 Ιουνίου 2006. Επίσης φαίνεται στην ίδια εικόνα η μετρημένη θερμοκρασία των Φ/Β συστοιχών.



Εικόνα 3-49: Μετεωρολογικά δεδομένα τεσσάρων ημερών του μηνός Ιουνίου 2006

Στην Εικόνα 3-50 αποκομίζεται η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από τη Φ/Β συστοιχία σε σχέση με τη διαθέσιμη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία των Φ/Β στοιχείων για το χρονικό διάστημα των τεσσάρων ημερών 10-11-12-13 Ιουνίου 2006.



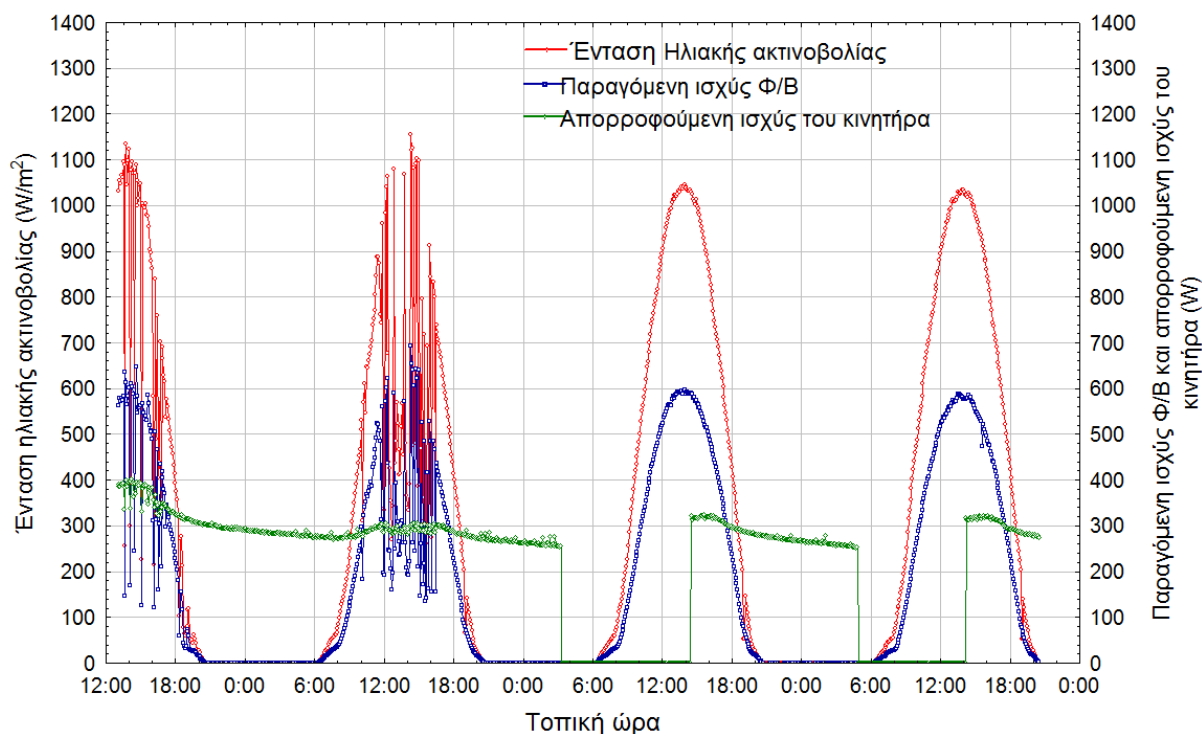
Ο βαθμός απόδοσης των Φ/Β συστοιχιών που εκφράζει τον λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγουν τα Φ/Β πλαίσια, προς την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνειά του παρουσιάζεται στις εξισώσεις 3-15 και 3-16.

$$\eta_{\pi} = \frac{P_{\pi}}{H_{sol} \times S \times \sigma_{\theta} \times \sigma_{\rho} \times \sigma_{\kappa}} \quad 3-15$$

$$\sigma_{\theta} = 1 - (T_{\pi} - T_{\alpha\epsilon\rho\alpha}) \times \alpha P_{m\pi\pi} \quad 3-16$$

Όπου  $\eta_{\pi}$  είναι ο βαθμός απόδοσης των Φ/Β συστοιχιών [-],  $P_{\pi}$  είναι η ισχύς της Φ/Β συστοιχίας [W],  $H_{sol}$  είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας [ $W/m^2$ ],  $S$  είναι η επιφάνεια των Φ/Β συστοιχιών [ $m^2$ ],  $\sigma_{\theta}$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας [-],  $\sigma_{\rho}$  είναι ο συντελεστής ρύπανσης της επιφάνειας του Φ/Β πλαισίου [-],  $\sigma_{\kappa}$  είναι ο συντελεστής κάλυψης του πλαισίου που ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών στοιχείων [-] δηλαδή της επιφάνειας του ημιαγωγού όπου γίνεται η απορρόφηση και μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, προς τη συνολική επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου,  $T_{\pi}$  είναι η θερμοκρασία του Φ/Β πλαισίου [ $^{\circ}C$ ],  $T_{\alpha\epsilon\rho\alpha}$  είναι η θερμοκρασία του αέρα [ $^{\circ}C$ ] και  $\alpha P_{m\pi\pi}$  είναι ο συντελεστής μείωσης της ισχύος του Φ/Β λόγω αύξησης της θερμοκρασία που είναι δεδομένος για κάθε τύπου Φ/Β πλαισίου και δίδεται από τον κατασκευαστή [%/ $^{\circ}C$ ].

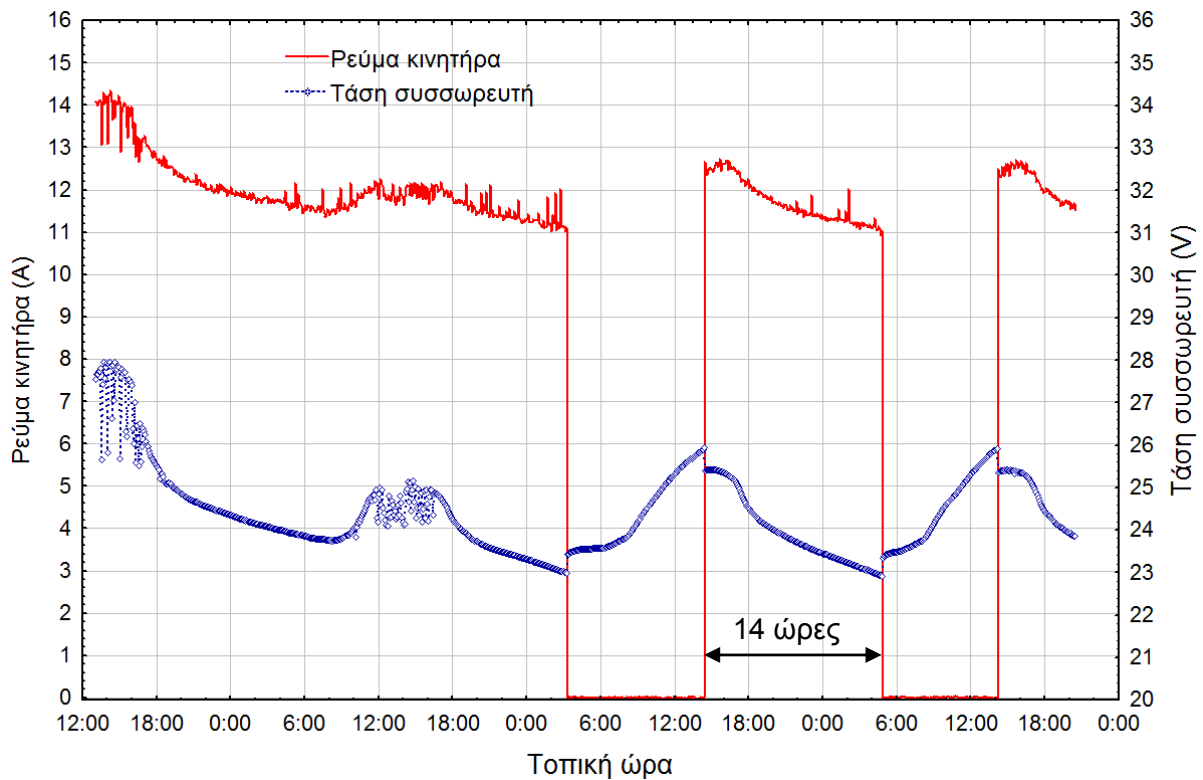
Για τα δεδομένα που συλλέχθηκαν τις ημέρες 10 έως 13 Ιουνίου 2006, εφαρμόζονται οι εξισώσεις 3-15 και 3-16 για κάθε τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, της ισχύος και της θερμοκρασίας των Φ/Β συστοιχιών, δεδομένο ότι από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Φ/Β πλαισίου δίδονται οι τιμές  $\alpha P_{m\pi\pi}$  είναι  $-0.45 \text{ \%}/^{\circ}C$ , η συνολική επιφάνεια των Φ/Β συστοιχιών  $7.62 \text{ m}^2$ . Υποθέτουμε ότι ο συντελεστής ρύπανσης των Φ/Β συστοιχιών είναι 0.9 και ο συντελεστής κάλυψης για το συγκεκριμένο Φ/Β είναι 0.98. Ο βαθμός απόδοσης των Φ/Β προκύπτει ως μέση τιμή της τάξης των 10%.



Εικόνα 3-50: Παραγωγή ισχύος από τη Φ/Β συστοιχία και η απορροφούμενη ισχύς του κινητήρα

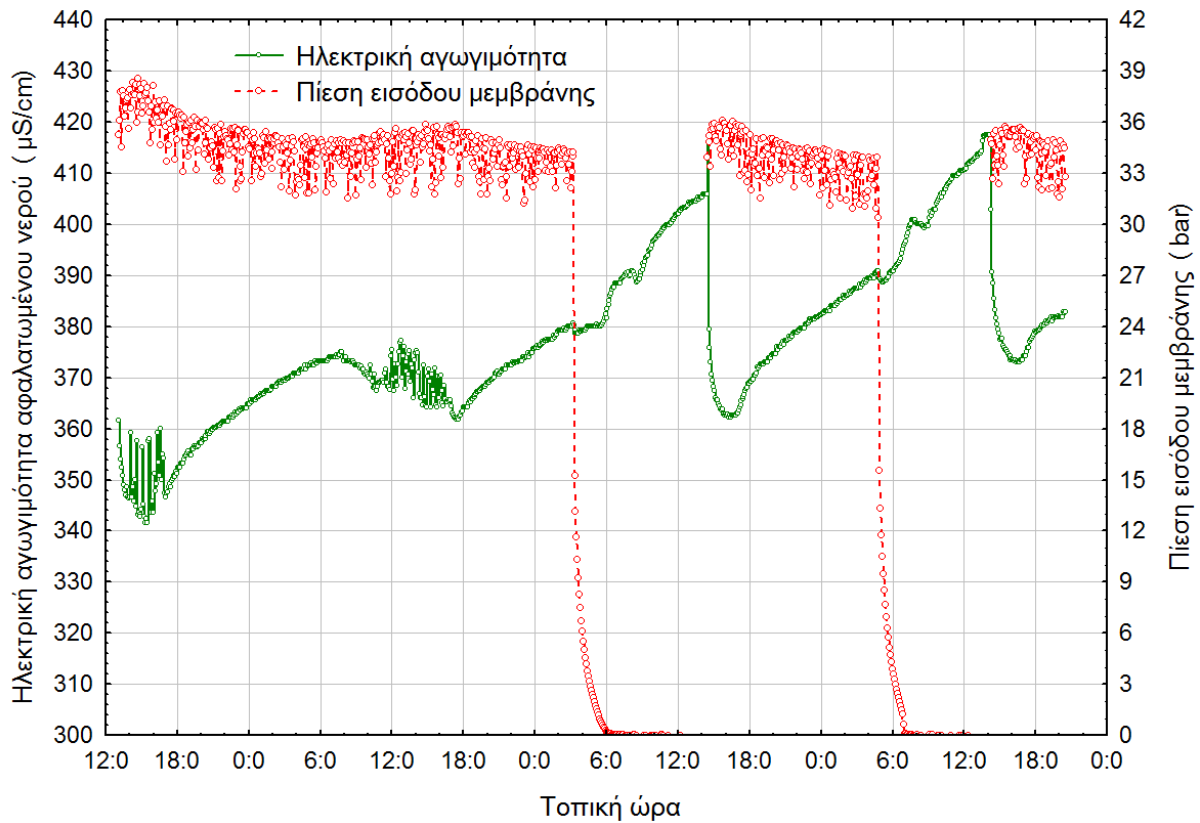
Στην Εικόνα 3-51, φαίνεται ότι οι συσσωρευτές στην αρχή της λειτουργίας ήταν πλήρως φορτισμένοι (28 V) λόγω μη λειτουργίας της μονάδας ΑΩ για αρκετές ημέρες πριν το πείραμα. Η τάση του συσσωρευτή μειώνεται σταδιακά από 28 V έως 24 V εξαιτίας της κατανάλωσης ρεύματος του κινητήρα.

Στην αρχή της δεύτερης μέρας η τάση αυξάνεται σταδιακά με την αύξηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας ενώ ο κινητήρας δεν σταματά τη λειτουργία του λόγω του ότι η τάση των συσσωρευτών δεν έφτασε τα 23 V. Όταν η τάση του συσσωρευτή φτάνει το 23 V, η λειτουργία της μονάδας ΑΩ σταματά και ξεκινά η διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών. Η φόρτιση των συσσωρευτών συνεχίζεται μέχρι η τάση τους να φτάσει τα 26 V όπου και ξεκινά τη λειτουργία της μονάδας ΑΩ ξανά. Ο χρόνος εκφόρτισης των συσσωρευτών καταγράφηκε σε 14 ώρες όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-51.



Εικόνα 3-51: Ρεύμα κινητήρα και τάση συσσωρευτών ως συνάρτηση του χρόνου

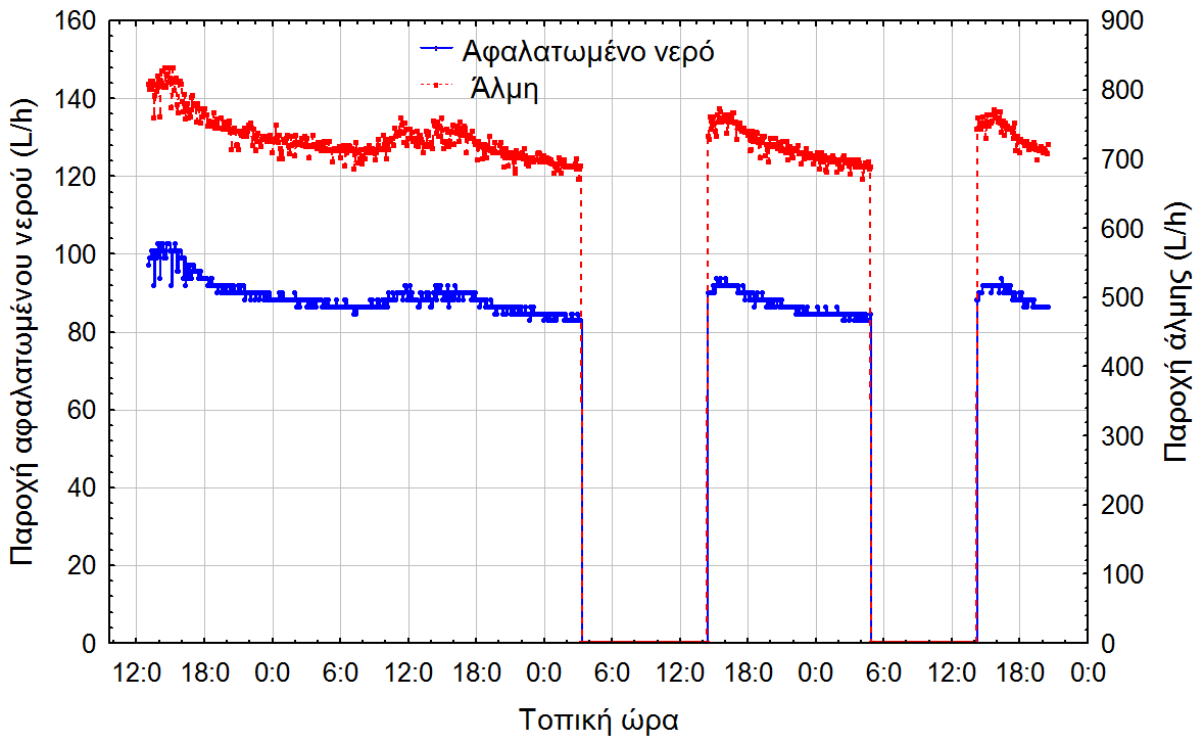
Στην Εικόνα 3-52 παρουσιάζονται η μεταβολή της πίεσης λειτουργίας της μεμβράνης και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού. Η διακύμανση της πίεσης εισόδου της μεμβράνης οφείλεται στην παλινδρομική κίνηση του εμβόλου της αντλίας Clark Παρατηρείται επίσης στην Εικόνα 3-52 ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού παραμένει μέσα στα επιθυμητά όρια κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος, (ανώτατο όριο 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) σύμφωνα με το Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας – WHO.



Εικόνα 3-52: Η μεταβολή της πίεσης της μεμβράνης και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού ως συνάρτηση του χρόνου

Στην Εικόνα 3-53, παρουσιάζεται η παροχή αφαλατωμένου νερού που κυμαίνεται μεταξύ 90 και 100 L/h και η παροχή της άλμης η οποία κυμαίνεται μεταξύ 700 και 800 L/h. Το ποσοστό ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού υπολογίστηκε με τη βοήθεια της εξίσωσης 2-6, και βρέθηκε κατά μέσο όρο 11%, που ακόμα μια φορά επιβεβαιώνει την εξίσωση 2-23. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε κυβικό θαλασσινό νερό τροφοδοσίας, παράγονται 110 λίτρα πόσιμο νερού.

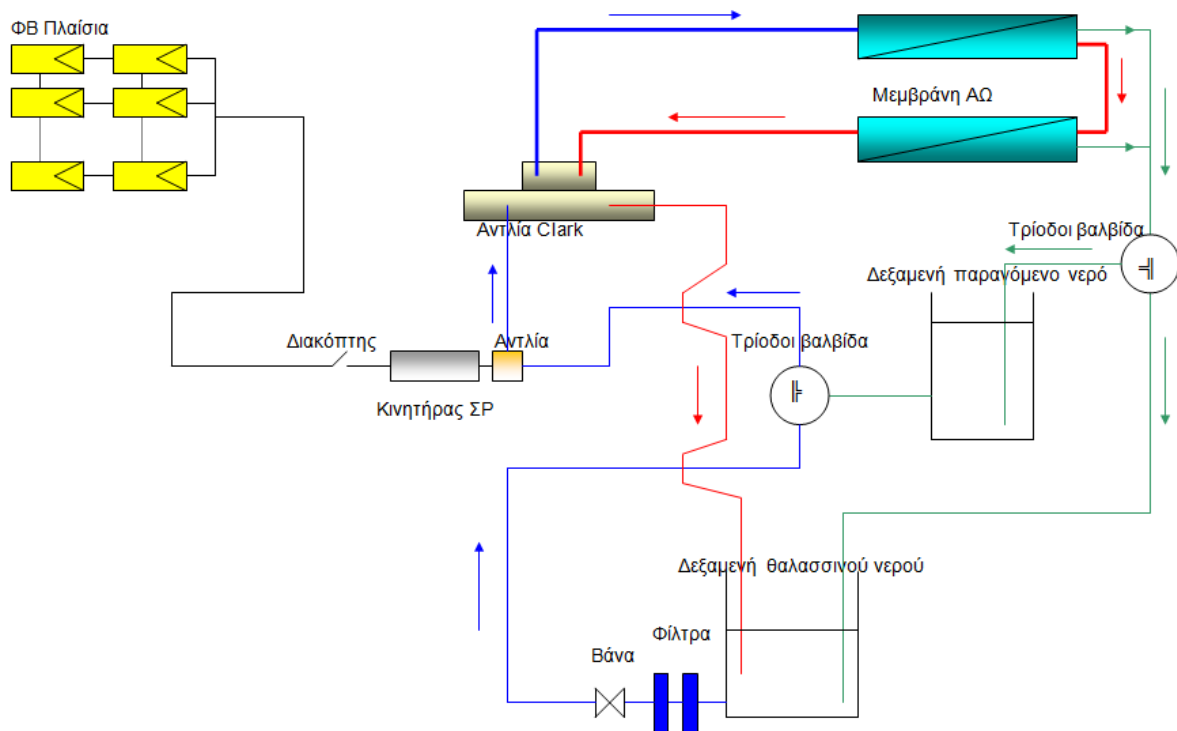
Η ειδική κατανάλωση ενέργειας (εξίσωση 3-9) σε αυτή την τοπολογία που υπολογίστηκε από τα δεδομένα των Εικόνων 3-51 και 3-53 σε 3.7 kWh/m<sup>3</sup> για νερό τροφοδοσίας 35 mS/cm και 4.3 – 4.5 kWh/m<sup>3</sup> για νερό τροφοδοσίας 50 mS/cm.



Εικόνα 3-53: Παροχή αφαλατωμένου νερού και άλμης

### 3.11 Λειτουργία της μονάδας ΑΩ με απευθείας σύνδεση με τη Φ/Β συστοιχία

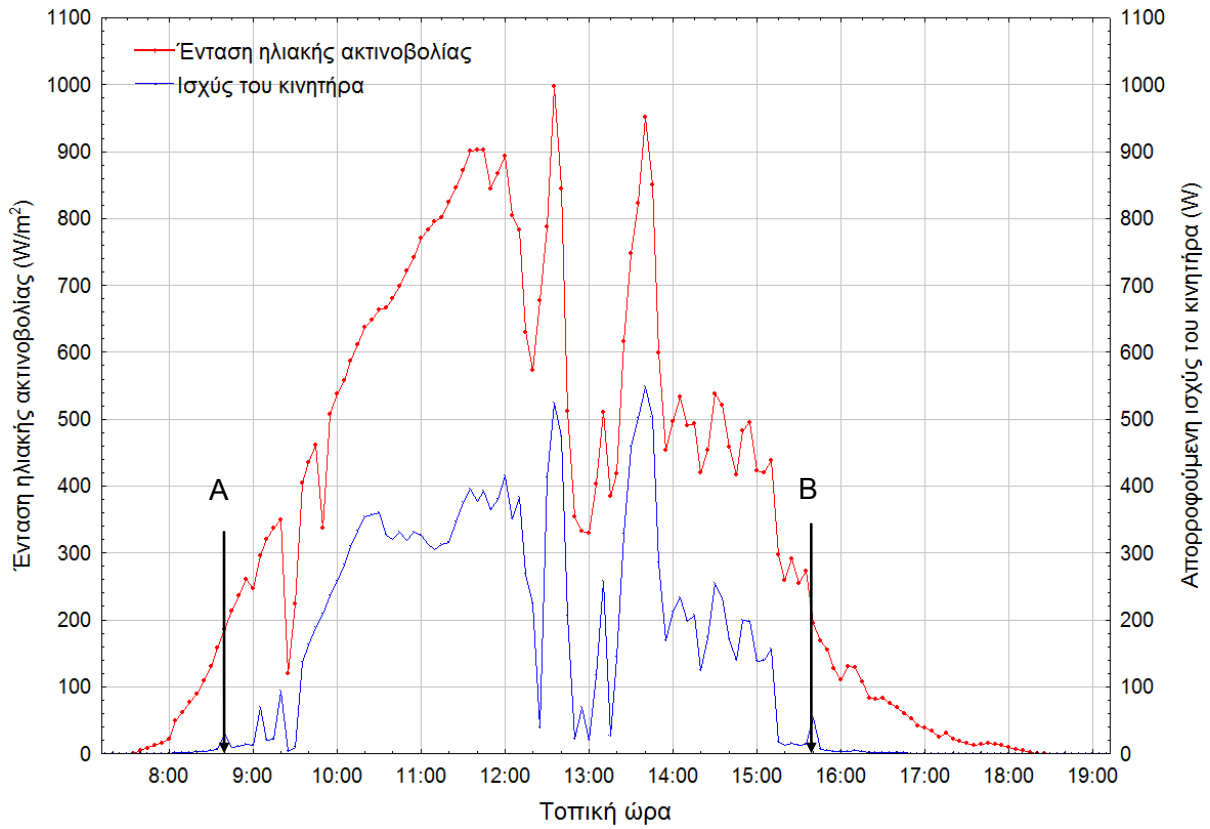
Σε αυτή την συνδεσμολογία, βλέπε Εικόνα 3-54, το παραγόμενο συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα της Φ/Β συστοιχίας οδηγείται απευθείας στον κινητήρα της μονάδας ΑΩ. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η απώλεια ενέργειας λόγω της φόρτισης και εκφόρτισης των συσσωρευτών, μειώνεται το αρχικό κόστος της μονάδας, μειώνεται το κόστος συντήρησης και λειτουργίας και μειώνονται οι επιπτώσεις στον περιβάλλον λόγω χρήσης συσσωρευτών μολύβδου οξέος. Όμως η απευθείας σύνδεση των μονάδων αφαλάτωσης ΑΩ με Φ/Β συστοιχία αυξάνει την αβεβαιότητα στην προκύπτουσα ηλεκτρική αγωγιμότητα και στην παροχή του αφαλατωμένου νερού. Στη παρούσα πειραματική διάταξη διερευνάται η επίδραση της απευθείας σύνδεση των Φ/Β συστοιχιών με τη μονάδα ΑΩ στα χαρακτηριστικά λειτουργίας της (ηλεκτρική αγωγιμότητα και παροχή αφαλατωμένου νερού, στροφές και ηλεκτρική κατανάλωση του κινητήρα, ειδική κατανάλωση ενέργειας της μονάδας και τις πιέσεις της αντλίας τροφοδοσίας, της εισόδου μεμβράνης και της άλμης).



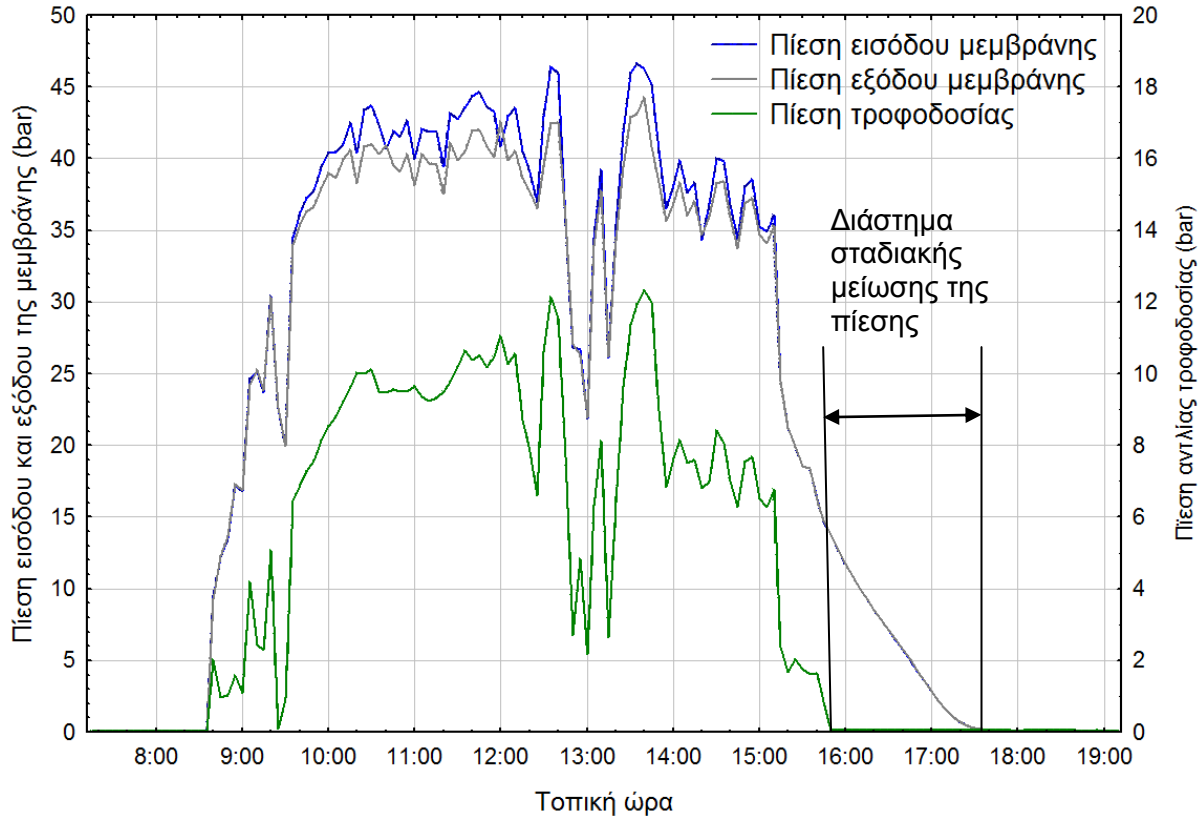
Εικόνα 3-54: Απευθείας σύνδεση της Φ/Β συστοιχίας με την μονάδα ΑΩ

Στην Εικόνα 3-55 παρουσιάζεται η διαθέσιμη ένταση της ηλιακής ακτινοβολία και η αντίστοιχη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς της Φ/Β συστοιχίας στις 27 Νοεμβρίου 2006. Επιλέχθηκε μία μέρα με διακύμανση στην ηλιακή ακτινοβολία για να εξεταστεί η επίδραση της στα χαρακτηριστικά λειτουργίας της μονάδας ΑΩ. Παρατηρείται ότι η παραγωγή της ηλεκτρικής ισχύος από τη Φ/Β συστοιχία ξεκινάει στις 8:40 με ένταση ηλιακής ακτινοβολίας  $185 \text{ W/m}^2$  (σημείο Α) και τερματίζεται στις 15:40 με την ίδια τιμή της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας.

Στην Εικόνα 3-56 απεικονίζονται τις πιέσεις της μονάδας ΑΩ (πίεση αντλίας τροφοδοσίας, πίεση εισόδου της μεμβράνης και πίεση της άλμης) καθώς και ένα πολύ σημαντικό στοιχείο της αντλίας Clark που είναι η σταδιακή μείωση της πίεσης της μεμβράνης μετά τη διακοπή λειτουργίας της αντλίας τροφοδοσίας. Η ξαφνική διακοπή της υψηλής πίεσης της αντλίας Clark καταπονεί τις μεμβράνες και μειώνει σημαντικά το χρόνο ζωής τους όπως αναφέρει η κατασκευαστική εταιρία DOW, (2004). Επίσης τα δεδομένα στην Εικόνα 3-56 και με την εφαρμογή της εξίσωσης 2-26, ο μηχανικός βαθμός απόδοσης της αντλίας Clark υπολογίστηκε και βρέθηκε κατά μέσο όρο 86%, όπως αναφέρουν ο Mohamed, et al., (2008).

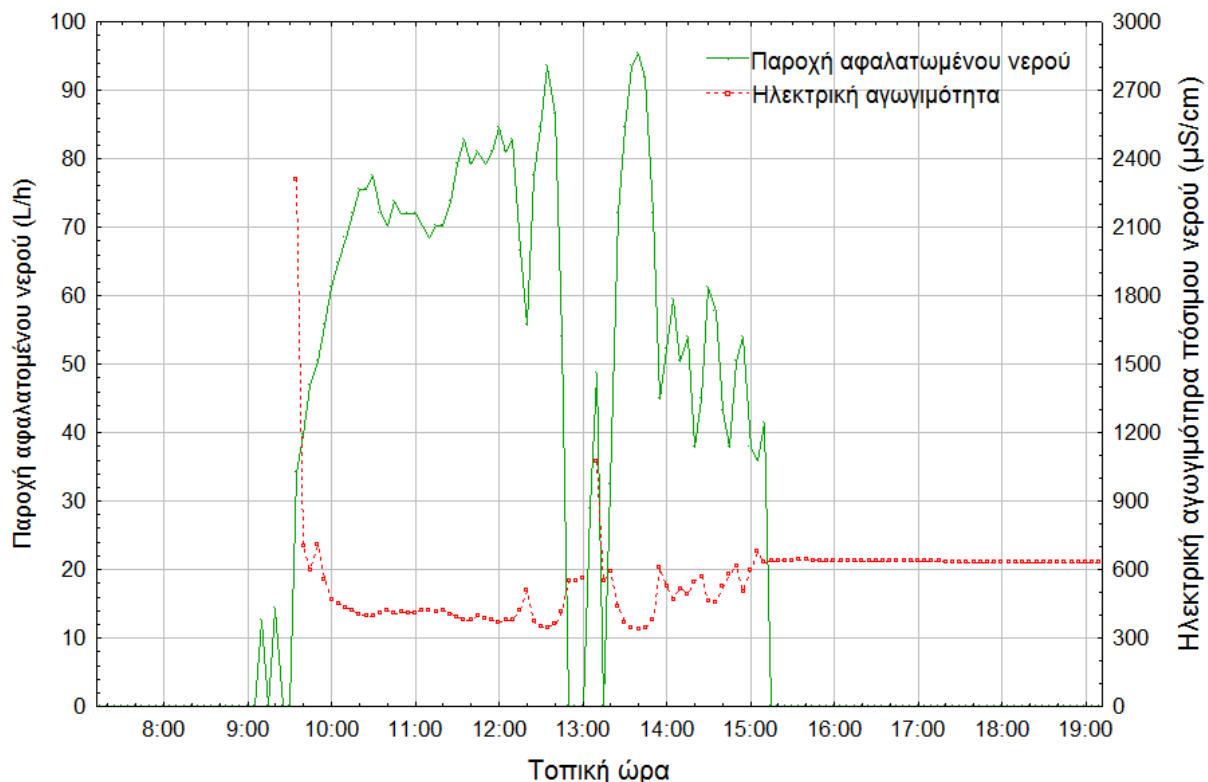


Εικόνα 3-55: Η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία και η παραγόμενη ισχύ από τα Φ/Β πλαίσια



Εικόνα 3-56: Οι πιέσεις της μονάδας ΑΩ

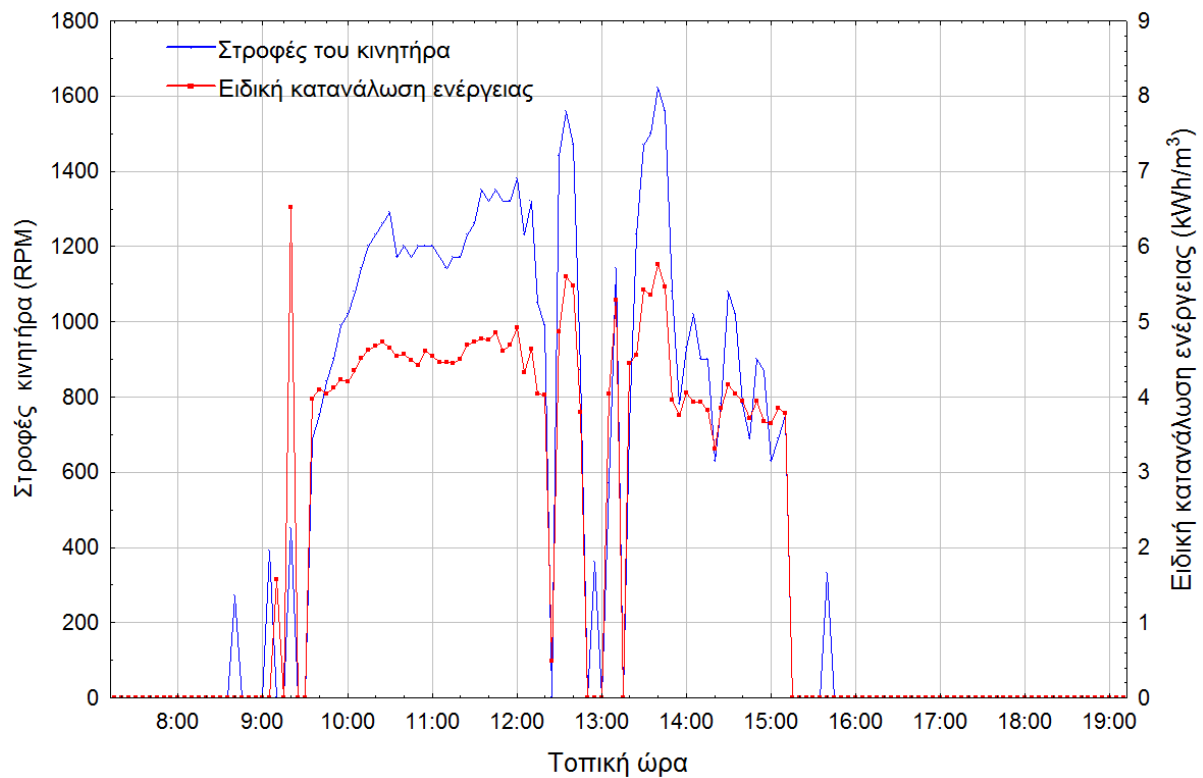
Ένα σημαντικό πρόβλημα της εφαρμογής της απευθείας σύνδεσης των Φ/Β συστημάτων με μονάδες ΑΩ είναι η αβεβαιότητα της παροχής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του αφαλατωμένου νερού. Στην Εικόνα 3-57 παρουσιάζονται δεδομένα της παροχής και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του αφαλατωμένου νερού. Παρατηρείται ότι παρά τις μεταβλητές συνθήκες λειτουργίας, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού κυμαίνεται μεταξύ 360 και 650  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Παρατηρείται επίσης διακύμανση της παροχής του αφαλατωμένου νερού η οποία μπορεί να εξισορροπηθεί από τη πλευρά της κατανάλωσης με δεξαμενές αποθήκευσης του αφαλατωμένου νερού



Εικόνα 3-57: Παροχή και ποιότητα πόσιμου νερού

Στην Εικόνα 3-58, παρουσιάζεται η ειδική κατανάλωση ενέργειας που σε αυτή την περίπτωση κυμαίνεται μεταξύ 3.2 – 5.8  $\text{kWh}/\text{m}^3$ . Παρατηρείται επίσης στην Εικόνα 3-58 ότι οι περιοχές όπου ο κινητήρας στρέφεται αλλά δεν καταγράφεται ειδική κατανάλωση ενέργειας, είναι οι περιοχές όπου δεν παράγει η μονάδα ΑΩ νερό αλλά ταυτόχρονα όμως υπάρχει κατανάλωση ενέργειας από το κινητήρα. Σε αυτή την περίπτωση η αντλία τροφοδοσίας απλά κυκλοφορεί το νερό τροφοδοσίας προς τη μεμβράνη και δεν πραγματοποιείται η διαδικασία της αφαλάτωσης μέχρι η πίεση λειτουργίας να ξεπεράσει την ωσμωτική πίεση του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας.

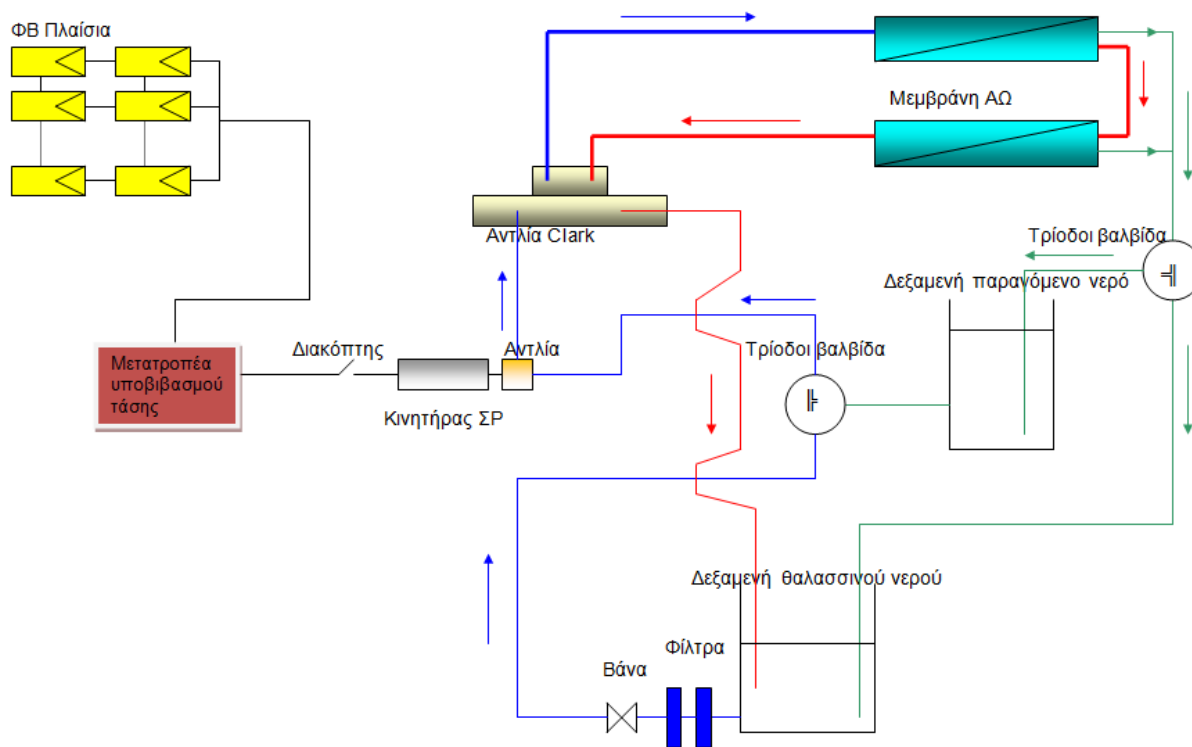




Εικόνα 3-58: Στροφές κινητήρα και ειδική κατανάλωση ενέργειας

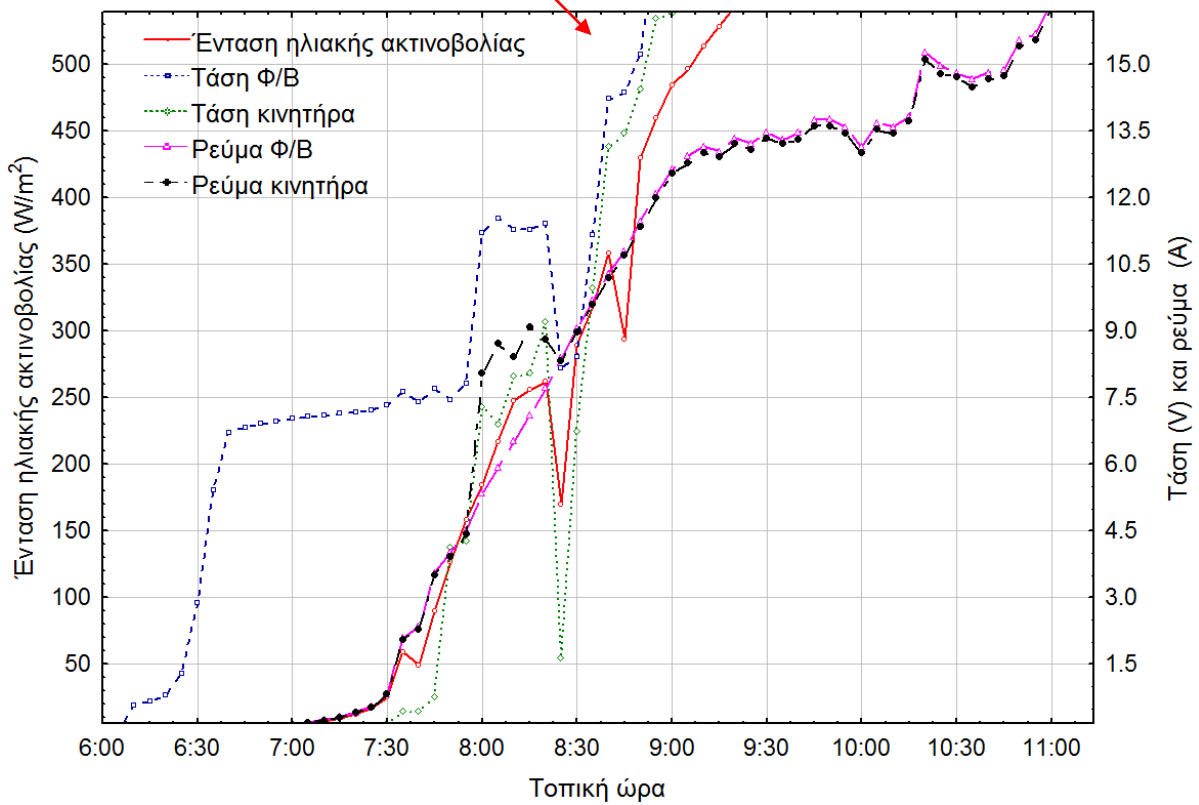
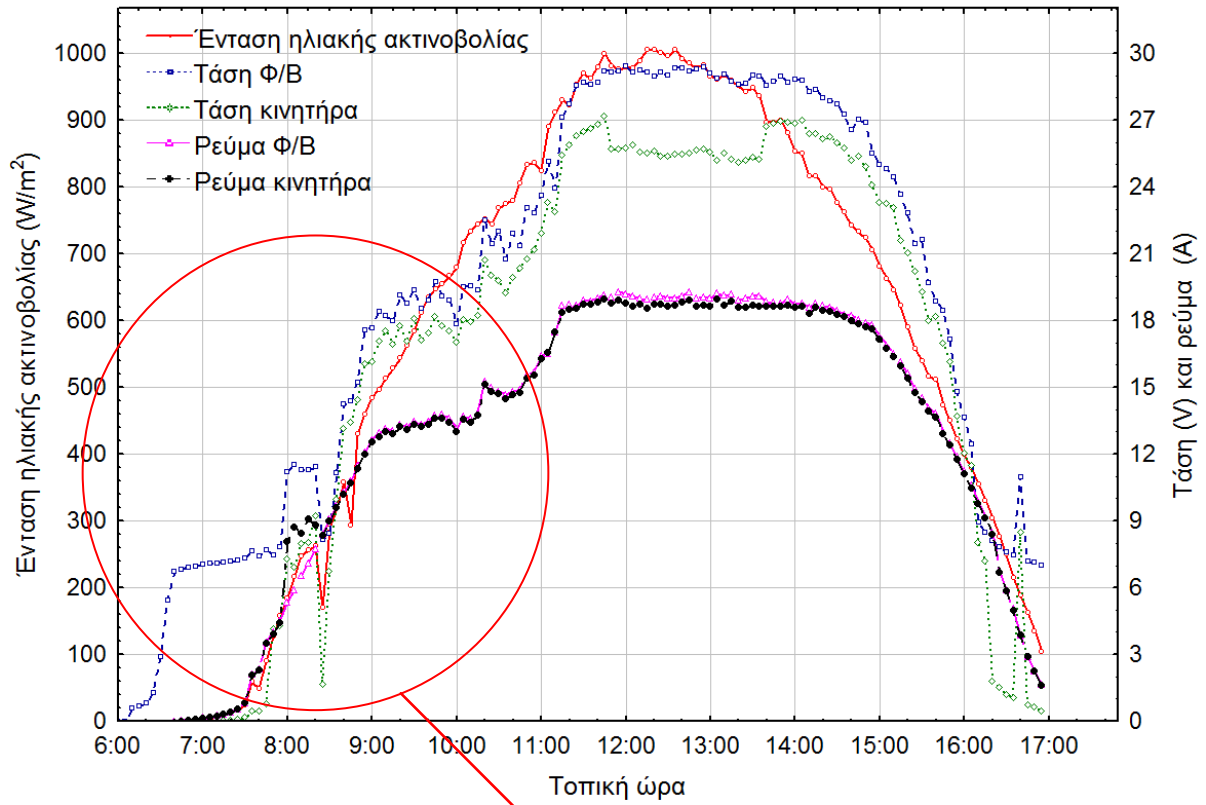
### 3.12 Λειτουργία της μονάδας ΑΩ με απευθείας σύνδεση της Φ/Β συστοιχίας μέσω μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

Σε αυτή τη συνδεσμολογία, (βλέπε Εικόνα 3-59), η Φ/Β συστοιχία συνδέεται με τον κινητήρα της αντλίας τροφοδοσίας της μονάδας ΑΩ μέσω του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, ο οποίος αυξάνει το ρεύμα του κινητήρα μειώνοντας την τάση του. Με αυτόν τον τρόπο ο κινητήρας ξεκινά νωρίτερα την λειτουργία του το πρωί και σταματά αργότερα κατά τη δύση του ηλίου.



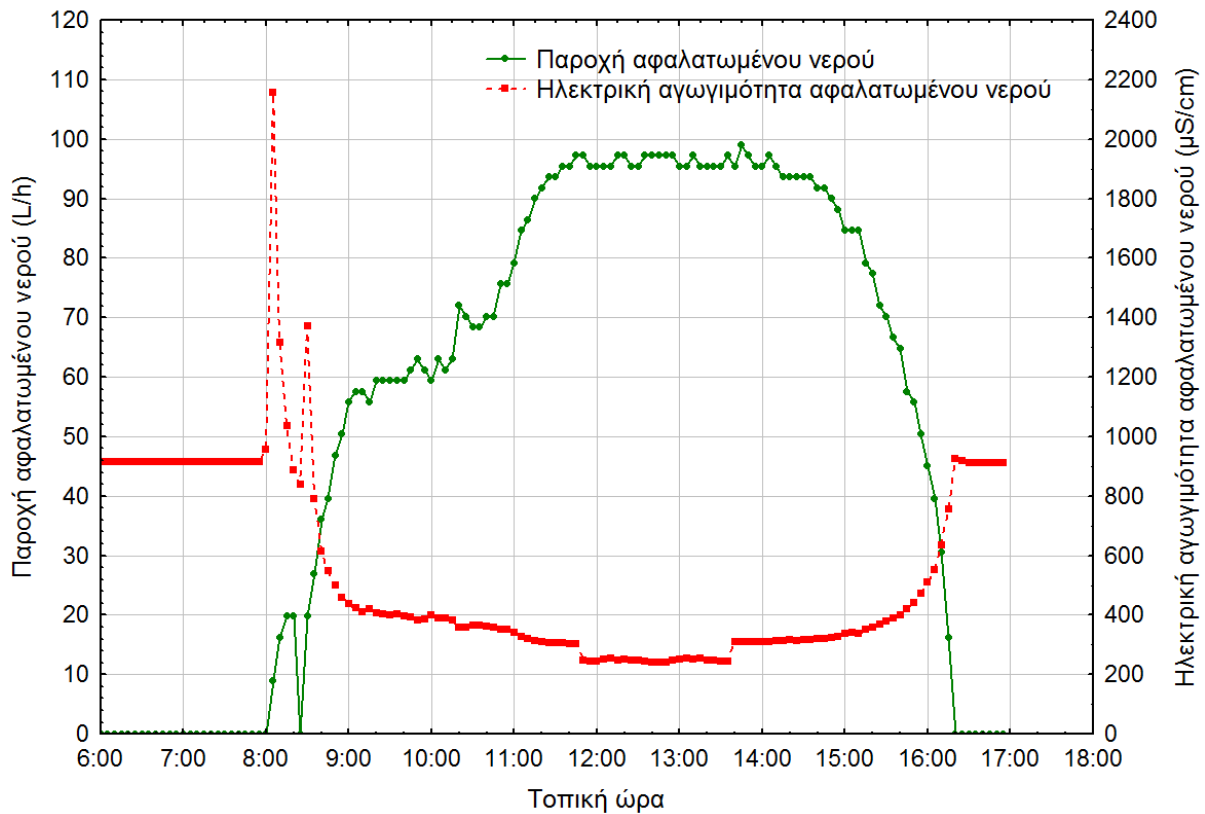
Εικόνα 3-59: Απευθείας σύνδεσης της μονάδας ΑΩ με το Φ/Β συστοιχία μέσω μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

Στην Εικόνα 3-60, παρατηρείται η μείωση της τάσης και η αύξηση του ρεύματος του κινητήρα μέχρι να ξεκινήσει κανονικά ο κινητήρας. Το πλεονέκτημα του μετατροπέα εμφανίζεται στις ώρες όπου υπάρχει χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία (στην ανατολή και δύση του ηλίου καθώς και όταν υπάρχει συννεφιά). Στις υπόλοιπες ώρες απλά η ενέργεια της Φ/Β συστοιχίας μεταφέρεται στον κινητήρα, μειωμένη όμως λόγω των απωλειών του μετατροπέα. (Βαθμός απόδοσης μετατροπέα 85%).



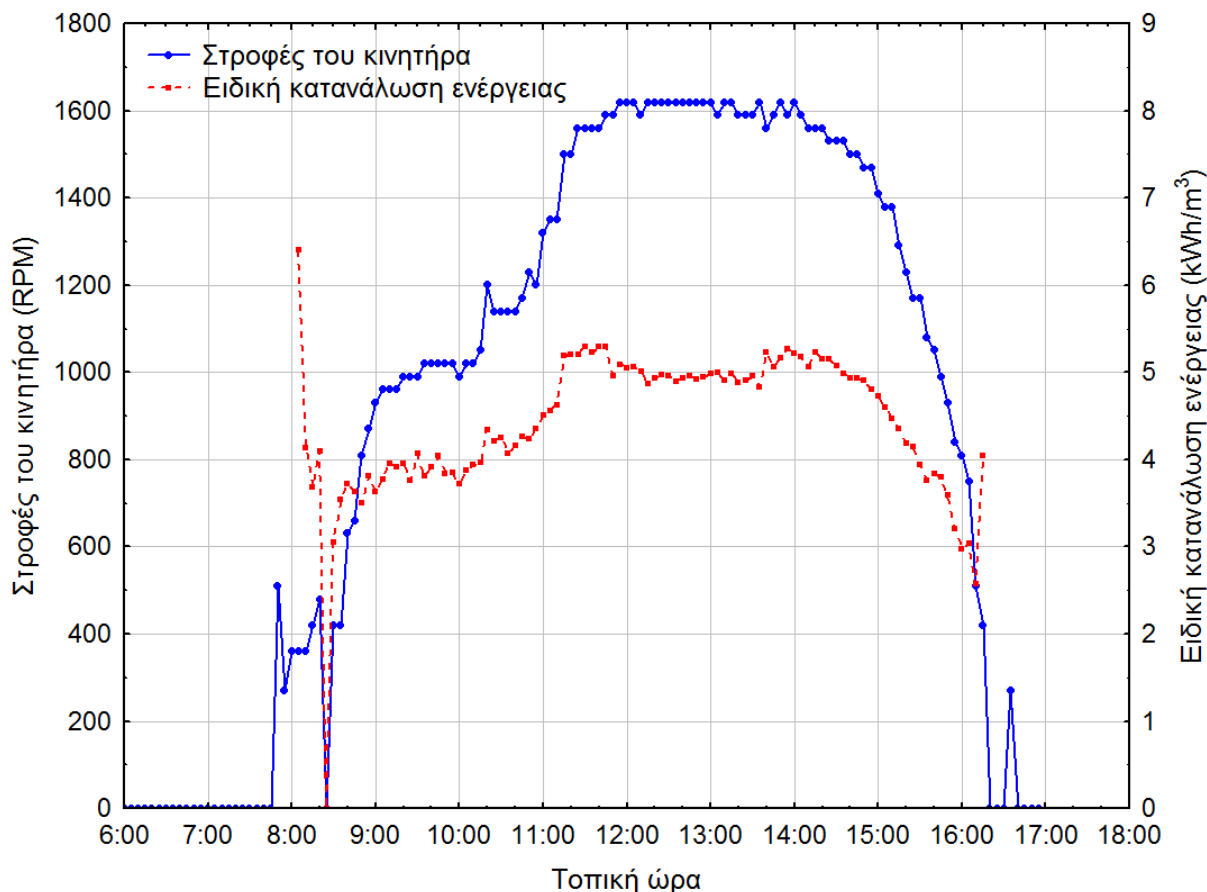
Εικόνα 3-60: Ρεύματα και τάσεις του Φ/Β και το κινητήρα

Στην Εικόνα 3-61 παρουσιάζεται η παροχή και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού. Παρατηρείται ότι η μονάδα ΑΩ ξεκινάει την παραγωγή αφαλατωμένου νερού στις 8:10 με ηλεκτρική αγωγιμότητα 2150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Στις 8:35 παράγεται αφαλατωμένο νερό με ηλεκτρική αγωγιμότητα 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  και η παραγωγή σταματά στις 16:20.



Εικόνα 3-61: Παροχή και ηλεκτρική αγωγιμότητα αφαλατωμένου νερού

Στην Εικόνα 3-62 απεικονίζεται η ειδική κατανάλωση ενέργειας καθώς και οι στροφές του κινητήρα της μονάδας ΑΩ. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας σε αυτήν την τοπολογία κυμαίνεται μεταξύ 2.5 – 5.3  $\text{kWh}/\text{m}^3$ . Παρατηρείται επίσης στην Εικόνα 3-62 ότι ο κινητήρας ξεκινάει να στρέφεται στις 7:40 και σταματάει να περιστρέφεται στις 16:30.

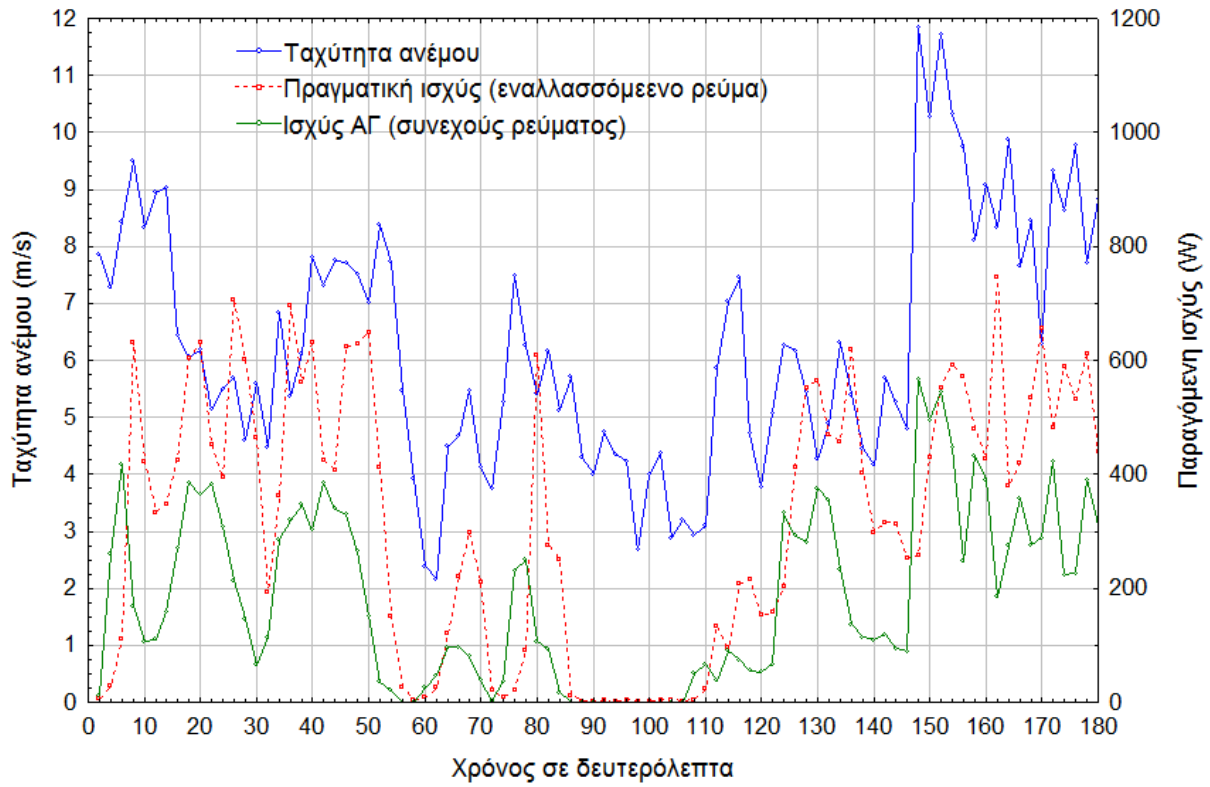


Εικόνα 3-62: Στροφές κινητήρα και ειδική κατανάλωση ενέργειας της μονάδας ΑΩ

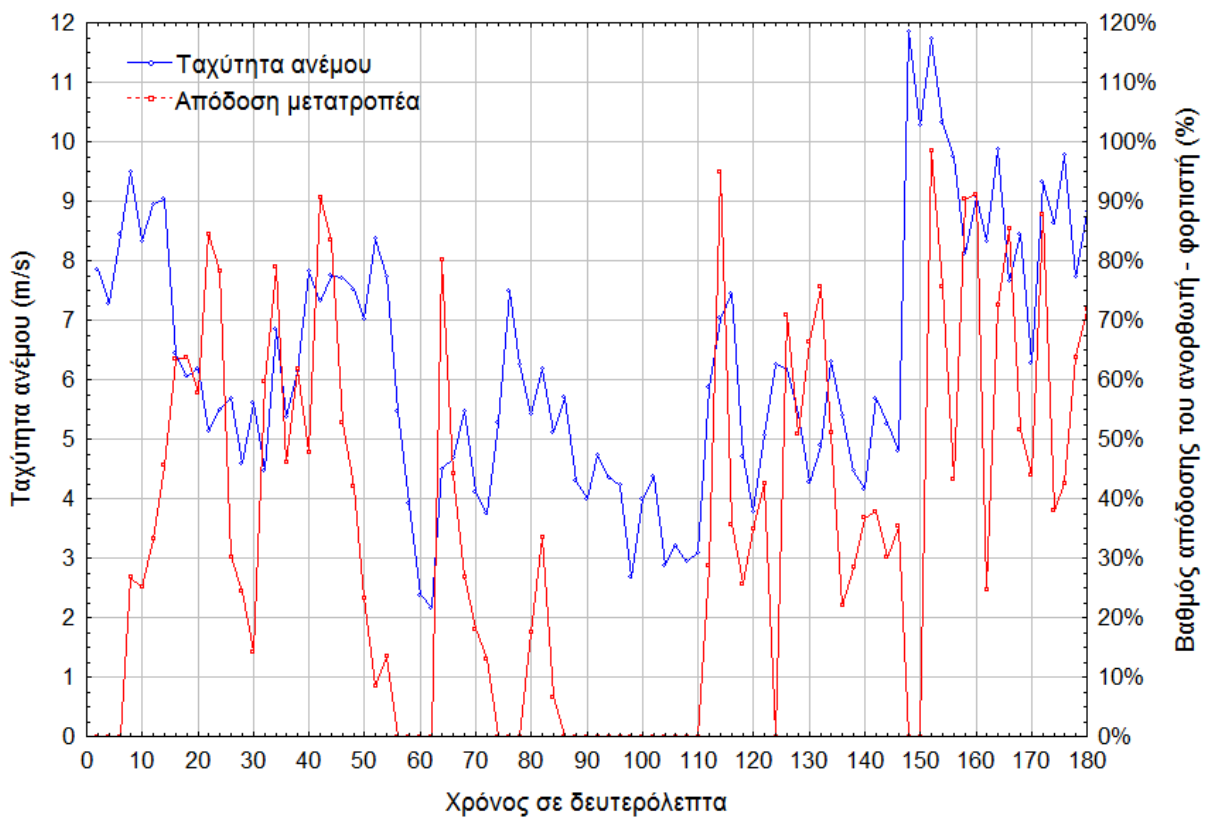
### 3.13 Λειτουργία της μονάδας ΑΩ με ανεμογεννήτρια και συσσωρευτές

Η χρήση μιας ανεμογεννήτριας σε συνδυασμό με μονάδες αφαλάτωσης με ΑΩ απαιτεί υψηλό αιολικό δυναμικό στην περιοχή εγκατάστασης του συστήματος, κάτι το οποίο δεν υπάρχει στην Αθήνα (μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 3.5 m/s). Η μεγάλη διακύμανση στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις ανεμογεννήτριες επιβάλλει την χρήση συσσωρευτών για την εξισορρόπηση της παραγόμενης ισχύος, για αυτόν το λόγο δεν έγινε πειραματική διερεύνηση της απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας με τη μονάδα ΑΩ.

Στην Εικόνα 3-63, παρουσιάζεται η ενεργειακή παραγωγή της ανεμογεννήτριας σε μια μέρα κατά την οποία η μέση ταχύτητα του ανέμου μετρήθηκε σε 5.5 m/s. Μετρήθηκε η πραγματική τριφασική εναλλασσόμενη ισχύς πριν τον μετατροπέα/φορτιστή και η αντίστοιχη ισχύς συνεχούς ρεύματος μετά από αυτόν, ενώ στην Εικόνα 3-64 φαίνεται ο υπολογισμένος βαθμός απόδοσης του μετατροπέα/ φορτιστή που κυμάνθηκε μεταξύ 40 και 80% ανάλογα με τη ταχύτητα του ανέμου και την απομάκρυνση της παραγόμενης ισχύος από την ονομαστική του μετατροπέα (1000 W).



Εικόνα 3-63: Ισχύς της ανεμογεννήτριας



Εικόνα 3-64: Βαθμός απόδοσης του μετατροπέα/φορτιστή της ανεμογεννήτριας

### 3.14 Συγκέντρωση και συζήτηση των αποτελεσμάτων

Για την τεκμηριωμένη επιλογή της πιο κατάλληλης τοπολογίας, συγκεντρώθηκαν τα πιο σημαντικά αποτελέσματα της πειραματική διερεύνησης των συστημάτων στον πίνακα 3-22, όπου φαίνεται ότι η απευθείας σύνδεση της μονάδας ΑΩ με τα Φ/Β έχει την μικρότερη ειδική κατανάλωση ενέργειας καθώς και την μεγαλύτερη αξιοποίηση της Φ/Β ενέργειας χωρίς αυτό να είναι σε βάρος της ποιότητας του παραγόμενου νερού (ηλεκτρική αγωγιμότητα). Το συμβατικό σύστημα ΑΩ έχει την μεγαλύτερη ειδική κατανάλωση ενέργειας και έχει όμως και την χαμηλότερη τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του αφαλατωμένου νερού. Από τη στιγμή εντούτοις, που όλες οι τοπολογίες παράγουν αφαλατωμένο νερό με αποδεκτή ποιότητα, τότε το κριτήριο της αποδοτικότητας και της κατανάλωσης ενέργειας είναι αυτό που καθορίζει την επιλογή της βέλτιστης συνδεσμολογίας.

Πίνακας 3-22: Συγκέντρωση των αποτελεσμάτων

|   | Συμβατικό | Με<br>συσσωρευτές | Απευθείας<br>σύνδεσης | Απευθείας<br>μέσω<br>μετατροπέα<br>ΣΡ/ΣΡ |
|---|-----------|-------------------|-----------------------|--|
| Ειδική κατανάλωση ενέργειας<br>(μέσος όρος) (kWh.m <sup>3</sup> )                                       | 20        | 4.7               | 4.1                   | 4.5                                      |
| Απόδοση χρήσης της Φ/Β<br>ενέργειας (ενέργεια του<br>κινητήρα προς την ενέργεια<br>της ΦΒ συστοιχίας %) | -         | 65%               | 98%                   | 85%                                      |
| Ηλεκτρική αγωγιμότητα<br>νερού (μS/cm)  | 380       | 400               | 500                   | 500                                      |

### 3.15 Συμπεράσματα

- Ο σχεδιασμός των μονάδων ΑΩ βασίζεται κυρίως στα λογισμικά σχεδιασμού και προσομοίωσης των κατασκευαστικών εταιριών των μεμβρανών.
- Ένα μεγάλο μειονέκτημα των συμβατικών μονάδων ΑΩ (χωρίς συσκευή ανάκτησης) είναι η μεγάλη ειδική κατανάλωση ενέργειας που φτάνει τα 20 kWh/m<sup>3</sup>.

- Η προσθήκη συσκευής ανάκτησης ενέργειας σε μικρές μονάδες ΑΩ μπορεί να μείωση δραστικά την καταναλισκόμενη ενέργεια, μειώνοντας ταυτόχρονα και το κόστος του παραγόμενου νερού.
- Ο σχεδιασμός των συστημάτων ΑΠΕ για καλύψει των ενεργειακών αναγκών των μονάδων ΑΩ, μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορα υπολογιστικά πακέτα όπως ο ΟΜΗΡΟΣ.
- Η λεπτομερής μελέτη του κινητήρα ΣΡ προσέφερε αξιόλογες πληροφορίες όπως τον πραγματικό βαθμό απόδοσης, ενώ προσδιορίστηκαν οι σχέσεις μεταξύ της κατανάλωσης ρεύματος, ροπής και στροφών του κινητήρα.
- Οι μεταβλητές συνθήκες λειτουργίας τις μονάδες ΑΩ δεν επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα (συγκέντρωση των αλάτων) και τη συνολική παραγόμενη ποσότητα του αφαλατωμένου νερού καθώς ο μέσος όρος παραμένει μέσα στα όρια των προδιαγραφών του πόσιμου νερού.
- Ο ολικός βαθμός απόδοσης των μονάδων ΑΩ εξαρτάται από την ύπαρξη συσκευής ανάκτησης ενέργειας ή όχι. Οι συμβατικές μονάδες ΑΩ απορρίπτουν περίπου 85 – 90% της καταναλισκόμενης ενέργειας, ενώ η χρήση συσκευής ανάκτησης ενέργειας ανακτά ένα μεγάλο ποσοστό από αυτή την απορριπτόμενη ενέργεια αυξάνοντας έτσι τον συνολικό βαθμό απόδοσης των μονάδων ΑΩ.
- Η χρήση συσσωρευτών προσφέρει σταθερές συνθήκες λειτουργίας στη μονάδα ΑΩ αλλά ταυτόχρονα αυξάνει το ποσοστό της ενέργειας που χάνεται λόγω φόρτισης εκφόρτισης των συσσωρευτών.
- Η απευθείας σύνδεση της μονάδας ΑΩ με τη Φ/Β συστοιχία προσφέρει την καλύτερη χρήση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα Φ/Β στοιχεία λόγω μείωσης των απωλειών.
- Η χρήση ενός μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ μπορεί να βελτιώνει τις συνθήκες εκκίνησης των μονάδων ΑΩ, όμως η χαμηλή απόδοση του μετατροπέα μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη σπατάλη της ενέργειας κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας.
- Η χρήση ανεμογεννήτριας προϋποθέτει τοποθεσία με υψηλό αιολικό δυναμικό και χρήση συσσωρευτών. Η απευθείας σύνδεση της ανεμογεννήτριας με μονάδες ΑΩ είναι τεχνικά δύσκολη λόγω της αστάθειας της παραγόμενης ενέργειας.





## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:**

# **ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**



## 4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα καινούρια μοντέλα που αναπτύχθηκαν με σκοπό την αξιοποίησή τους για την προσομοίωση εγκαταστάσεων αντίστροφης ώσμωσης σε περιβάλλον λογισμικού TRNSYS. Το λογισμικό TRNSYS κρίθηκε κατάλληλο για την προσομοίωση σύνθετων ενεργειακών συστημάτων λόγω της αρθρωτής δομής των μοντέλων που αναπτύσσονται και της μεγάλης βιβλιοθήκης μετεωρολογικών δεδομένων που διαθέτει.

Πραγματοποιείται προσομοίωση των διαφόρων τοπολογιών του συστήματος με σκοπό τη χρήση των αποτελεσμάτων στην επιλογή της βέλτιστης τοπολογίας του συστήματος, επίσης και στην οικονομική ανάλυση του επόμενου κεφαλαίου. Παρουσιάζεται επίσης σύγκριση των πειραματικών δεδομένων του προηγούμενου κεφαλαίου με τα αποτελέσματα της εφαρμογής των μοντέλων που αναπτύχθηκαν καθώς και την εφαρμογή του συνολικού μοντέλου.

### 4.2 Το λογισμικό TRNSYS ως εργαλείο δυναμικής προσομοίωσης

Το TRNSYS είναι ένα λογισμικό που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση και το σχεδιασμό διαφόρων ενεργειακών συστημάτων. Η βασική ιδέα του TRNSYS είναι ότι αντί να αναπτυχθεί κάθε φορά καινούριο πρόγραμμα προσομοίωσης για ένα σύστημα, συνθέτονται διάφορα επιμέρους υποπρογράμματα που αντιπροσωπεύουν τα διάφορα μέρη του συστήματος προσφέροντας έτσι την δυνατότητα να μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν σε μια νέα σύνθεση η οποία να προσομοιώνει κάποιο άλλο σύστημα.

Τα υποπρογράμματα αυτά του TRNSYS, είναι γραμμένα σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN τα οποία καλούνται Types και χαρακτηρίζονται από ένα μοναδικό αριθμό π.χ Type 94 είναι ένα έτοιμο υποπρόγραμμα του TRNSYS για προσομοίωση και σχεδιασμό φωτοβολταϊκών συστημάτων. Τα υποπρογράμματα αυτά συνήθως αντιστοιχούν σε φυσικά μέρη ή εξαρτήματα τα οποία συναντά κανείς σε συστήματα (αντλίες, ανεμογεννήτριες κλπ.) αλλά μπορούν επίσης να είναι αναγνώστες δεδομένων (Data reader) ή επεξεργαστές της ηλιακής ακτινοβολίας (Solar radiation processor) ή εκτυπωτές ή άλλα εξαιρετικά χρήσιμα στην ίδια την λειτουργία του TRNSYS (Utility subroutine).

Κάθε υποπρόγραμμα του TRNSYS έχει ένα σύνολο εισόδων (Inputs) και ένα σύνολο εξόδων (Outputs) ώστε να λαμβάνουν και να στέλνουν πληροφορίες σε άλλα

υποπρογράμματα. Οι πληροφορίες αυτές αντιστοιχούν συχνά σε φυσικά μεγέθη που ανταλλάσσουν μεταξύ τους τα πραγματικά τμήματα του συστήματος προς μοντελοποίηση. Επίσης, τα λειτουργικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες καθορίζονται για κάθε υποπρόγραμμα από ένα σύνολο παραμέτρων (Parameters). Η σύνθεση των απαραίτητων υποπρογραμμάτων για την προσομοίωση ενός συστήματος γίνεται σε ένα αρχείο εισόδου (Input file) το οποίο καθορίζει την σειρά με την οποία το TRNSYS θα καλέσει τα αντίστοιχα υποπρογράμματα. Όποιες αλλαγές έχουμε στο σύστημα, αυτές απλά πρέπει να αποτυπωθούν σε αυτό το αρχείο εισόδου.

Εξάλλου σε ένα σύστημα μπορεί ένα εξάρτημά του να επαναλαμβάνεται περισσότερες από μια φορές. Το ίδιο πρέπει να συμβεί και στο αρχείο εισόδου του TRNSYS με το αντίστοιχο υποπρόγραμμα. Για να είναι δυνατό αυτό, τα υποπρογράμματα σε ένα αρχείο εισόδου αντιστοιχίζονται σε ένα μοναδικό αριθμό αναγνώρισης (Unit number) π.χ unit 1 Type 90 είναι η πρώτη ανεμογεννήτρια και σε περίπτωση που υπάρχει και δεύτερη θα είναι unit 2 Type 90.

Φυσικά μια προγραμματιστική μηχανή προσομοίωσης όπως το TRNSYS δεν θα μπορούσε να μην περιλαμβάνει και ένα μεγάλο αριθμό υποπρογραμμάτων που αφορούν τον έλεγχο και την επίβλεψη της προσομοίωσης. Όλα αυτά τα υποπρογράμματα αλλά και αυτά που αναφέραμε παραπάνω μεταγλωττίζονται και συνενώνονται σε μια δυναμική βιβλιοθήκη (Dinamic Link Library DLL), την Trnlib.dll. Αυτή η βιβλιοθήκη καλείται από ένα εκτελέσιμο πρόγραμμα το Trnsys.exe, που ελέγχει την διαδικασία της προσομοίωσης μέσω ενός λειτουργικού συστήματος σαν τα Windows.

Το TRNSYS τρέχει σε προκαθορισμένα από τον χρήστη βήματα εικονικού χρόνου (time steps) ώστε να προσομοιώσει την λειτουργία του συστήματος σε σχέση με τον πραγματικό χρόνο. Στην διάρκεια κάθε χρονικού βήματος το TRNSYS καλεί ένα ή περισσότερα υποπρόγραμμα. Το TRNSYS έχει ένα εσωτερικό ρολόι και χειρίζεται μόνο του τον χρόνο ως μεταβλητή.

Το μεγάλο πλεονέκτημα του TRNSYS είναι πρώτα από όλα η αρθρωτή δομή του που το κάνει κατάλληλο για εύκολη χρήση σε πάρα πολλά πολύπλοκα συστήματα. Δεύτερο πλεονέκτημα αποτελούν οι δυνατότητες που δίνει μέσα από μια μεγάλη βιβλιοθήκη για την προσομοίωση σύνθετων συστημάτων. Ένα τρίτο πλεονέκτημα αφορά στην δυνατότητα προσθήκης ενός καινούριου υποπρογράμματος στη βιβλιοθήκη και η χρήση της μαζί με τα έτοιμα υποπρογράμματα. Το τέταρτο πλεονέκτημα, αφορά τη χρήση του TRNSYS έκδοση 16 και συνίσταται στην ευκολία δημιουργίας του αρχείου εισόδου με χρήση του γραφικού εργαλείου (Simulation Studio), όπου κάθε υποπρόγραμμα τοποθετείται στο αρχείο εισόδου του TRNSYS από ένα μενού που περιλαμβάνει τα διάφορα υποπρογράμματα.

Η βιβλιοθήκη του TRNSYS δεν περιλαμβάνει όλα τα εξαρτήματα του υβριδικού συστήματος που μελετάται στα πλαίσια της παρούσας έρευνας, όπως για παράδειγμα η

μεμβράνη αντίστροφης ώσμωσης, η αντλία Clark και το αντλήτικο σύστημα (κινητήρα και αντλία). Τα υποπρογράμματα αυτά αναπτύχθηκαν σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και εγκαταστάθηκαν στη δυναμική βιβλιοθήκη (Dinamic Link Library DLL Trnlib.dll) και λειτουργούν μαζί με τα έτοιμα μοντέλα του TRNSYS.

#### 4.3 Ανάπτυξη μοντέλου μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης

Το TRNSYS δεν διαθέτει μοντέλο για προσομοίωση της μεμβράνης και για αυτό το σκοπό αναπτύχθηκε ένα νέο μοντέλο της μεμβράνης ΑΩ (βλέπε παράρτημα 1) ΑΩ που βασίζεται κυρίως στα πειραματικά αποτελέσματα λειτουργίας της μεμβράνης και στις θεωρητικές αρχές της επίδρασης της θερμοκρασίας και της πίεσης εισόδου του νερού τροφοδοσίας στην ροή του αφαλοκομμένου νερού και των αλάτων. Η προσομοίωση της μεμβράνης πραγματοποιήθηκε με τις εξής υποθέσεις:

- Χρησιμοποιούνται οι χαρακτηριστικές τιμές της μεμβράνης που δίδονται από τον κατασκευαστή όπως, το ποσοστό απόρριψης των αλάτων, η βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας της μεμβράνης και η πτώση πίεσης δια των μεμβρανών.
- Εφαρμόζονται οι εξισώσεις του κατασκευαστή που περιγράφουν την επίδραση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας στη ροή του αφαλατωμένου νερού και στη απόρριψη των αλάτων.
- Οι δύο μεμβράνες της μονάδας ΑΩ θεωρούνται ως ένα σύνολο όπου το θαλασσινό νερό τροφοδοσίας εισέρχεται στην πρώτη μεμβράνη, ενώ η άλμη και το αφαλατωμένο νερό εξέρχονται από την δεύτερη μεμβράνη.
- Η πτώση στην πίεση δια της μεμβράνης συμπεριλαμβάνει και τυχόν άλλες πτώσεις στην πίεση στις σωληνώσεις.

##### 4.3.1 Υπολογισμός της ροής του αφαλατωμένου νερού

Η ροή του αφαλατωμένου νερού είναι ευθέως ανάλογη με την πίεση εισόδου όπως αυτό έχει περιγραφεί από την εξίσωση 4-1 και από τα πειραματικά δεδομένα που συλλέχτηκαν (βλέπε Εικόνα 3-17). Η πρώτη φάση στο μοντέλου είναι η ταυτοποίηση αυτής της γραμμικής σχέσης εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων για να προσδιοριστούν οι συντελεστές  $a_0$  και  $a_1$  της γραμμικής συσχέτισης της εξίσωσης:

$$Q_p = (a_1 P_h + a_0) \times T_{cf} \quad 4-1$$

Όπου  $Q_p$  είναι η παροχή του αφαλατωμένου νερού [L/h],  $P_h$  είναι η πίεση εισόδου της μεμβράνης [bar],  $\alpha_0$  και  $\alpha_1$  είναι οι συντελεστές της γραμμικής συσχέτισης και το  $T_{cf}$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας [-]. Ο συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας αναφέρεται στην επίδραση της θερμοκρασίας στην παροχή του αφαλατωμένου νερού, όπως αυτό περιγράφεται στην εξίσωση 4-2

$$T_{CF} = EXP \left[ 2640 \left( \frac{1}{T_0 + 273.15} - \frac{1}{T_1 + 273.15} \right) \right], T \geq 25^\circ C$$

$$T_{CF} = EXP \left[ 3020 \left( \frac{1}{T_0 + 273.15} - \frac{1}{T_1 + 273.15} \right) \right], T \leq 25^\circ C \quad 4-2$$

Όπου  $T_0$  είναι η θερμοκρασία αναφοράς του νερού τροφοδοσίας η οποία είναι μια σταθερή τιμή για κάθε μεμβράνη [°C],  $T_1$  είναι η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας [°C].

#### 4.3.1.1 Υπολογισμός της πίεσης και της ροής της άλμης

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας, η πίεση εισόδου της μεμβράνης (θαλασσινού νερού) θα ισούται με την πίεση εξόδου (άλμης και αφαλατωμένου νερού) μείον τις απώλειες πίεσης λόγω τριβών στο υλικό της μεμβράνης και λόγω χρήσης διαφόρων υδραυλικών εξαρτημάτων. Επιπλέον, η πίεση του αφαλατωμένου νερού είναι σχεδόν αμελητέα σε σχέση με την πίεση εισόδου. Άρα η πίεση της άλμης μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση 4-3

$$P_b = P_h - dP \quad 4-3$$

Όπου  $P_b$  είναι η πίεση της άλμης [bar],  $P_h$  [bar] είναι η πίεση εισόδου της μεμβράνης και  $dP$  είναι η διαφορά πίεσης λόγω τριβών [bar]. Για τη ροή της άλμης χρησιμοποιείται η εξίσωση 2-1 (αρχή διατήρησης της μάζας) που έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 2.

#### 4.3.2 Υπολογισμός του συντελεστή ανάκτηση του αφαλατωμένου νερού

Ο συντελεστής ανάκτησης αφαλατωμένου νερού  $R$  (%) έχει προαναφερθεί στο κεφάλαιο 2, εξίσωση 2-2, και είναι μια χαρακτηριστική τιμή για κάθε μεμβράνη ΑΩ.

### 4.3.3 Υπολογισμός της συγκέντρωσης των αλάτων στο αφαλατωμένο νερό

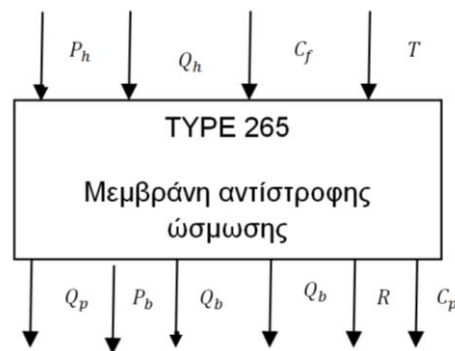
Η συγκέντρωση των αλάτων στο αφαλατωμένο νερό υπολογίζεται από την εξίσωση 4-4 της DOW, (2004) ως εξής:

$$C_p = C_f \times (1 - S_R) \times T_{cf} \times \left( \frac{55}{P_h} \right) \quad 4-4$$

Όπου  $C_p$  είναι η συγκέντρωση των αλάτων στο αφαλατωμένο νερό [ppm],  $C_f$  είναι η συγκέντρωση των αλάτων στο νερό τροφοδοσίας [ppm],  $S_R$  είναι το ποσοστό απόρριψης των αλάτων [-] που είναι μια χαρακτηριστική τιμή της μεμβράνης και δίδεται από τον κατασκευαστή,  $T_{cf}$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας [-],  $P_h$  είναι η πίεση εισόδου της μεμβράνης [bar] και η σταθερά 55 είναι η πίεση εισόδου αναφοράς της μεμβράνης που φαίνεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά της μεμβράνης [bar].

Στην

Εικόνα 4-1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής των πληροφοριών του μοντέλου της μεμβράνης, δηλαδή είσοδοι (inputs) που μεταβάλλονται με το χρόνο και έξοδοι (outputs) ή αποτελέσματα του μοντέλου. Ενώ οι παράμετροι, είσοδοι και έξοδοι του μοντέλου περιγράφονται αναλυτικά στον πίνακα 4-2.



Εικόνα 4-1: Διάγραμμα ροής πληροφοριών της μεμβράνης ΑΩ



Πίνακας 4-1: Παράμετροι, είσοδοι και έξοδοι του μοντέλου της μεμβράνης ΑΩ

| <b>Αριθμός Παραμέτρου</b> | <b>Σύμβολο</b> | <b>Περιγραφή</b>                                      |
|---------------------------|----------------|---|
| 1                         | $a_1$          | Ο συντελεστής της $P_h$ της συνάρτησης $Q_p = f(P_h)$ |
| 2                         | $a_0$          | Ο συντελεστής της συνάρτησης $Q_p = f(P_h)$           |
| 3                         | $dP$           | Ανάκτηση αφαλατωμένου νερού (%)                       |
| 4                         | $S_R$          | Ποσοστό απόρριψης των αλάτων (%)                      |
| 5                         | $T_0$          | Θερμοκρασία αναφοράς (°C)                             |

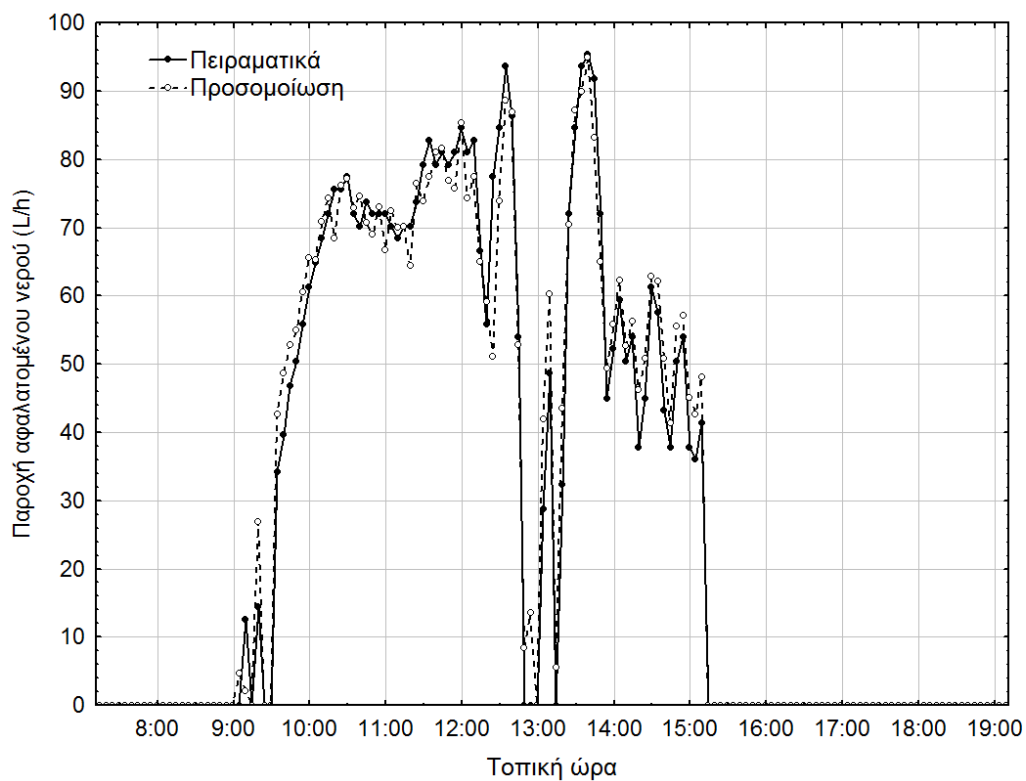
| <b>Αριθμός Εισόδου</b> | <b>Σύμβολο</b> | <b>Περιγραφή</b>  |
|------------------------|----------------|---|
| 1                      | $P_h$          | Πίεση εισόδου στη μεμβράνη (bar)                        |
| 2                      | $Q_h$          | Παροχή θαλασσινού νερού τροφοδοσίας της μεμβράνης (L/h) |
| 3                      | $C_f$          | Συγκέντρωση αλάτων στο θαλασσινό νερό τροφοδοσίας (ppm) |
| 4                      | $T_1$          | Θερμοκρασία νερού τροφοδοσίας (°C)                      |

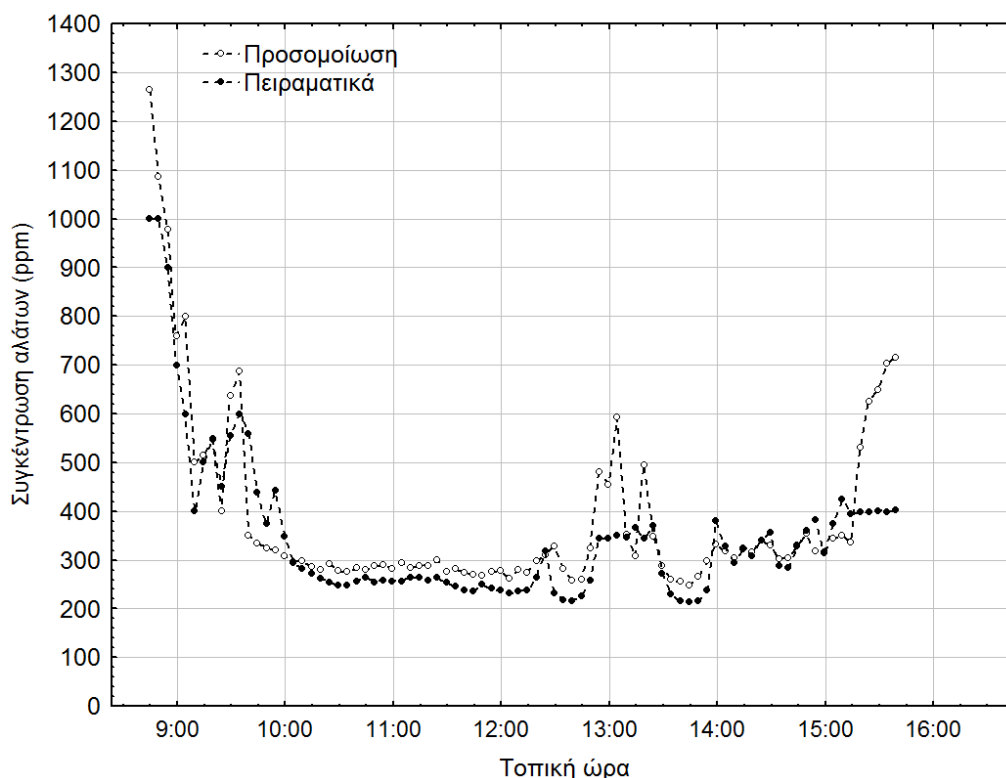
| <b>Αριθμός Εξόδου</b> | <b>Σύμβολο</b> | <b>Περιγραφή</b>                                |
|-----------------------|----------------|---|
| 1                     | $Q_p$          | Παροχή αφαλατωμένου νερού (L/h)                 |
| 2                     | $P_b$          | Πίεση της άλμης (bar)                           |
| 3                     | $Q_b$          | Παροχή της άλμης (L/h)                          |
| 4                     | $R$            | Ανάκτηση του αφαλατωμένου νερού (%)             |
| 5                     | $C_p$          | Συγκέντρωση αλάτων του αφαλατωμένου νερού (ppm) |
| 6                     | $C_b$          | Συγκέντρωση αλάτων της άλμης (ppm)              |

#### 4.3.3.1 Επικύρωση του μοντέλου της μεμβράνης

Το μοντέλο της μεμβράνης ΑΩ το οποίο γράφτηκε σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, συγκρίθηκε με τα πειραματικά δεδομένα πριν αυτό εφαρμοστεί σε συνδυασμό με όλα τα άλλα μοντέλα του συστήματος. Στην Εικόνα 4-2 και Εικόνα 4-3, παρουσιάζεται η σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της μεμβράνης ΑΩ, όσον αφορά την παροχή και την συγκέντρωση των αλάτων του αφαλατωμένου νερού αντίστοιχα. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου του μοντέλου τις πραγματικές τιμές που καταγράφηκαν κατά την πειραματική διερεύνηση για την πίεση, την παροχή, τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση αλάτων του νερού τροφοδοσίας.

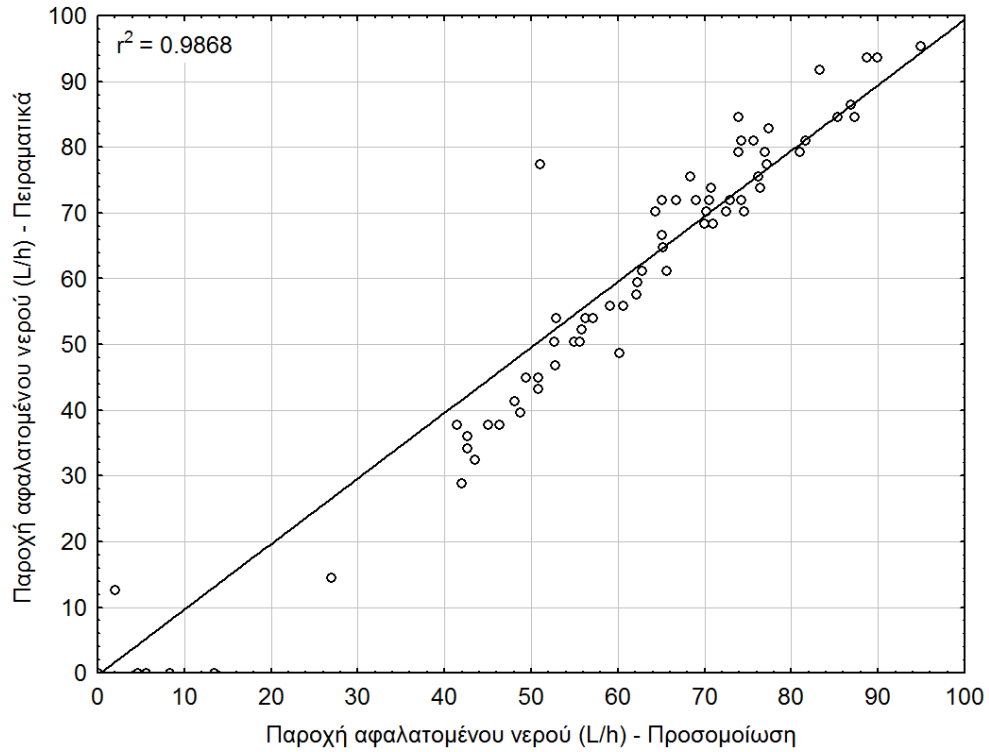


Εικόνα 4-2: Σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη παροχή του αφαλατωμένου νερού

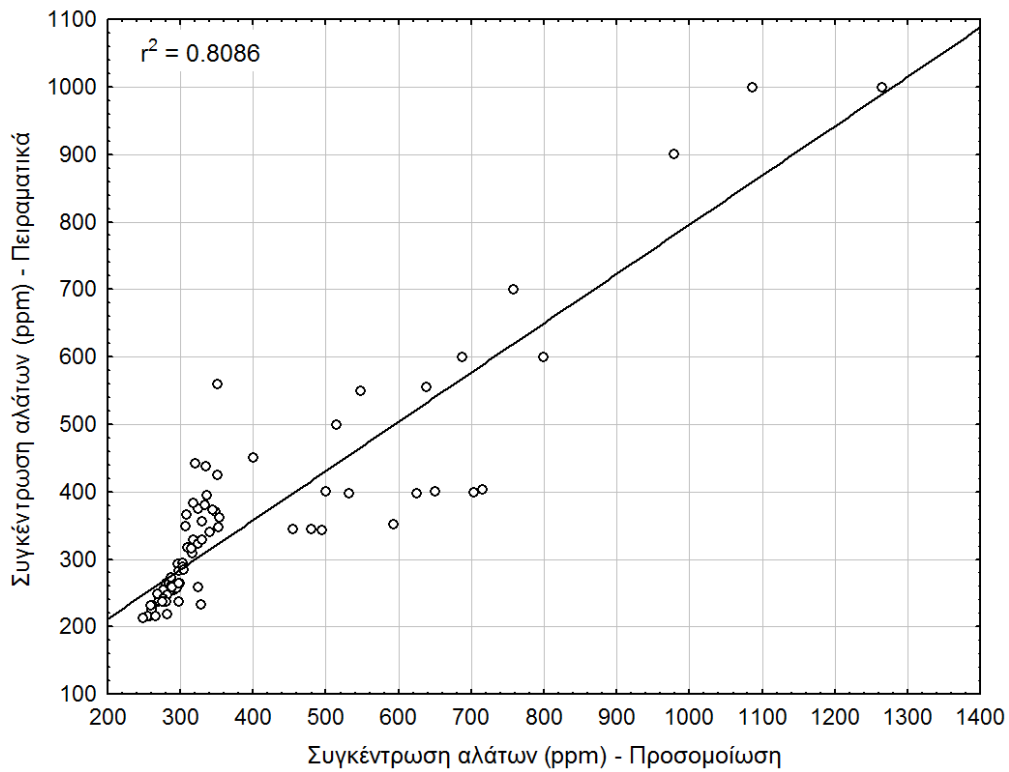


Εικόνα 4-3: Σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη συγκέντρωση των αλάτων του αφαλατωμένου νερού

Για να τεκμηριωθεί η ικανότητα του μοντέλου για την προσομοίωση της μεμβράνης ΑΩ, ελέγχεται ο συντελεστή συσχέτισης των πειραματικών δεδομένων σε σχέση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την παροχή του αφαλατωμένου νερού (βλέπε Εικόνα 4-4) και για τη συγκέντρωση των αλάτων (βλέπε Εικόνα 4-5) όπου παρατηρείται ένας μεγάλος συντελεστής συσχέτισης για την προσομοίωση της παροχής του αφαλατωμένου νερού (99%) και για την προσομοίωση της συγκέντρωσης των αλάτων (81%), τα οποία οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο της μεμβράνης ΑΩ μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα και μπορεί συνδεθεί με άλλα μοντέλα στο σύστημα. Οι αποκλίσεις των θεωρητικών δεδομένων από τα πραγματικά οφείλονται στην ατελή γραμμική σχέση των δεδομένων (δηλαδή η παροχή αφαλατωμένου νερού δεν είναι ακριβώς γραμμική με την πίεση εισόδου αλλά υπάρχει μια απόκλιση από την τέλεια γραμμική σχέση).



Εικόνα 4-4: Η γραμμική συσχέτιση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της μεμβράνης ΑΩ (Παροχή αφαλατωμένου νερού)

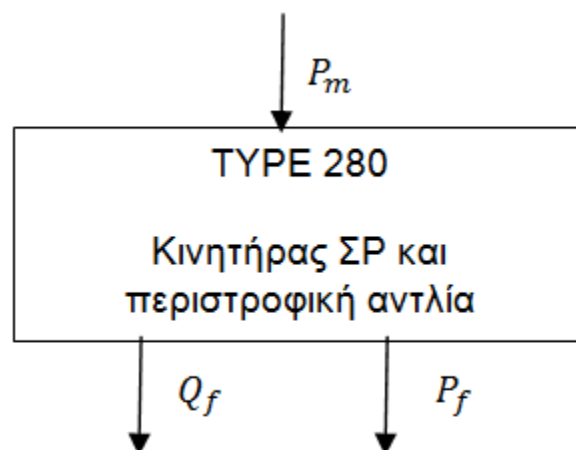


Εικόνα 4-5: Η γραμμική συσχέτιση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της μεμβράνης ΑΩ (Συγκέντρωση των αλάτων)

#### 4.4 Ανάπτυξη μοντέλου της αντλίας - κινητήρα

Όπως έχει προαναφερθεί στο Κεφάλαιο 3, η περιστροφική αντλία μεταφέρει το θαλασσινό νερό από τη δεξαμενή τροφοδοσίας και τον οδηγεί προς την αντλία Clark με κατάλληλη πίεση (10-12 bar) και παροχή (700-800 L/h). Η απαιτούμενη μηχανική ενέργεια για την κίνηση της αντλίας προέρχεται από έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος συνδεδεμένο απευθείας στον άξονα της αντλίας. Η πηγή της ενέργειας μπορεί να είναι οι ηλιακοί συσσωρευτές, η Φ/Β συστοιχία ή/και η ανεμογεννήτρια.

Η προσομοίωση λειτουργίας της αντλίας και του κινητήρα, (βλέπε παράρτημα 2) πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα της απορροφημένης ισχύος του κινητήρα, της πίεσης και παροχής της αντλίας. Το μοντέλο της αντλίας – κινητήρα αποτελείται από μια είσοδο η οποία μεταβάλλεται με το χρόνο (ισχύς) και δύο εξόδους προς τη μεμβράνη ΑΩ (πίεση και παροχή θαλασσινού νερού), βλέπε Εικόνα 4-6 που παριστάνει τη ροή πληροφοριών του μοντέλου.



Εικόνα 4-6: Διάγραμμα ροής πληροφοριών του μοντέλου αντλία - κινητήρα

Ο

Πίνακας 4-2 αναφέρει αναλυτικά τους παραμέτρους, εισόδους και εξόδους του μοντέλου. Οι παράμετροι του μοντέλου είναι οι συντελεστές  $a_0$ ,  $a_1$  και  $a_2$  στις εξισώσεις 4-5 και 4-6.

$$P_f = a_2(P_m)^2 + a_1(P_m) + a_0 \quad 4-5$$

$$Q_f = b_2(P_m)^2 + b_1(P_m) + a_0 \quad 4-6$$

Πίνακας 4-2: Παράμετροι, είσοδοι και έξοδοι του μοντέλου αντλία - κινητήρα

| <b>Αριθμός Παραμέτρου</b> | <b>Σύμβολο</b> | <b>Περιγραφή</b>  |
|---------------------------|----------------|---|
| 1                         | $a_2$          | Ο συντελεστής της $P_m^2$ στο πολυώνυμο δευτέρου βαθμού της συνάρτησης $P_f = f(P_m)$ |
| 2                         | $a_1$          | Ο συντελεστής της $P_m$ στο πολυώνυμο δευτέρου βαθμού της συνάρτησης $P_f = f(P_m)$   |
| 3                         | $a_0$          | Είναι ο ελεύθερος συντελεστής της συνάρτησης $P_f = f(P_m)$                           |
| 4                         | $b_2$          | Ο συντελεστής της $P_m^2$ στο πολυώνυμο δευτέρου βαθμού της συνάρτησης $Q_f = f(P_m)$ |
| 5                         | $b_1$          | Ο συντελεστής της $P_m$ στο πολυώνυμο δευτέρου βαθμού της συνάρτησης $Q_f = f(P_m)$   |
| 6                         | $b_0$          | Είναι ο ελεύθερος συντελεστής της συνάρτησης $Q_f = f(P_m)$                           |

| <b>Αριθμός Εισόδου</b> | <b>Σύμβολο</b> | <b>Περιγραφή</b>   |
|------------------------|----------------|--|
| 1                      | $P_m$          | Η διαθέσιμη ισχύς στην είσοδο του κινητήρα συνεχούς ρεύματος (W) |

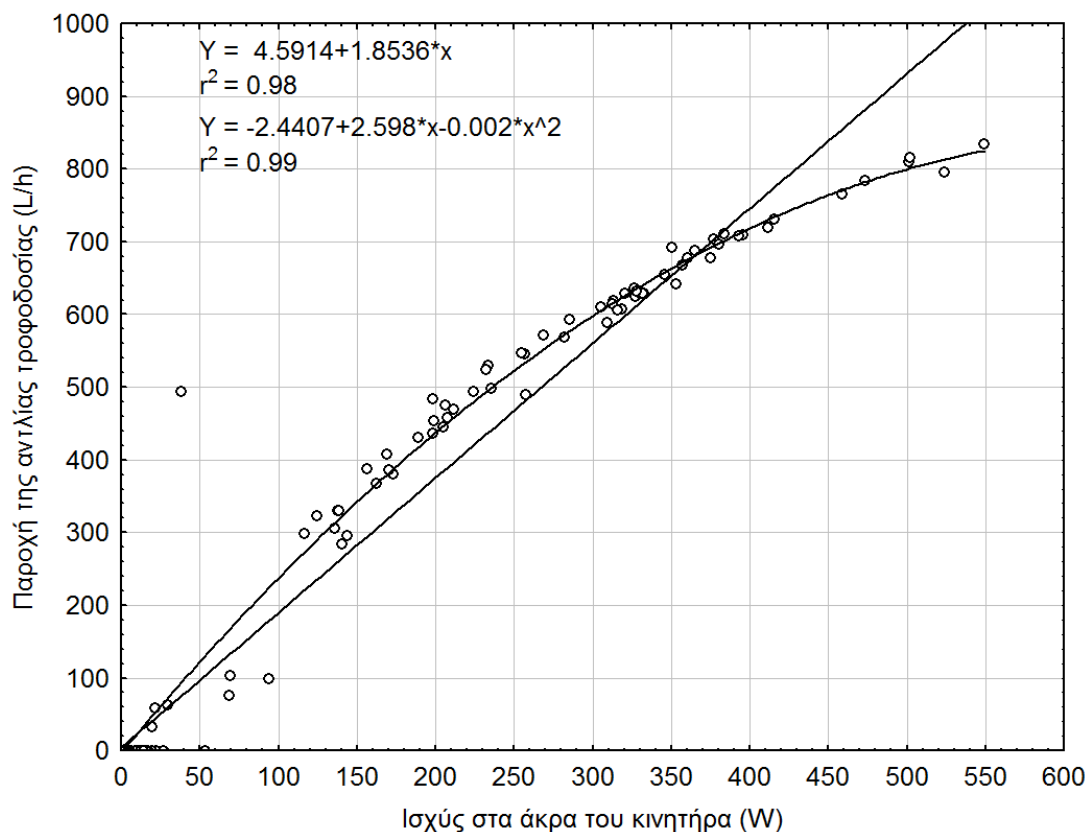
  

| <b>Αριθμός Εξόδου</b> | <b>Σύμβολο</b> | <b>Περιγραφή</b>                                      |
|-----------------------|----------------|---|
| 1                     | $P_f$          | Πίεση εξόδου της αντλίας τροφοδοσίας (bar)            |
| 2                     | $Q_f$          | Παροχή θαλασσινού νερού της αντλίας τροφοδοσίας (L/h) |

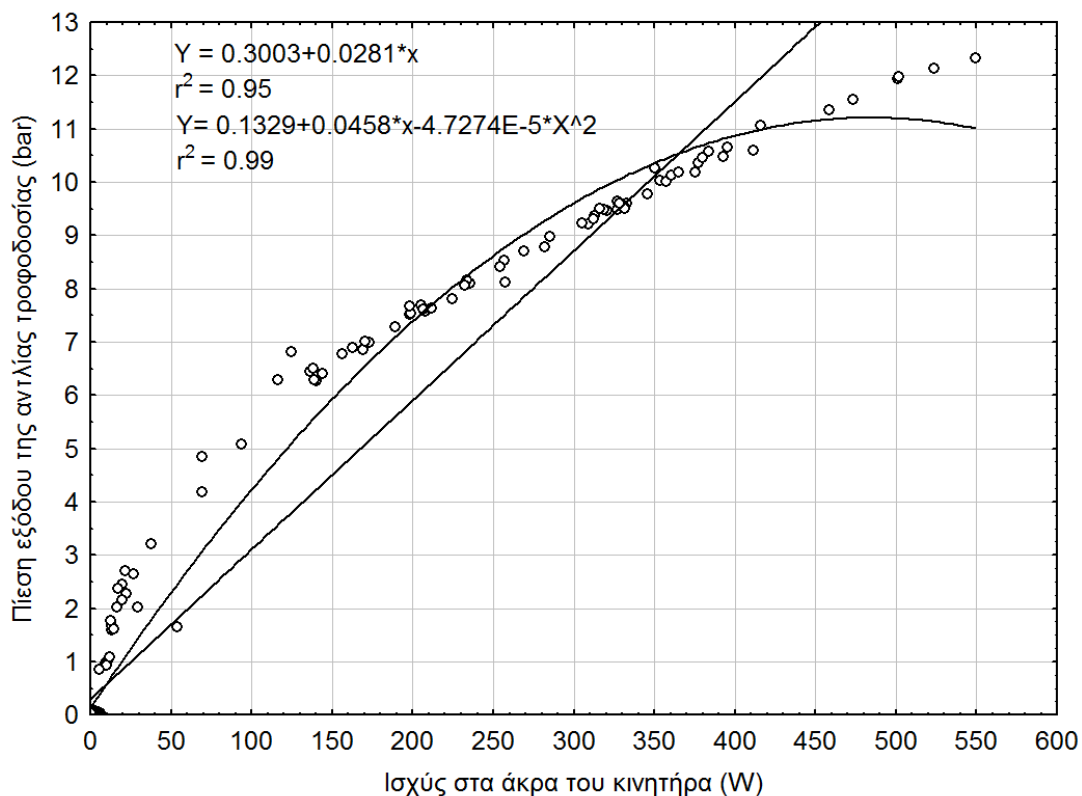
Η θεωρητική καμπύλη πίεσης - παροχής για την αντλία τροφοδοσίας (περιστροφική αντλία θετικής μετατόπισης) είναι ευθεία κάθετη στον άξονα της παροχής και κάθε ευθεία αντιστοιχεί σε ορισμένο αριθμό στροφών. Επειδή όμως υπάρχει πάντοτε διαρροή η οποία τείνει να αυξηθεί με αύξηση της πίεσης, στην πράξη οι χαρακτηριστικές καμπύλες

αποκλίνουν από την ευθεία. Το μέγιστο ύψος πίεσης, το οποίο αναπτύσσει η αντλία εξαρτάται από την ισχύ του κινητήρα και την ανθεκτικότητα των τμημάτων της αντλίας στις πιεστικές τάσεις.

Στην Εικόνα 4-7 και στην Εικόνα 4-8 παρουσιάζονται οι πειραματικές και οι θεωρητικές συσχετίσεις παροχής-ισχύος και πίεσης-ισχύος αντίστοιχα. Οι συσχετίσεις αυτές των πειραματικών δεδομένων επιβεβαιώνουν την θεωρητική σχέση της πίεσης και παροχής συνάρτηση της ισχύος του κινητήρα που έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2 εξίσωση 2-14. Στις ίδιες εικόνες παρουσιάζονται επίσης οι εξισώσεις συσχέτισης που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο για τον υπολογισμό της παροχής και της πίεσης σε σχέση με την ισχύ στην είσοδο του κινητήρα. Παρατηρείται επίσης ότι τα πειραματικά δεδομένα της πίεσης και της παροχής τείνουν σε μία σταθερή τιμή όσο και αν αυξάνεται η ισχύς του κινητήρα. Αυτό οφείλεται κυρίως στους παραμέτρους σχεδιασμού της αντλίας όπως το υλικό κατασκευής (αντοχή σε μέγιστη πίεση) και η διατομή της αναρρόφησης και κατάθλιψης (μέγιστο όριο παροχής), οφείλεται επίσης και στην ικανότητα του κινητήρα να αναπτύξει μεγάλο αριθμό στροφών στην μέγιστη επιτρεπτή τάση λειτουργίας του. Επιλέχθηκαν οι εξισώσεις με το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης, δηλαδή επιλέγονται οι συσχετίσεις δευτέρου βαθμού.



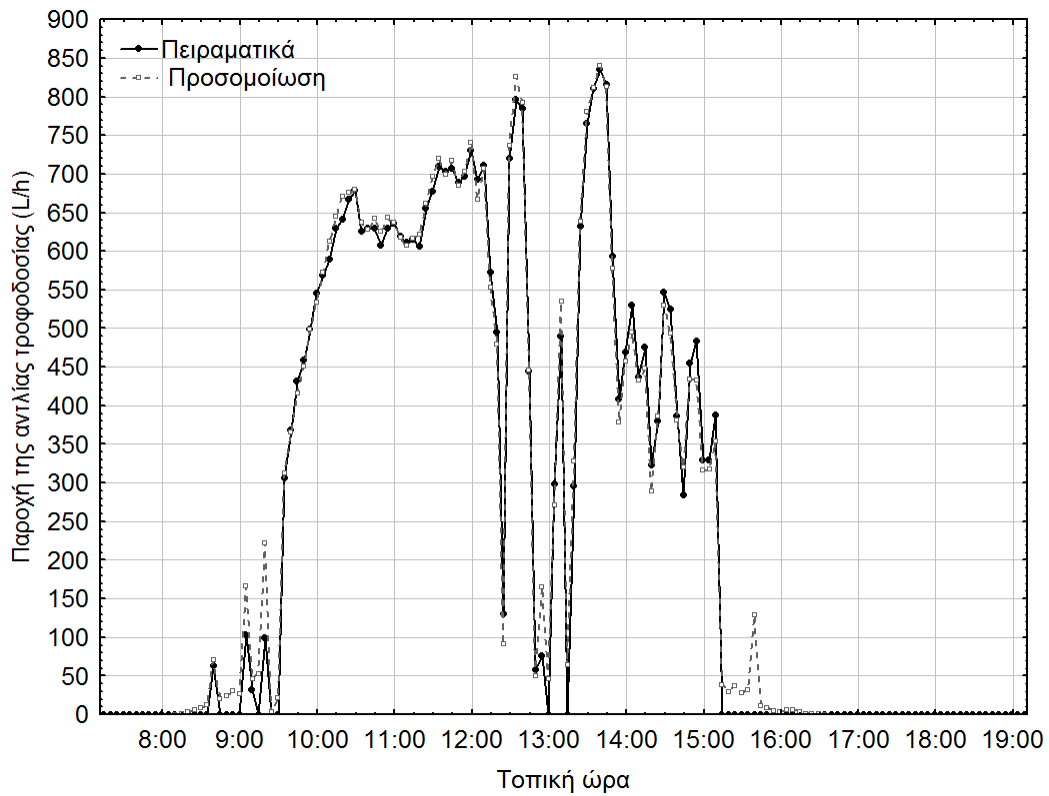
Εικόνα 4-7: Χαρακτηριστική καμπύλη παροχής - ισχύος της αντλίας



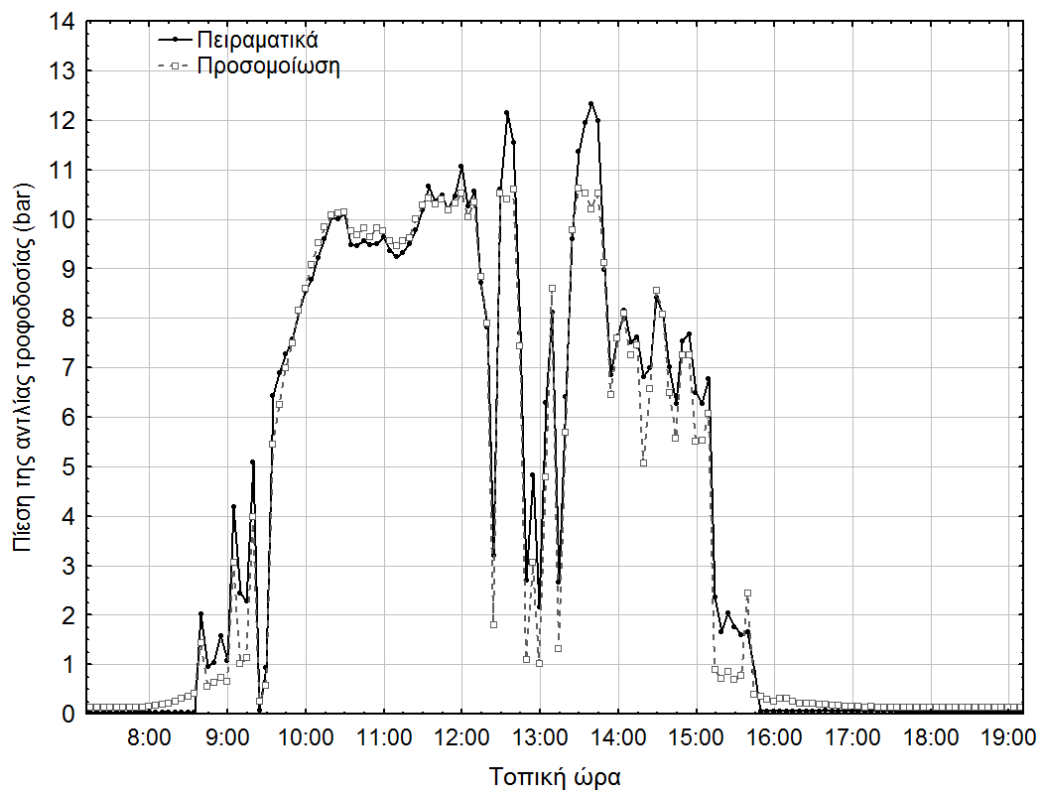
Εικόνα 4-8: Χαρακτηριστική καμπύλη πίεσης - ισχύος της αντλίας

Στην Εικόνα 4-9 και στην Εικόνα 4-10 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των πειραματικών δεδομένων της λειτουργίας της αντλίας (πίεσης και παροχής) με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης από το προτεινόμενο μοντέλο. Τα δεδομένα της προσομοίωσης προέκυψαν από τη χρήση μιας σειράς από πειραματικά δεδομένα της ισχύος του κινητήρα σαν είσοδο (inputs) στο μοντέλο και καταγραφή των αποτελεσμάτων πίεσης και παροχής, συγκρίνοντας τα θεωρητικά αποτελέσματα με τα αντίστοιχα πειραματικά. Στην Εικόνα 4-11 και στην Εικόνα 4-12 απεικονίζεται η γραμμική συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών και των θεωρητικών δεδομένων του μοντέλου. Παρατηρείται ένας μεγάλος συντελεστής συσχέτισης για την προσομοίωση της παροχής της αντλίας (99%) και για την προσομοίωση της πίεσης (99%) επίσης.

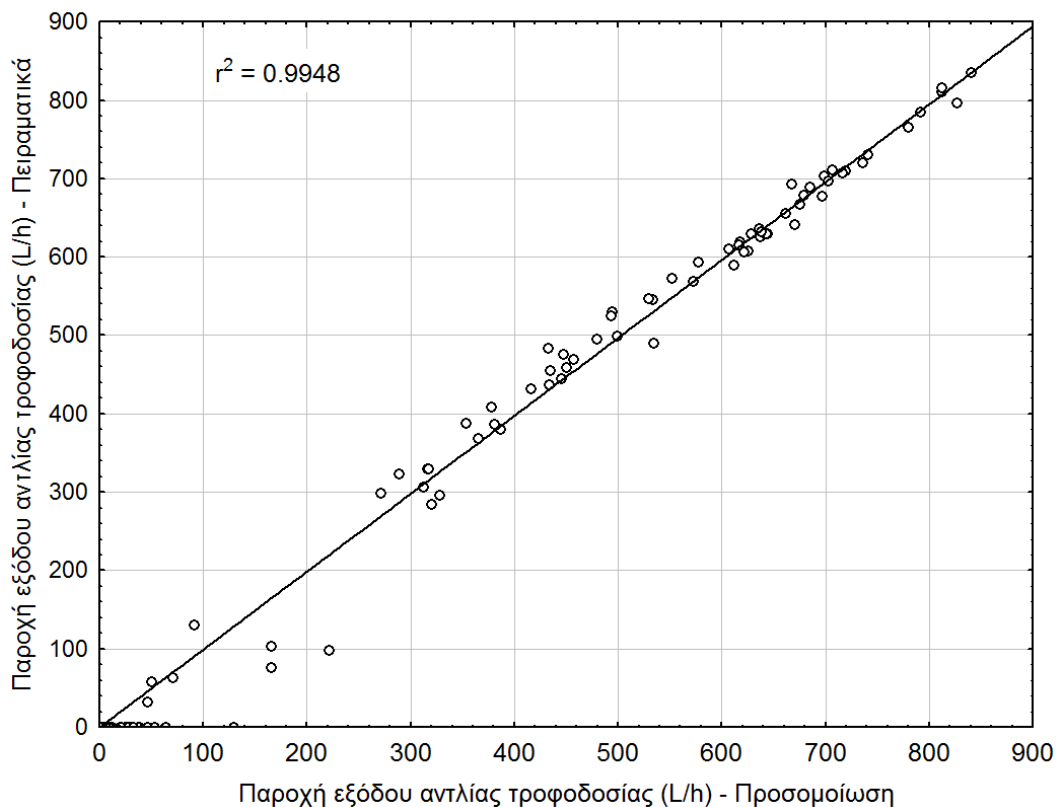




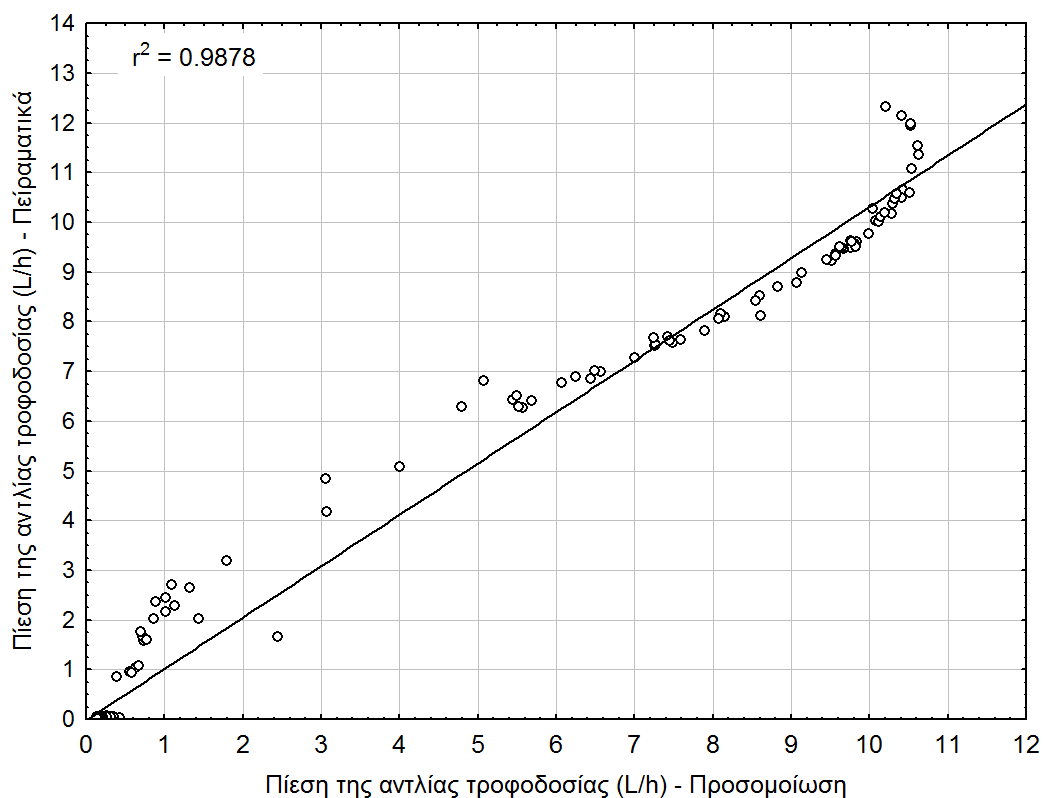
Εικόνα 4-9: Σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη παροχή της αντλίας τροφοδοσίας



Εικόνα 4-10: Σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη πίεση της αντλίας τροφοδοσίας



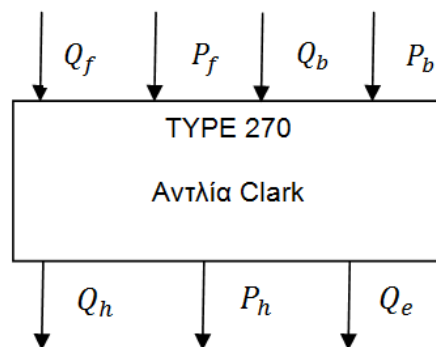
Εικόνα 4-11: Η γραμμική συσχέτιση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της παροχής της αντλίας



Εικόνα 4-12: Η γραμμική συσχέτιση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της πίεσης της αντλίας τροφοδοσίας

#### 4.5 Ανάπτυξη μοντέλου της αντλίας Clark

Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, η αντλία Clark είναι μια υδραυλική αντλία που ανακτά μεγάλο μέρος της απορριπτόμενης υδραυλικής ενέργειας της άλμης, προσθέτοντάς την στο διερχόμενο νερό τροφοδοσίας. Άρα για την προσομοίωση της αντλίας χρειάζεται να εισαχθούν οι τιμές της παροχής, της πίεσης του νερού τροφοδοσίας και της άλμης ως είσοδοι (inputs), βλέπε Εικόνα 4-13. Οι έξοδοι του μοντέλου (outputs), δηλαδή τα αποτελέσματα είναι οι πίεση και παροχή του θαλασσινού νερού (υψηλής πίεσης) και η παροχή της άλμης (χαμηλής πίεσης άλμης), βλέπε παράρτημα 3.



Εικόνα 4-13: Διάγραμμα ροής πληροφοριών Της αντλίας Clark

Παράμετροι του μοντέλου (σταθερές τιμές) είναι η εσωτερική διαρροή στην αντλία, οι απώλειες πίεσης από τη κίνηση των εμβόλων της αντλίας, το ποσοστό ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού και η πίεση της άλμης μετά τη διαδικασία της ανάκτησης, βλέπε τον πίνακα 4-3.

Η παροχή του θαλασσινού νερού προς τη μεμβράνη και η παροχή της απόρριψης υπολογίζονται από την εξίσωση 2-22 που έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 2 προσθέτοντας τις εσωτερικές απώλειες παροχής  $dQ$  βλέπε εξίσωση 4-7 και εξίσωση 4-8 .

$$Q_h = Q_f - dQ \quad 4-7$$

$$Q_L = Q_b - dQ \quad 4-8$$

Η υψηλή πίεση εξόδου της αντλίας Clark υπολογίζεται από την εξίσωση 2-23 στο Κεφάλαιο 2 προσθέτοντας όμως τον όρο της απώλειας πίεσης λόγω της κίνησης των εμβόλων της αντλίας, βλέπε εξίσωση 4-9.

$$P_h = P_f + P_b \times (1 - R) - (P_L \times (1 - R)) - dP \quad 4-9$$

Πίνακας 4-3: Παράμετροι, είσοδοι και έξοδοι του μοντέλου της αντλίας Clark

| <b>Αριθμός Παραμέτρου</b> | <b>Σύμβολο</b> | <b>Περιγραφή</b>                                   |
|---------------------------|----------------|--|
| 1                         | $dQ$           | Συνολική εσωτερική διαρροή στην αντλία Clark (L/h) |
| 2                         | $dP$           | Συνολική απώλεια πίεσης στην αντλία Clark (bar)    |
| 3                         | $R$            | Ανάκτηση αφαλατωμένου νερού (%)                    |
| 4                         | $P_L$          | Η πίεση στη γραμμή της απόρριψης (bar)             |

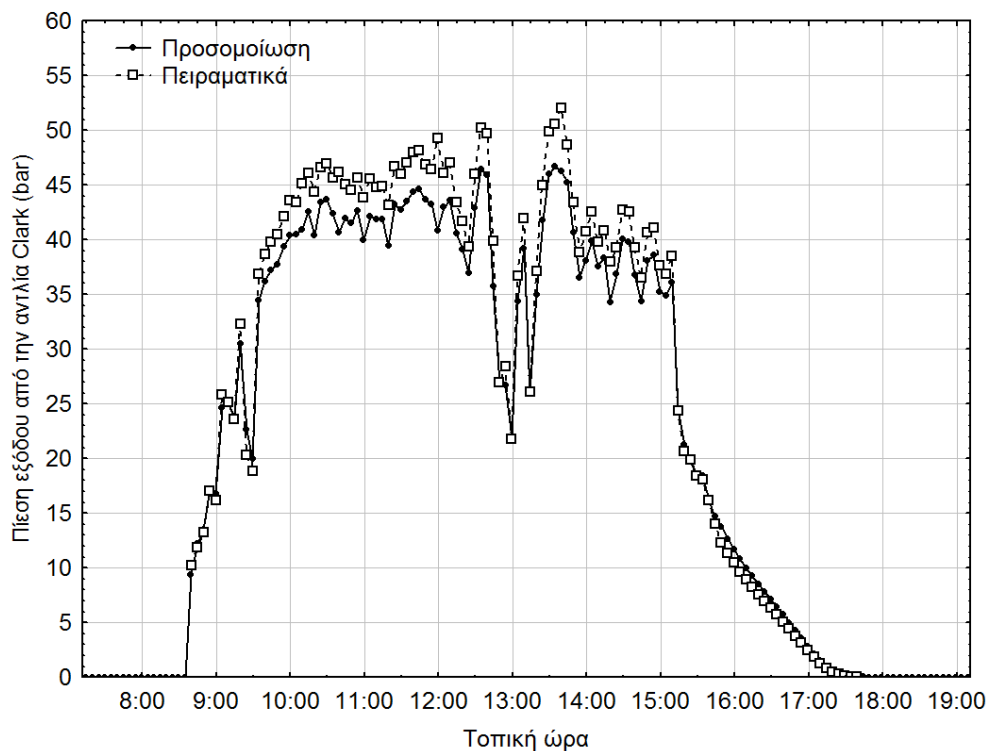
  

| <b>Αριθμός Εισόδου</b> | <b>Σύμβολο</b> | <b>Περιγραφή</b>                          |
|------------------------|----------------|---|
| 1                      | $Q_f$          | Παροχή θαλασσινού νερού τροφοδοσίας (L/h) |
| 2                      | $P_f$          | Πίεση θαλασσινού νερού τροφοδοσίας (bar)  |
| 3                      | $Q_b$          | Παροχή της άλμης της μεμβράνης ΑΩ (L/h)   |
| 4                      | $P_b$          | Πίεση της άλμης της μεμβράνης ΑΩ (L/h)    |

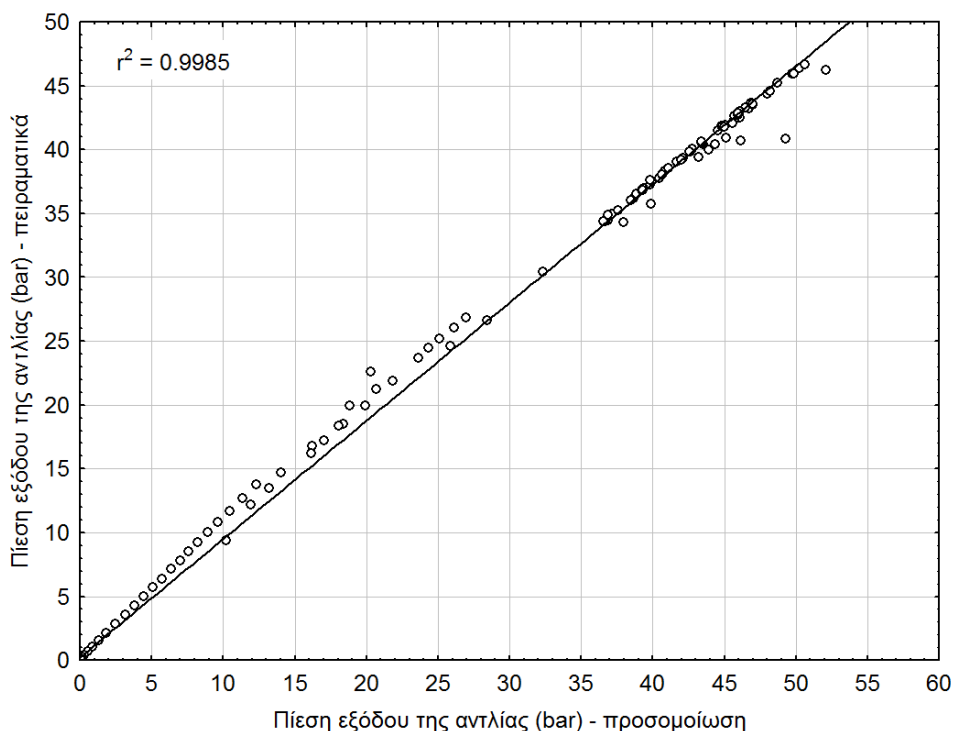
  

| <b>Αριθμός Εξόδου</b> | <b>Σύμβολο</b> | <b>Περιγραφή</b>                       |
|-----------------------|----------------|--|
| 1                     | $Q_h$          | Παροχή της γραμμής υψηλής πίεσης (L/h) |
| 2                     | $P_h$          | Πίεση της γραμμής υψηλής πίεσης (bar)  |
| 3                     | $Q_L$          | Παροχή της γραμμής απόρριψης (L/h)     |

Στην Εικόνα 4-14 απεικονίζεται η σύγκριση των πειραματικών δεδομένων της πίεσης εξόδου της αντλίας Clark με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης υπολογίστηκαν με την εφαρμογή του μοντέλου της αντλίας Clark με χρήση πειραματικών δεδομένων της πίεσης και παροχής του νερού τροφοδοσίας και άλμης σαν δεδομένα εισόδου, και με την υπόθεση ότι οι εσωτερικές απώλειες παροχής στην αντλία είναι αμελητέες, δηλαδή  $dQ=0$ . Η υπόθεση αυτή ήταν αναγκαία γιατί δεν ήταν γνωστή η τιμή του  $dQ$  από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας ούτε ήταν εφικτή η ακριβής μέτρηση των απωλειών αυτών. Παρατηρείται στην Εικόνα 4-15 ότι το μοντέλο μπορεί με μεγάλη ακρίβεια να προβλέψει την τιμή της υψηλής πίεσης εξόδου της αντλίας όπως αυτό αποδεικνύεται από την μεγάλη τιμή της γραμμικής συσχέτισης (99%).



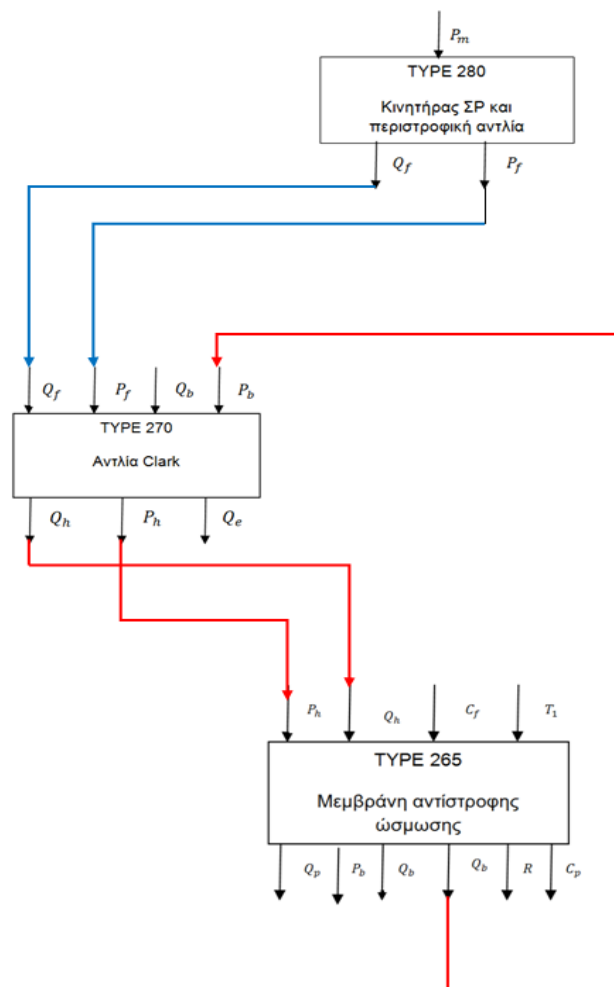
Εικόνα 4-14: Σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη πίεση εξόδου της αντλίας Clark



Εικόνα 4-15: Η γραμμική συσχέτιση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της πίεσης της αντλίας Clark

#### 4.6 Τρόπος σύνδεσης των τριών μοντέλων στο TRNSYS

Στην Εικόνα 4-16 παρουσιάζεται ο τρόπος σύνδεσης των τριών καινούριων μοντέλων όπου παρατηρείται ότι οι έξοδοι του ενός μοντέλου είναι οι εισοδοί του άλλου. Τα τρία μοντέλα αποτελούν την προσομοίωση της μονάδας αφαλάτωσης ΑΩ με ανακτητή ενέργειας τύπου αντλίας Clark. Παρατηρείται επίσης ότι χρειάζεται μόνο μία είσοδος για να τη σύνδεση των μοντέλων με πηγή ενέργειας, η οποία μπορεί να είναι πηγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Φ/Β πλαίσια, ανεμογεννήτρια, κυψέλη καυσίμου ή και συσσωρευτές). Με τις μπλε γραμμές απεικονίζεται η γραμμή χαμηλής πίεσης ενώ με το κόκκινες γραμμές απεικονίζεται η γραμμή της υψηλής πίεσης. Στους επόμενους παραγράφους, τα καινούρια αυτά μοντέλα θα συνδεθούν σε διάφορους συνδυασμούς με το υβριδικό σύστημα ΑΠΕ και θα πραγματοποιηθεί η συνολική προσομοίωση του συστήματος.



Εικόνα 4-16: Τρόπος σύνδεσης των τριών καινούριων μοντέλων στο TRNSYS

#### 4.7 Προσομοιώσεις του συνολικού συστήματος στο TRNSYS

Για τις ανάγκες της δυναμικής προσομοίωσης του συστήματος (σύστημα παραγωγής ενέργειας και μονάδα αφαλάτωσης), εξετάζονται οι πέντε τοπολογίες σύνδεσης της μονάδας ΑΩ με το σύστημα ΑΠΕ:

- Η τοπολογία 1 αφορά τη σύνδεση της μονάδας ΑΩ με συσσωρευτές και ρυθμιστή φόρτισης.
- Η τοπολογία 2 αφορά την πρόσθεση ανεμογεννήτριας και ανορθωτή – ρυθμιστή φόρτισης στην προηγούμενη τοπολογία 1.
- Η τοπολογία 3 αφορά τη σύνδεση της μονάδας ΑΩ απευθείας με τη Φ/Β συστοιχία μέσω του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (ΣΡ/ΣΡ).
- Η τοπολογία 4 αφορά της σύνδεση της μονάδας ΑΩ απευθείας με τη Φ/Β συστοιχία.
- Η τοπολογία 5 αφορά τη σύνδεση της μονάδας ΑΩ με την ανεμογεννήτρια μέσω του ανορθωτή – ρυθμιστή φόρτισης.

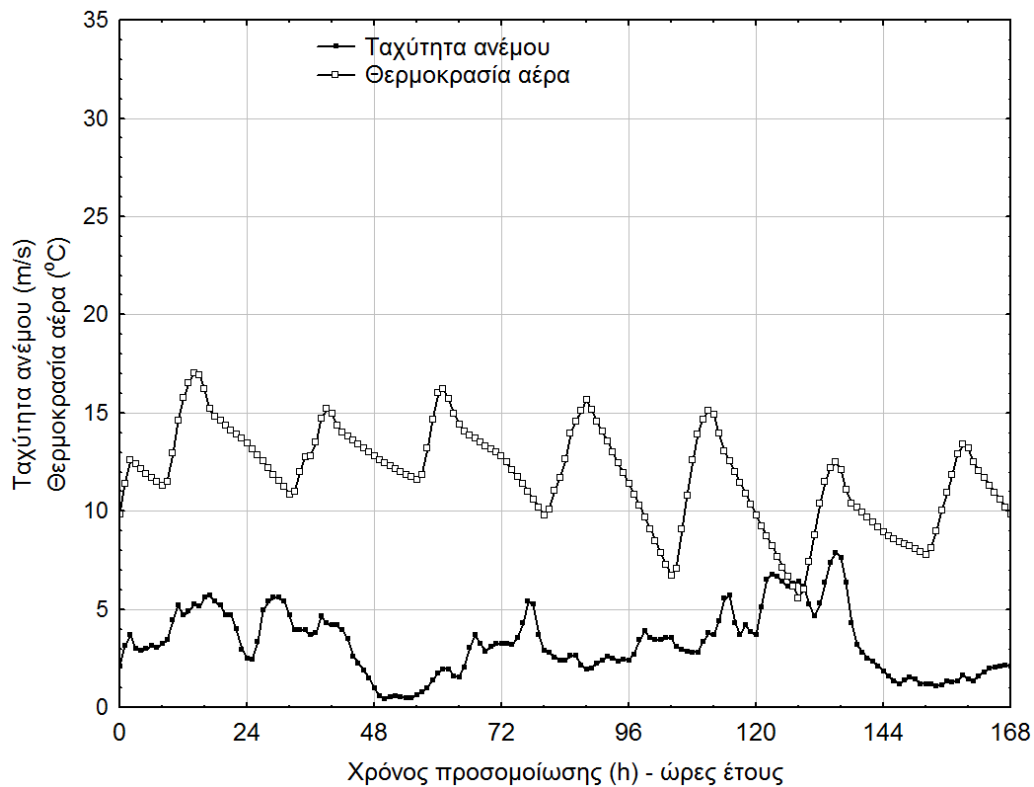
Το TRNSYS προσφέρει μια μεγάλη βιβλιοθήκη με έτοιμα μοντέλα προσομοίωσης ενεργειακών συστημάτων. Τα μοντέλα του TRNSYS τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση του συστήματος στην παρούσα διατριβή είναι αυτά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-4.

Πίνακας 4-4: Τα έτοιμα μοντέλα του TRNSYS16

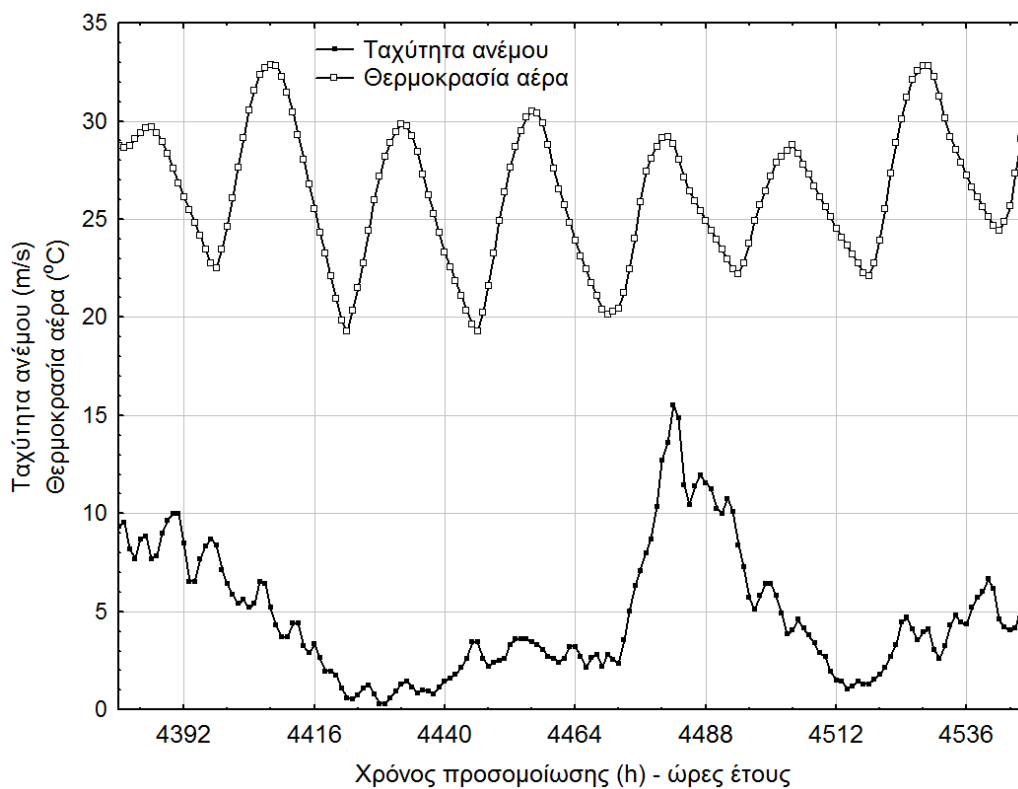
| Όνομα στο TRNSYS   | Φυσικό όνομα   |
|--|--|
| Type 109-TMY<br>Combined data reader and solar radiation processor | Αναγνώστης μετεωρολογικών δεδομένων και επεξεργαστής ηλιακής ακτινοβολίας. Με αρχείο εισόδου για τα μετεωρολογικά της Αθήνας<br><i>C:\ProgramFiles\Trnsys16\Weather\Meteonorm\Europe\GR-Athinai-167140.tm2</i> |
| Type 94a<br>Photovoltaic array (Crystalline modules)               | Κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία  |
| Type 47a<br>Battery model  | Ηλιακός συσσωρευτής  |
| Type 48b<br>Regulator/ inverter (charge controller)                | Μετατροπέας συνεχούς ρεύματος (ρυθμιστής φόρτισης)   |
| Type 48a<br>Regulator/ inverter                                    | Μετατροπέας συνεχούς ρεύματος  |
| Type 90<br>Wind energy conversion system                           | Ανεμογεννήτρια   |
| Type 24<br>Quantity integrator                                     | Ολοκλήρωμα φυσικών μεγεθών   |
| Type 65d<br>Online plotter   | Γραφική παρουσίαση των αποτελεσμάτων   |

Για την προσομοίωση των διαφόρων τοπολογιών του συστήματος, χρησιμοποιήθηκε μετεωρολογικό αρχείο της Αθήνας, το οποίο είναι αποθηκευμένο στη βιβλιοθήκη μετεωρολογικών αρχείων του TRNSYS. Το αρχείο περιέχει μετεωρολογικά δεδομένα για ένα τυπικό έτος. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της θερμοκρασίας του αέρα, η ταχύτητα του ανέμου (βλέπε Εικόνα 4-17 και Εικόνα 4-18) και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, Εικόνα 4-19 και Εικόνα 4-20, για μία εβδομάδα του Ιανουαρίου και του Ιουλίου αντίστοιχα.

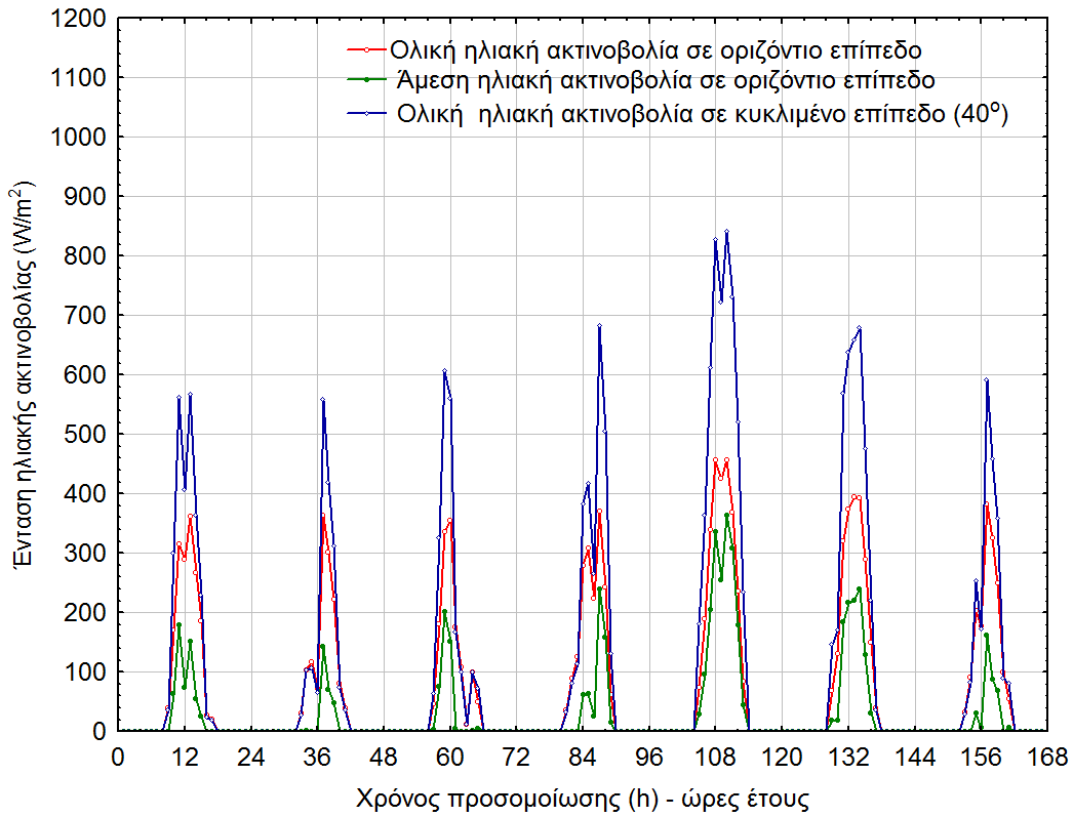




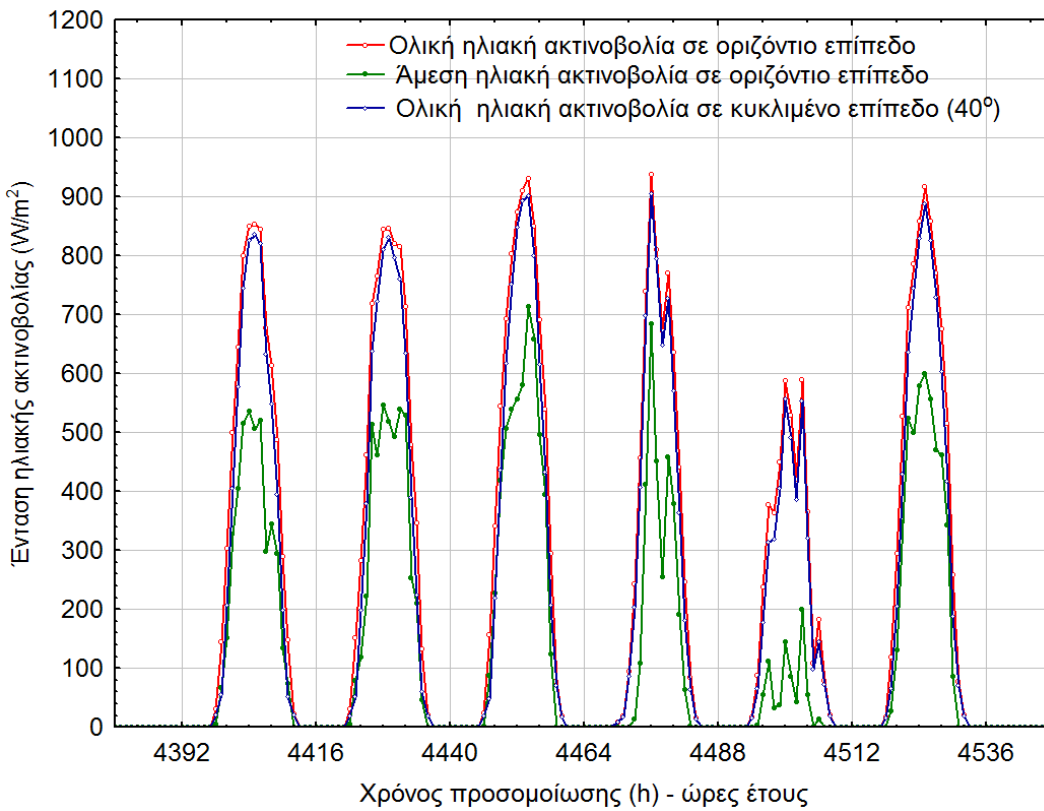
Εικόνα 4-17: Η ταχύτητα του ανέμου και η θερμοκρασία αέρα του μήνα Ιανουαρίου



Εικόνα 4-18: Η ταχύτητα του ανέμου και η θερμοκρασία αέρα του μήνα Ιουλίου



Εικόνα 4-19: Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας για μία εβδομάδα του Ιανουαρίου



Εικόνα 4-20: Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας για μία εβδομάδα του Ιουλίου

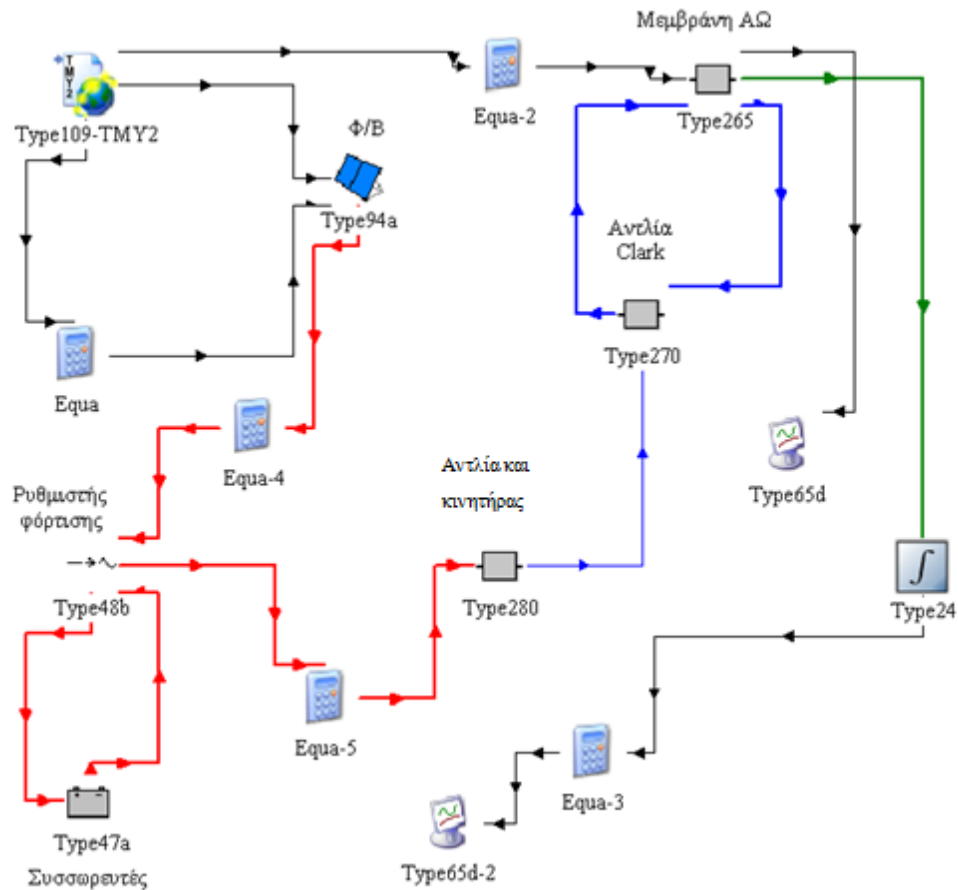
#### **4.7.1 Τοπολογία 1 – σύνδεση τη Φ/Β συστοιχία με τη μονάδα ΑΩ μέσω των συσσωρευτών και ρυθμιστή φόρτισης**

Σε αυτή την τοπολογία, η παραγόμενη ενέργεια από τη Φ/Β συστοιχία φτάνει στο κινητήρα της μονάδας ΑΩ ( κόκκινες γραμμές) μέσω των συσσωρευτών και του ρυθμιστή φόρτισης, βλέπε Εικόνα 4-21. Οι μπλε γραμμές απεικονίζουν τη ροή του νερού από την αντλία τροφοδοσίας προς την αντλία Clark, από την αντλία Clark προς τη μεμβράνη και από την άλμη της μεμβράνης προς την αντλία Clark. Οι μαύρες γραμμές απεικονίζουν τη ροή πληροφοριών (θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία κλπ.)

Η εφαρμογή της τοπολογίας αυτής έχει ως στόχο τη μελέτη λειτουργίας της μονάδας ΑΩ σε συνθήκες σταθερής παροχής ενέργειας που το εξασφαλίζουν οι συσσωρευτές του συστήματος. Η σταθερή παροχή ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα την τροφοδοσία της μονάδας ΑΩ με σταθερή πίεση και παροχή τα οποία αποτελούν τις συμβατικές συνθήκες λειτουργίας μονάδων ΑΩ.

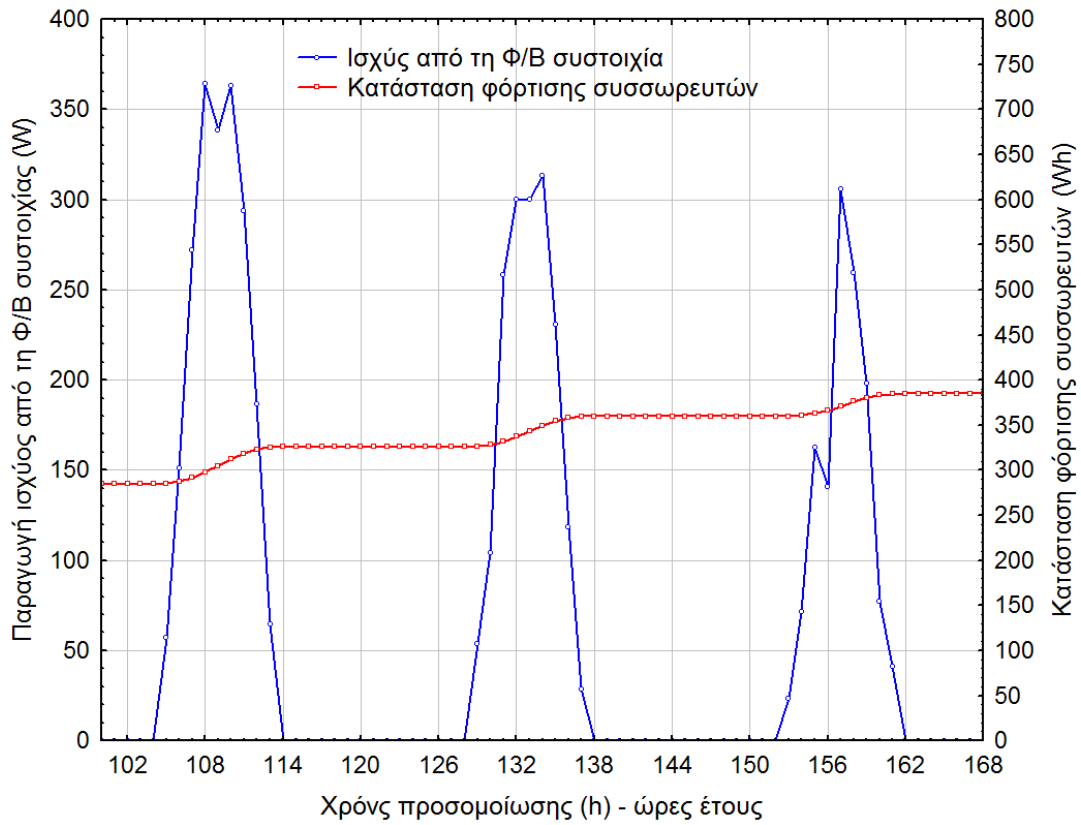
Η λειτουργία της τοπολογίας φασιζείται πλήρως στους παραμέτρους του ρυθμιστή φόρτισης τα οποία ρυθμίζονται ως εξής:

- Το ανώτατο όριο φόρτισης των συσσωρευτών (stat of charge, SOC) είναι 90% (567 Wh), πάνω από τον οποίο δεν επιτρέπεται η φόρτιση των συσσωρευτών.
- Το κατώτερο όριο εκφόρτισης των συσσωρευτών είναι 30% (189 Wh), κάτω από τον οποίο δεν επιτρέπεται η εκφόρτισης των συσσωρευτών.
- Το όριο της κατάστασης φόρτισης των συσσωρευτών πάνω από το οποίο επιτρέπεται η εκφόρτιση των συσσωρευτών μετά από τη διαδικασία φόρτισης είναι 70% (441 Wh). Δηλαδή, αν οι συσσωρευτές έχουν φτάσει στο κατώτερο όρο εκφόρτισης και ξεκινάει η διαδικασία φόρτισης, τότε η σύνδεση της μονάδας ΑΩ δεν επιτρέπεται μέχρι η κατάσταση φόρτισης να γίνει 70% (441 Wh).
- Τα όρια αυτά έχουν προσδιοριστεί ακολουθώντας τα τεχνικά εγχειρίδια των συσσωρευτών και του ρυθμιστή φόρτισης.

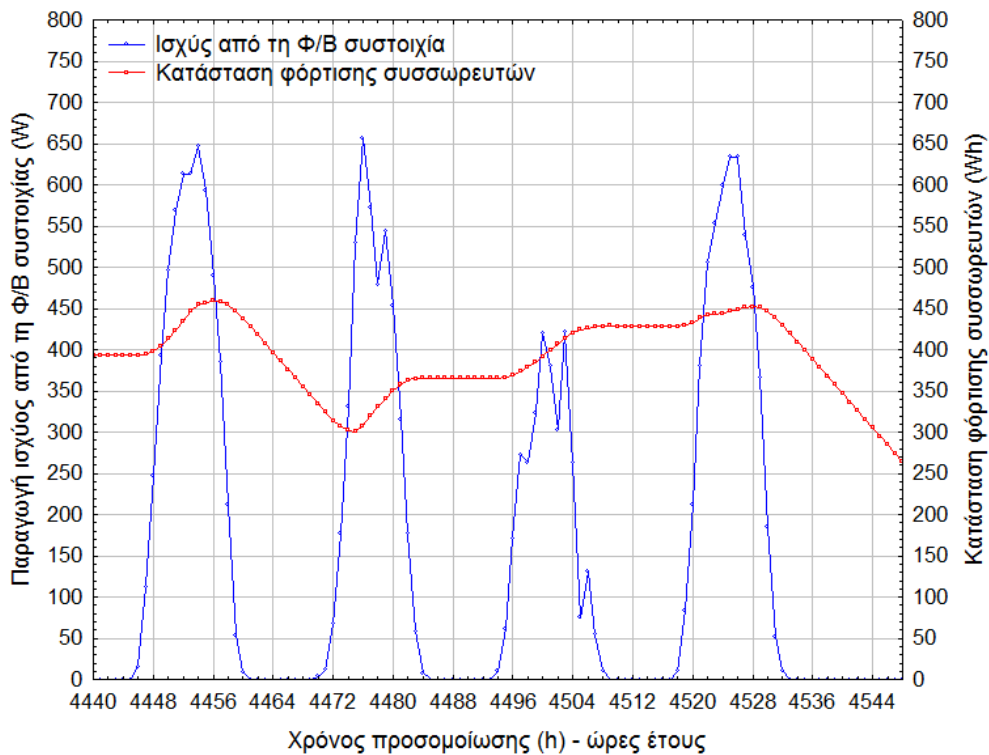


Εικόνα 4-21: Σύνδεση της μονάδας ΑΩ με τη Φ/Β συστοιχία μέσω συσσωρευτών και ρυθμιστή φόρτισης, τοπολογία 1.

Η Εικόνα 4-22, παρουσιάζει την παραγόμενη ισχύ της Φ/Β συστοιχίας και η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών τον Ιανουάριο 2006 και για το διάστημα τριών ημερών. Παρατηρείται ότι η παραγόμενη ενέργεια από τη Φ/Β συστοιχία δεν είναι αρκετή για να φτάσει η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών στον όριο SOC 70% (441 Wh) και ως αποτέλεσμα η μονάδα ΑΩ να μην λειτουργεί στις συγκεκριμένες μέρες του Ιανουαρίου. Ενώ στην Εικόνα 4-23, παρατηρείται ότι η παραγόμενη ισχύς της Φ/Β συστοιχίας κατά τον Ιούλιο 2006, επιτρέπει στους συσσωρευτές να φτάσουν στο όριο SOC 70% (441 Wh), μια τιμή που επιτρέπει τη σύνδεση της μονάδας ΑΩ (σταδιακή μείωση της κατάστασης φόρτισης των συσσωρευτών).

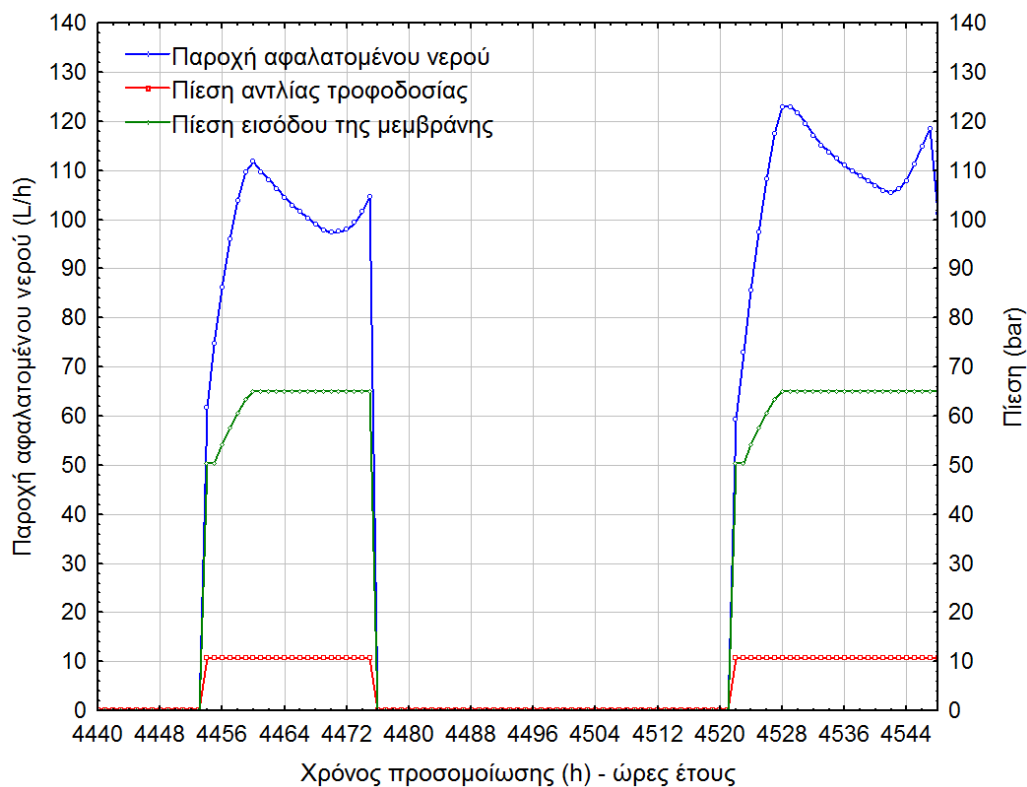


Εικόνα 4-22: Παραγωγή ισχύος από τη Φ/Β συστοιχία και η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών για τον Ιανουάριο



Εικόνα 4-23: Παραγωγή ισχύος από τη Φ/Β συστοιχία και η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών για τον Ιούλιο

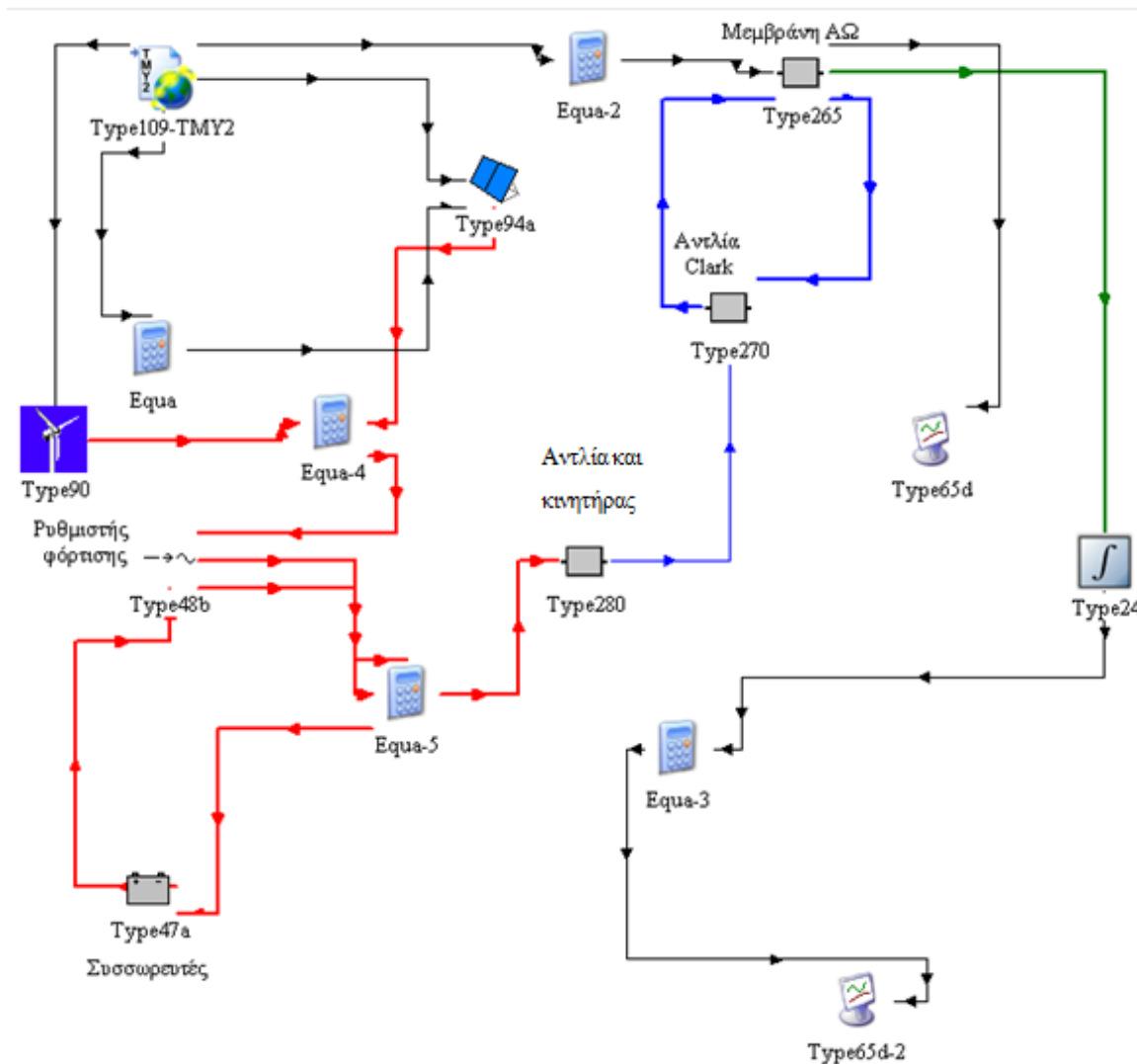
Στην Εικόνα 4-24, φαίνεται ότι η μονάδα ΑΩ ξεκινάει τη λειτουργία της σε σταθερές συνθήκες της πίεσης τροφοδοσίας και πίεσης εισόδου της μεμβράνης. Οι σταθερές συνθήκες οφείλονται στη σταθερή παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας από τους συσσωρευτές. Η σταδιακή μείωση της παροχής του αφαλατωμένου νερού που παρατηρείται στην Εικόνα 4-24, οφείλεται κυρίως στη σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας αλλά και τη σταδιακή μείωση της τάσης των συσσωρευτών λόγω εκφόρτισης. Παρατηρείται επίσης η σταδιακή αύξηση της πίεσης εισόδου της μεμβράνης πριν τη σταθεροποίησή της. Αυτή η σταδιακή αύξηση στην αρχή της λειτουργίας οφείλεται στη σταδιακή αύξηση της πίεσης της άλμης που εξέρχεται από τη μεμβράνη και εισέρχεται στην αντλία Clark.



Εικόνα 4-24: Παροχή αφαλατωμένου νερού, πίεση αντλίας τροφοδοσίας και πίεση εισόδου της μεμβράνης ΑΩ

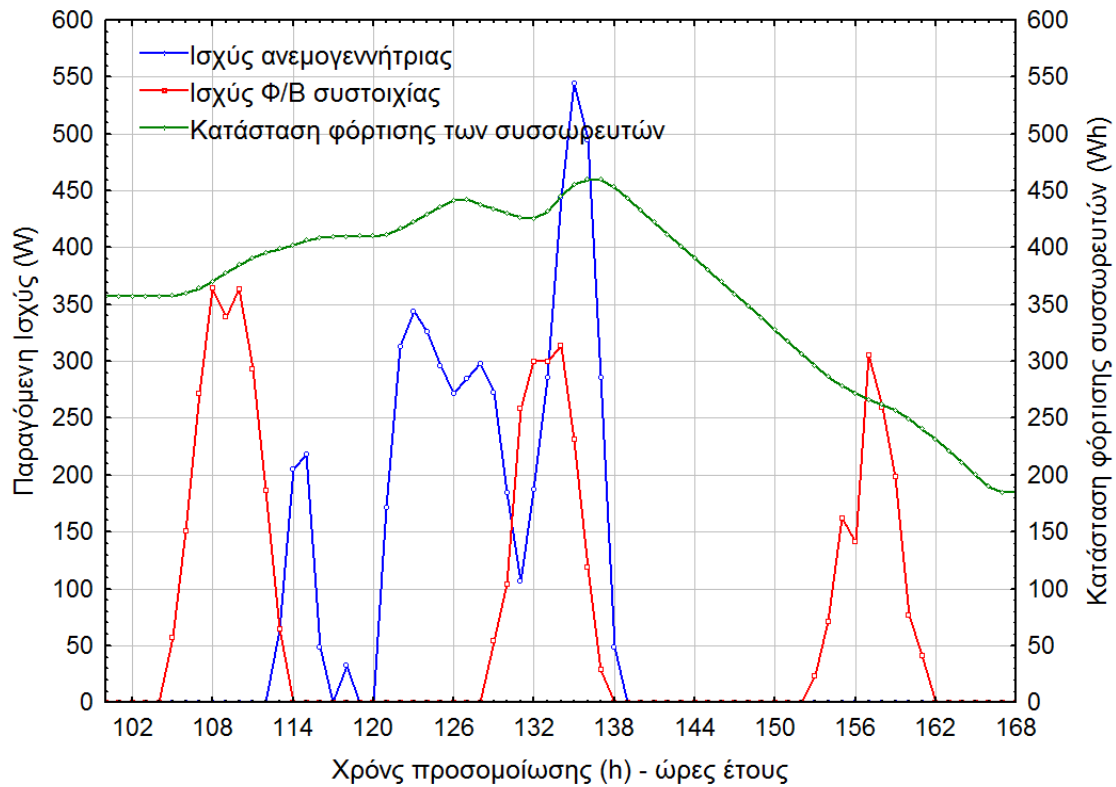
#### 4.7.2 Τοπολογία 2 – σύνδεση τη Φ/Β συστοιχία και την ανεμογεννήτρια με τη μονάδα ΑΩ μέσω των συσσωρευτών και ρυθμιστών φόρτισης

Στην παρούσα τοπολογία, (βλέπε Εικόνα 4-25) το τριφασικό ρεύμα της ανεμογεννήτριας μετατρέπεται σε συνεχές ρεύμα μέσω του ανορθωτή και στη συνέχεια αποθηκεύεται στους συσσωρευτές μέσω του ρυθμιστή φόρτισης. Ταυτόχρονα, το συνεχές ρεύμα της Φ/Β συστοιχίας αποθηκεύεται στους συσσωρευτές μέσω του ρυθμιστή φόρτισης της Φ/Β συστοιχίας. Ο κινητήρας της ΑΩ τροφοδοτείται με συνεχούς ρεύμα μέσω του συσσωρευτή και με έλεγχο on/off από το Φ/Β ρυθμιστή φόρτισης.

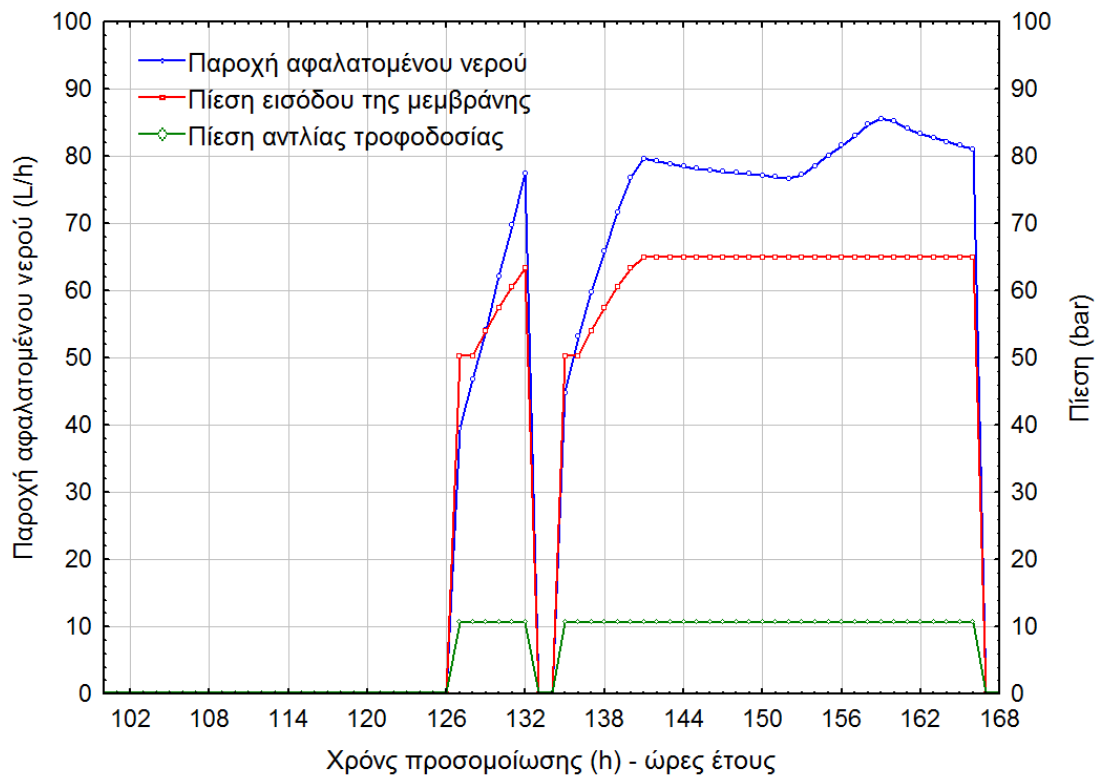


Εικόνα 4-25: Υβριδικό σύστημα με ανεμογεννήτρια, Φ/Β συστοιχία και συσσωρευτές, τοπολογία 2

Από την εφαρμογή των υπορουτίνων της τοπολογίας του υβριδικού συστήματος και σύμφωνα με τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα, η παραγόμενη ισχύς από την ανεμογεννήτρια και από τη Φ/Β συστοιχία καθώς και την κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών για τον μήνα Ιανουάριο, παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-26 όπου παρατηρείται ότι η παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια και τη Φ/Β συστοιχία είναι αρκετή για να λειτουργεί η μονάδα ΑΩ για περίπου δύο συνεχόμενων ημερών, βλέπε Εικόνα 4-27. Οι σταθερές συνθήκες λειτουργίας (πίεση και παροχή τροφοδοσίας) της μονάδας ΑΩ εξασφαλίζονται επίσης σε αυτήν την τοπολογία λόγω των συσσωρευτών. Οι αντίστοιχες τιμές για τον Ιούλιο μήνα φαίνονται στην Εικόνα 4-28 και στην Εικόνα 4-29 Το υβριδικό σύστημα μειώνει τον αριθμό κύκλων φόρτισης εκφόρτισης των συσσωρευτών, με αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου ζωής τους, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος.

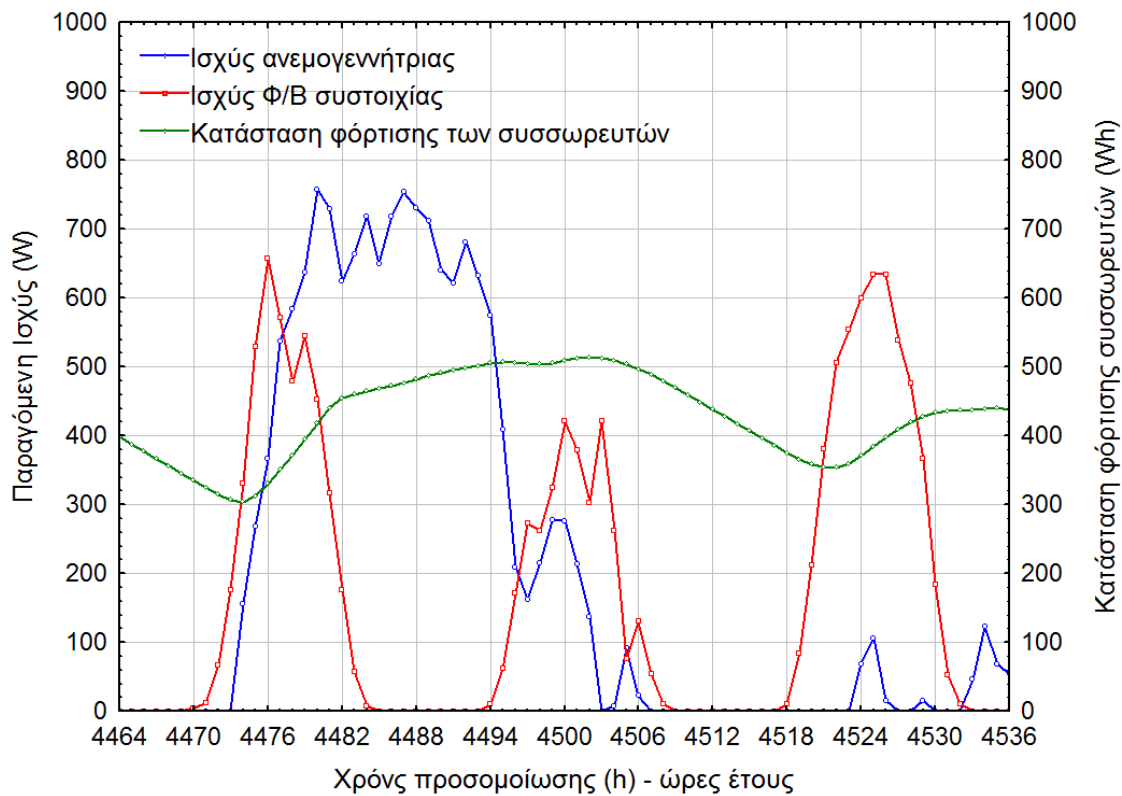


Εικόνα 4-26: Παραγωγή ισχύος από την ανεμογεννήτρια και από τη Φ/Β συστοιχία και η αντίστοιχη κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών για τον Ιανουάριο

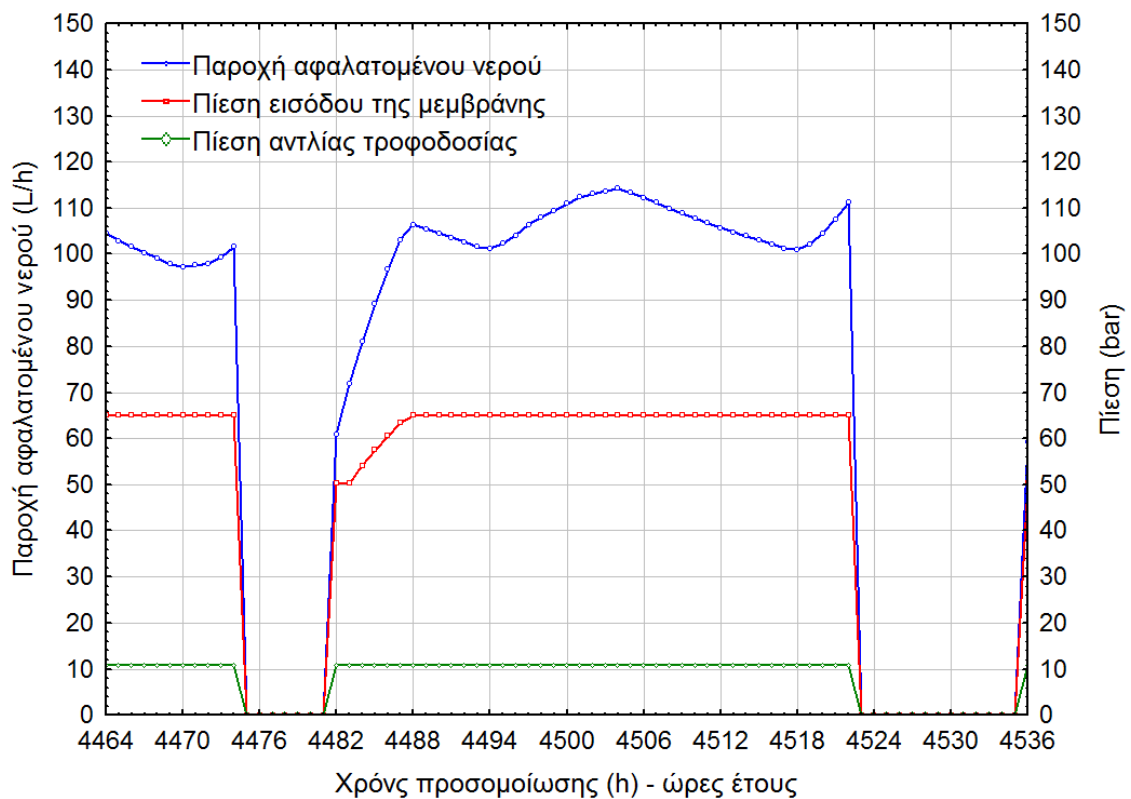


Εικόνα 4-27: Παραγωγή αφαλατωμένου νερού, πίεση τροφοδοσίας και πίεση εισόδου της μεμβράνης για τον Ιανουάριο





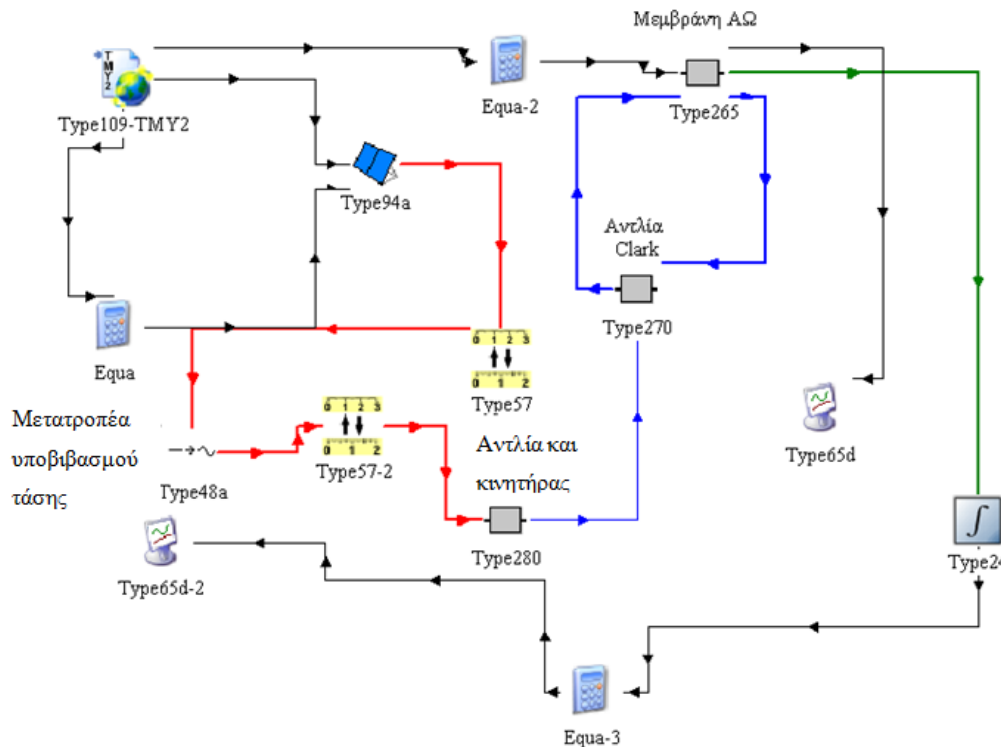
Εικόνα 4-28: Παραγωγή ισχύος από την ανεμογεννήτρια και από τη Φ/Β συστοιχία και η αντίστοιχη κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών για τον Ιούλιο



Εικόνα 4-29: Παραγωγή αφαλατωμένου νερού, πίεση τροφοδοσίας και πίεση εισόδου της μεμβράνης για τον Ιούλιο

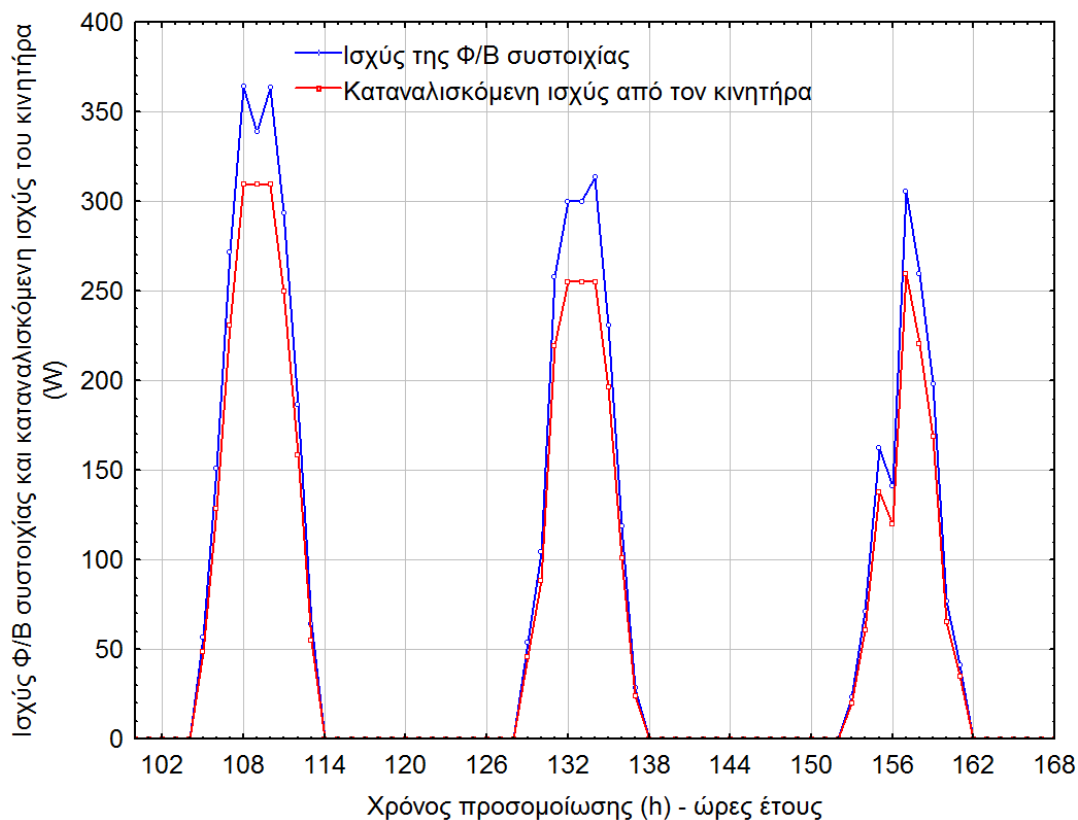
#### 4.7.3 Τοπολογία 3 – Απευθείας σύνδεση τη Φ/Β συστοιχίας με τη μονάδα ΑΩ μέσω μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

Σε αυτή την τοπολογία, η Φ/Β συστοιχία συνδέεται με τη μονάδα ΑΩ μέσω μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (ΣΡ/ΣΡ). Η χρήση του μετατροπέα πραγματοποιήθηκε με σκοπό τον έλεγχο του ρεύματος εκκίνησης του κινητήρα για πιθανή πρόωμη εκκίνηση και όσιμη διακοπή λειτουργίας του. Η Εικόνα 4-30 παρουσιάζει τον τρόπο σύνδεσης του μετατροπέα με τη μονάδα ΑΩ.

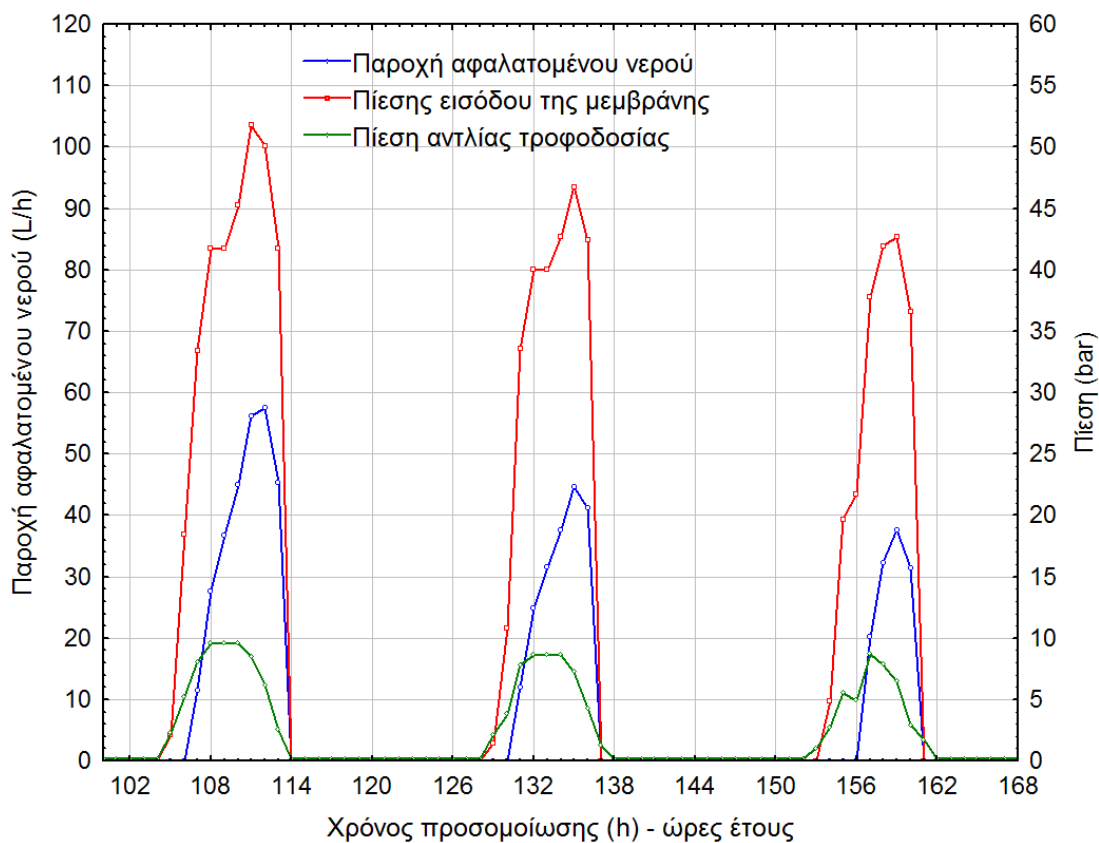


Εικόνα 4-30: Απευθείας σύνδεση τη Φ/Β συστοιχία με τη μονάδα ΑΩ μέσω μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, τοπολογία 3

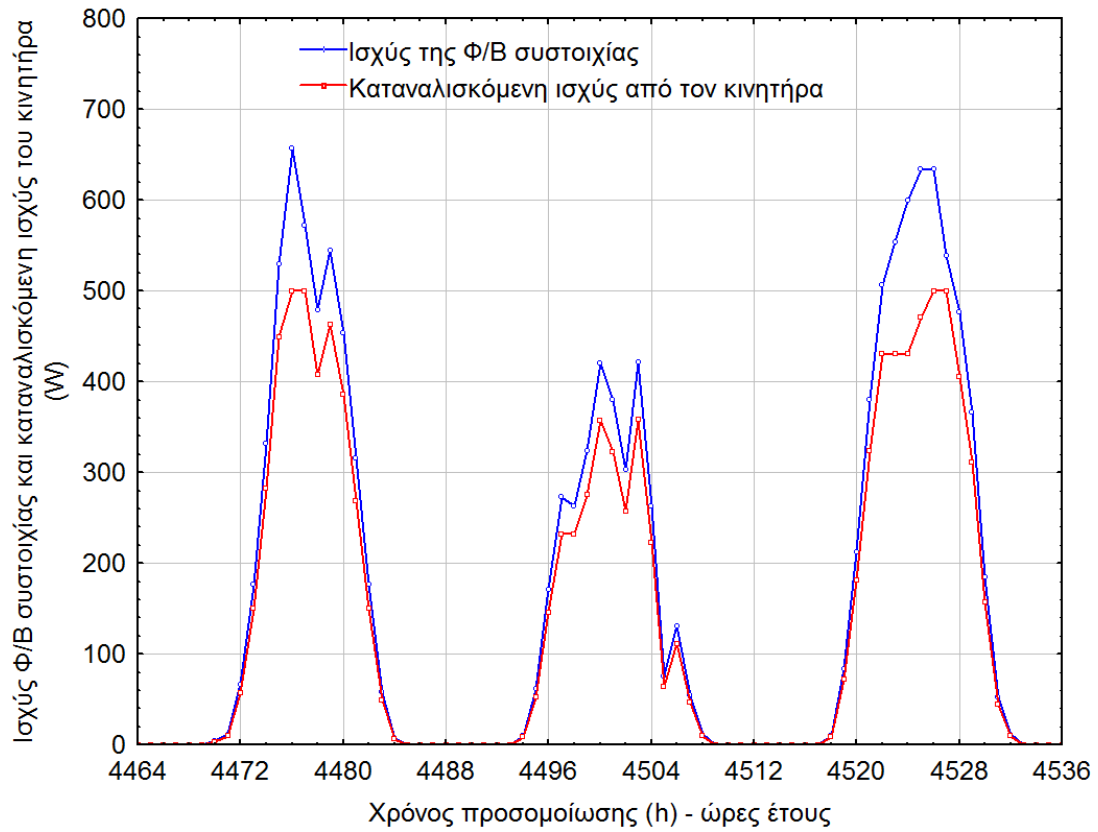
Η Εικόνα 4-31 παρουσιάζει την παραγόμενη ισχύ της Φ/Β συστοιχίας και την καταναλισκόμενη ισχύ από το κινητήρα της μονάδας ΑΩ. Παρατηρείται ότι υπάρχει ένα ποσοστό ενέργειας που χάνεται λόγω απωλειών κυρίως του μετατροπέα του οποίου η αποδοτικότητα κυμαίνεται μεταξύ 80-85%. Στην Εικόνα 4-32, η οποία παρουσιάζει τη λειτουργία της μονάδας ΑΩ, παρατηρείται ότι η παραγωγή του αφαλατωμένου νερού ακολουθεί την παραγωγή ισχύος από τη Φ/Β συστοιχία και η μονάδα ΑΩ λειτουργεί για περίπου 5 ώρες/ημέρα. Η παραγωγή του αφαλατωμένου νερού ξεκινάει αφού η πίεση εισόδου της μεμβράνης ξεπερνά τα 35 bar, μια τιμή που συμφωνεί και με τα πειραματικά αποτελέσματα του κεφάλαιο 3. Για το μήνα Ιούλιο (βλέπε Εικόνα 4-33 και Εικόνα 4-34), παρατηρείται επίσης ότι η μονάδα ΑΩ λειτουργεί για περίπου 10 ώρες/ημέρα λόγω αύξησης της ηλιακής ακτινοβολίας.



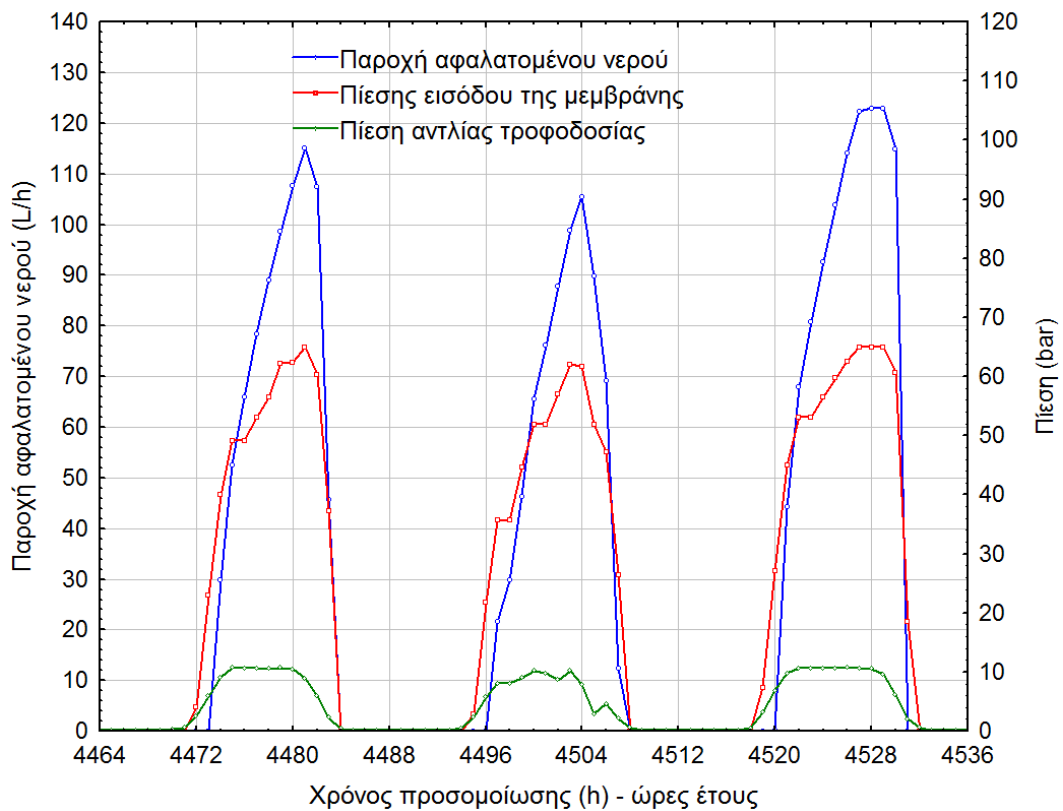
Εικόνα 4-31: Η παραγωγή ισχύος από τη Φ/Β συστοιχία και η καταναλισκόμενη ισχύς από το κινητήρα της μονάδας ΑΩ τον Ιανουάριο



Εικόνα 4-32: Πίεση και παροχή της μονάδας ΑΩ τον Ιανουάριο



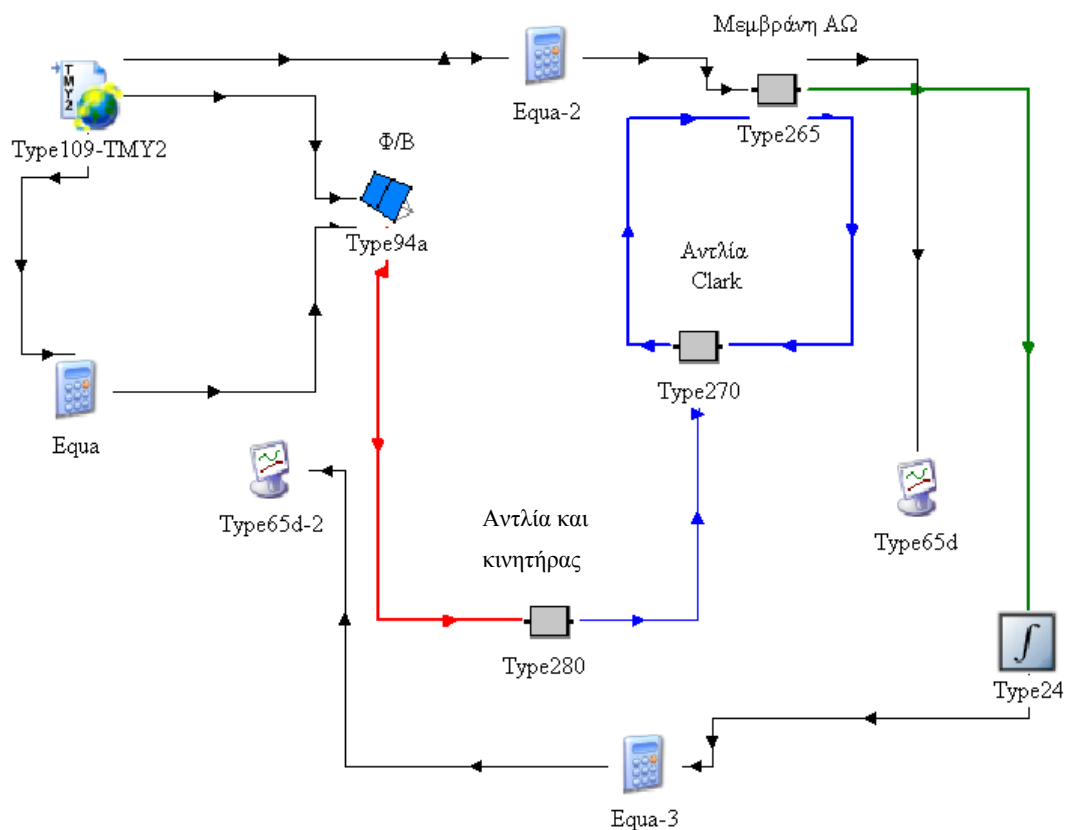
Εικόνα 4-33: Η παραγωγή ισχύος από τη Φ/Β συστοιχία και η καταναλισκόμενη Ισχύς από το κινητήρα της μονάδας ΑΩ τον Ιούλιο



Εικόνα 4-34: Πίεση και παροχή της μονάδας ΑΩ τον Ιούλιο

#### 4.7.4 Τοπολογία 4 – Απευθείας σύνδεση της Φ/Β συστοιχίας με τη μονάδα ΑΩ

Σε αυτήν τη συνδεσμολογία η Φ/Β συστοιχία συνδέεται απευθείας (χωρίς συσσωρευτές ή μετατροπείς) με το κινητήρα συνεχούς ρεύματος της μονάδας ΑΩ, όπως αυτό φαίνεται στην Εικόνα 4-35. Δηλαδή ο θετικός και ο αρνητικός αγωγός συνδέονται με το θετικό και αρνητικό πόλο του κινητήρα της μονάδας ΑΩ. Το μόνο εξάρτημα που μεσολαβεί μεταξύ τη Φ/Β συστοιχία και το κινητήρα είναι ένας ηλεκτρονόμος διακόπτης, ο οποίος σε περίπτωση υπερφόρτισης ή βραχυκυκλώματος διακόπτει τη λειτουργία του κινητήρα.

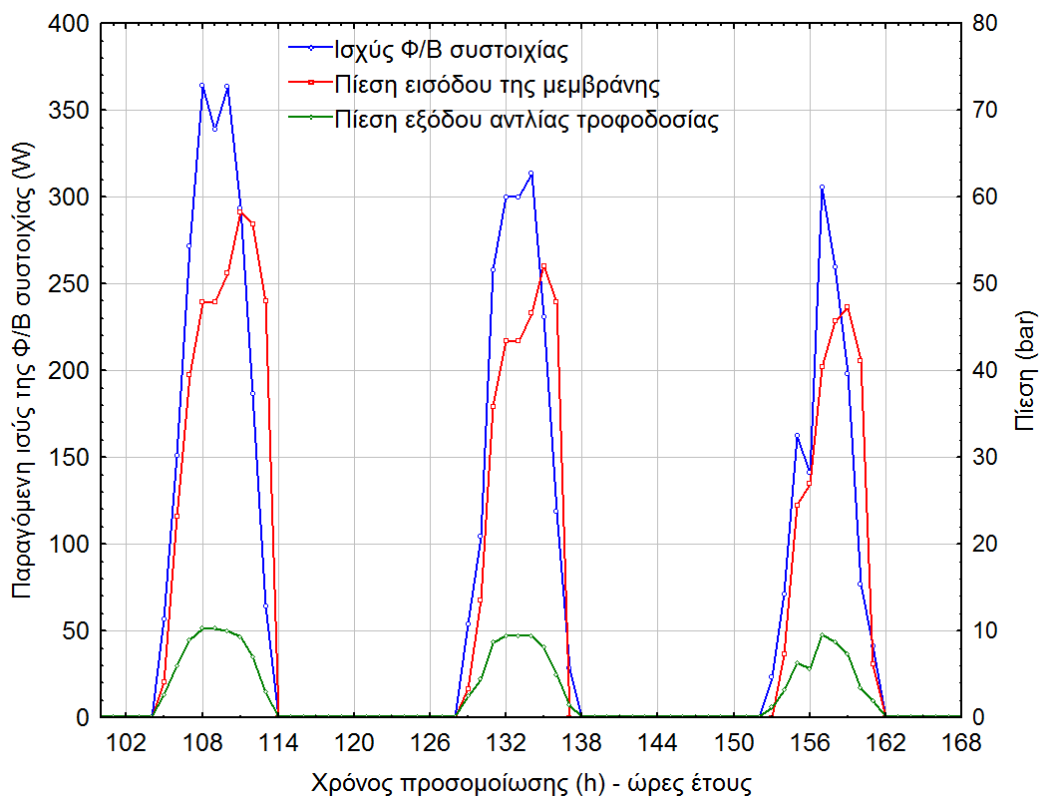


Εικόνα 4-35: Απευθείας σύνδεση της Φ/Β συστοιχίας με την μονάδα ΑΩ, τοπολογία 4

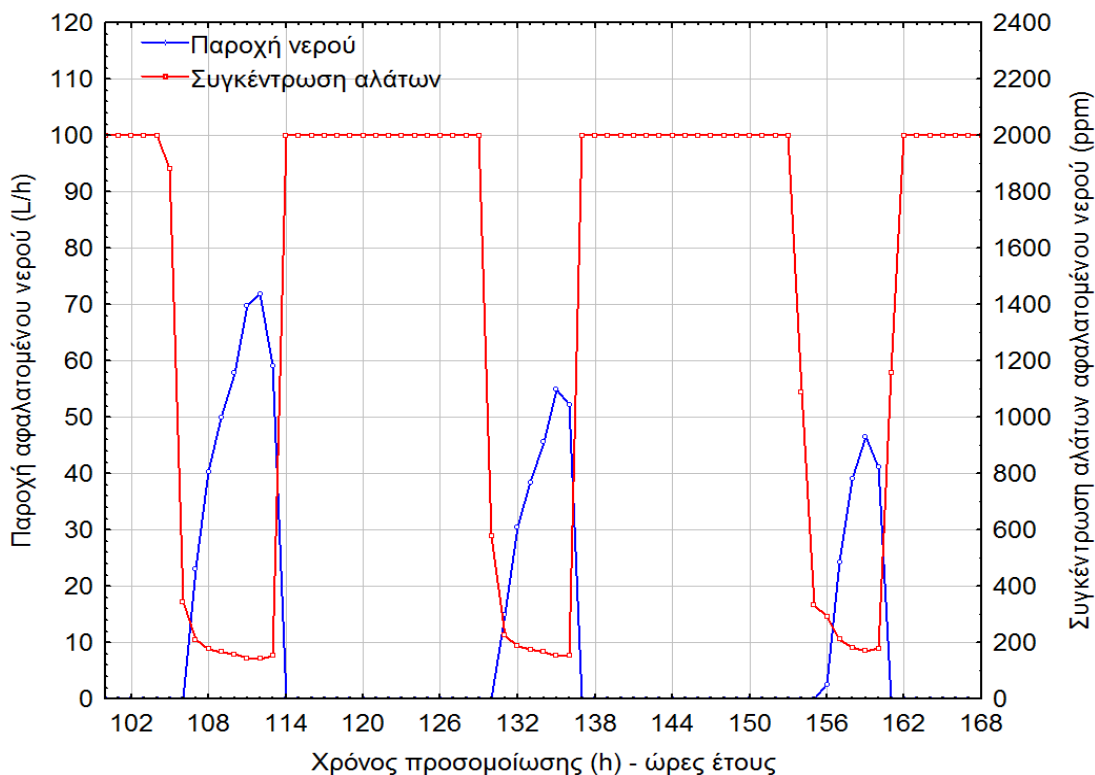
Στην τοπολογία της απευθείας σύνδεσης, η παραγόμενη ενέργεια από τη Φ/Β συστοιχία μεταφέρεται με ελάχιστες απώλειες προς το κινητήρα, και ως αποτέλεσμα γίνεται καλύτερη χρήση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μικρές απώλειες στην παραγόμενη ενέργεια οφείλονται στις αντιστάσεις των ηλεκτρικών αγωγών. Στην Εικόνα 4-36, παρατηρείται ότι η πίεση της αντλίας τροφοδοσίας και η πίεση εισόδου της μεμβράνης ακολουθούν το προφίλ της παραγόμενης ισχύος της Φ/Β συστοιχίας, δηλαδή μη σταθερές συνθήκες λόγω της απευθείας σύνδεσης. Η αστάθεια της παραγόμενης ισχύος όμως δεν

επηρεάζει την ποσότητα και τη συγκέντρωση των αλάτων του αφαλατωμένου νερού η οποία κυμαίνεται κατά μέσο όρο στα 300 ppm, βλέπε Εικόνα 4-37.

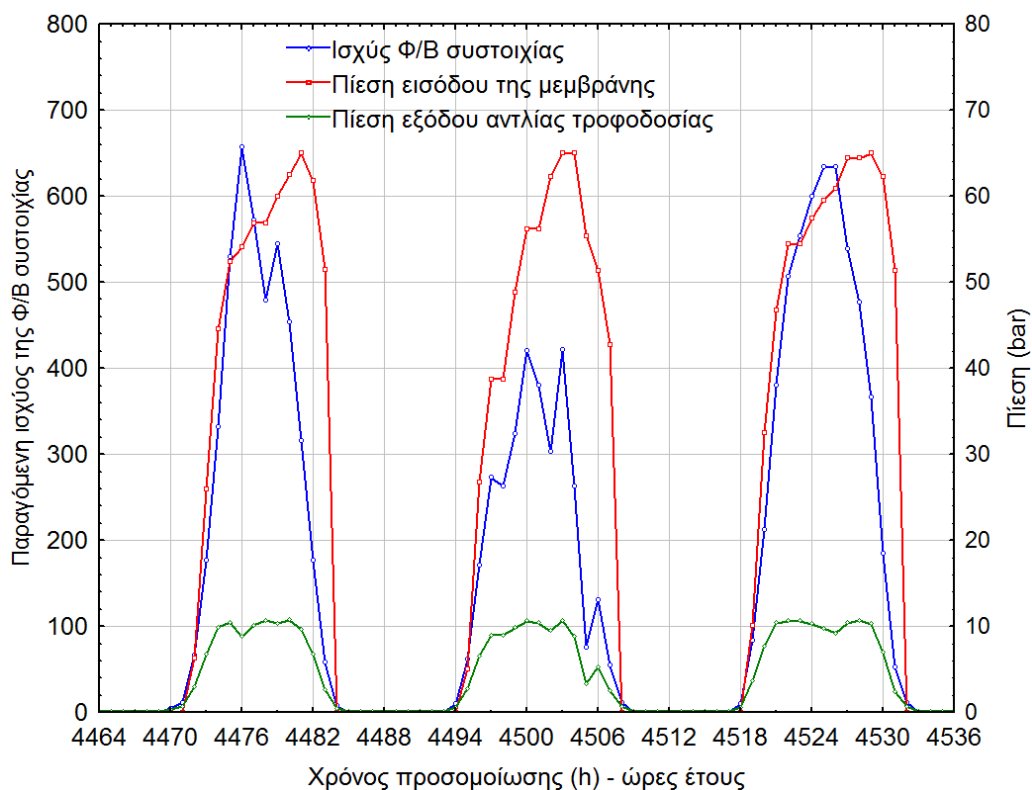
Κατά τον μήνα Ιούλιο, παρατηρείται ότι η παραγόμενη ισχύς της Φ/Β συστοιχίας διπλασιάζεται με αποτέλεσμα να αυξηθεί η πίεση εισόδου της μεμβράνης, βλέπε Εικόνα 4-38. Η αύξηση της πίεσης εισόδου της μεμβράνης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγόμενης ποσότητας και μείωση της συγκέντρωσης των αλάτων του αφαλατωμένου νερού, βλέπε Εικόνα 4-39.



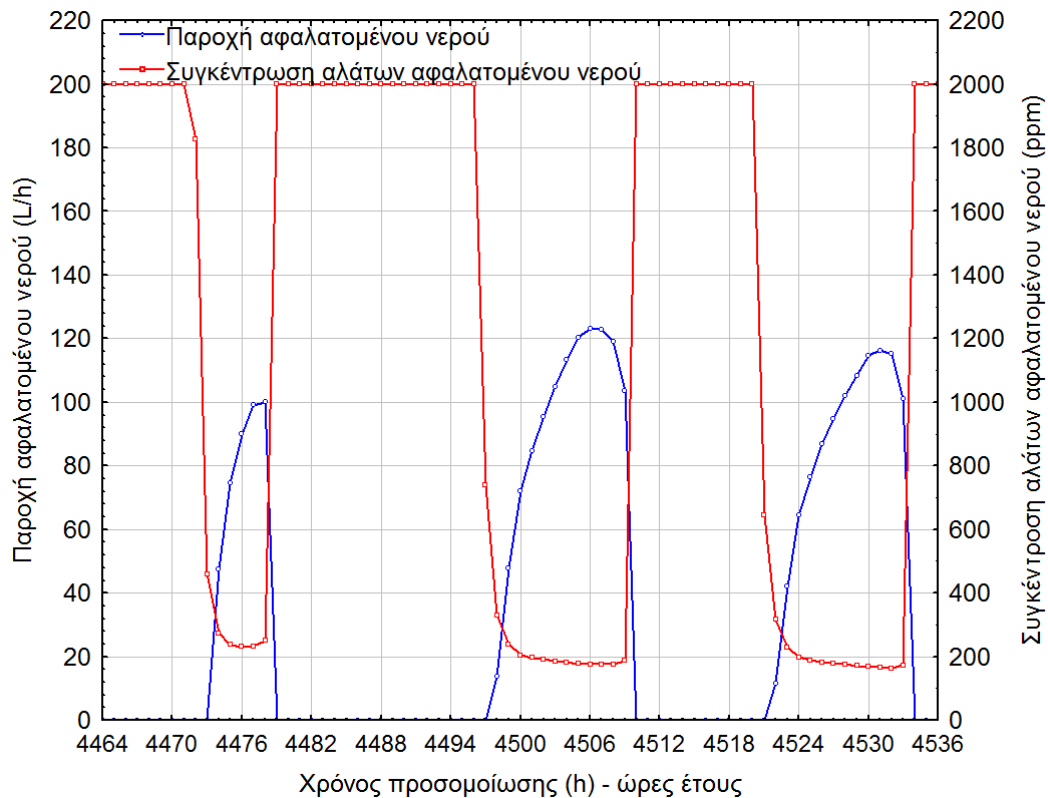
Εικόνα 4-36: Ισχύς της Φ/Β συστοιχίας και η πίεση της αντλίας τροφοδοσίας και της εισόδου της μεμβράνης για τον Ιανουάριο



Εικόνα 4-37: Παροχή και ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού για τον Ιανουάριο



Εικόνα 4-38: Ισχύς της Φ/Β συστοιχίας και η πίεση της αντλίας τροφοδοσίας και της εισόδου της μεμβράνης για τον Ιούλιο

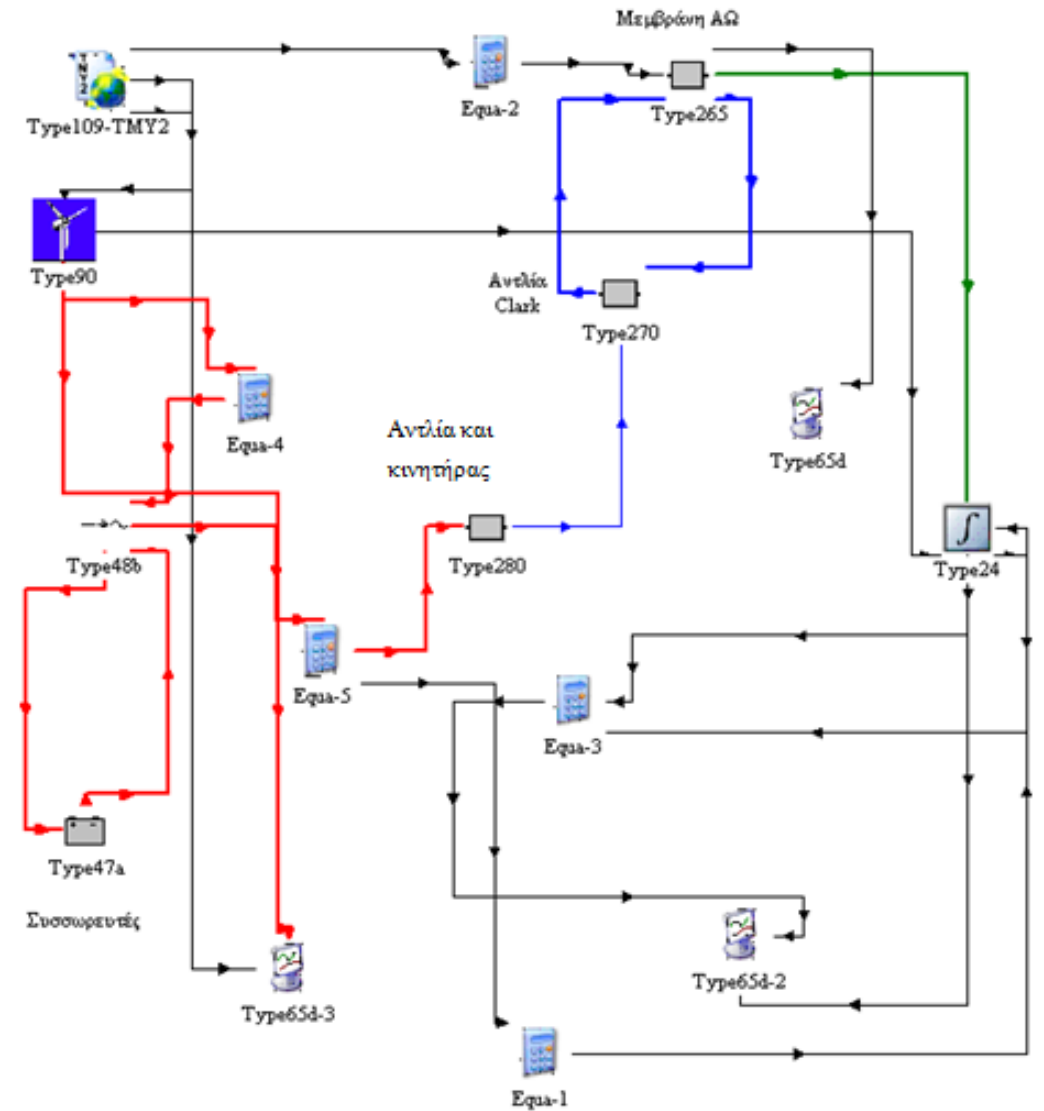


Εικόνα 4-39: Παροχή και ηλεκτρική αγωγιμότητα του αφαλατωμένου νερού για τον Ιούλιο

#### 4.7.5 Τοπολογία 5 – Σύνδεση της μονάδας ΑΩ με ανεμογεννήτρια και συσσωρευτές

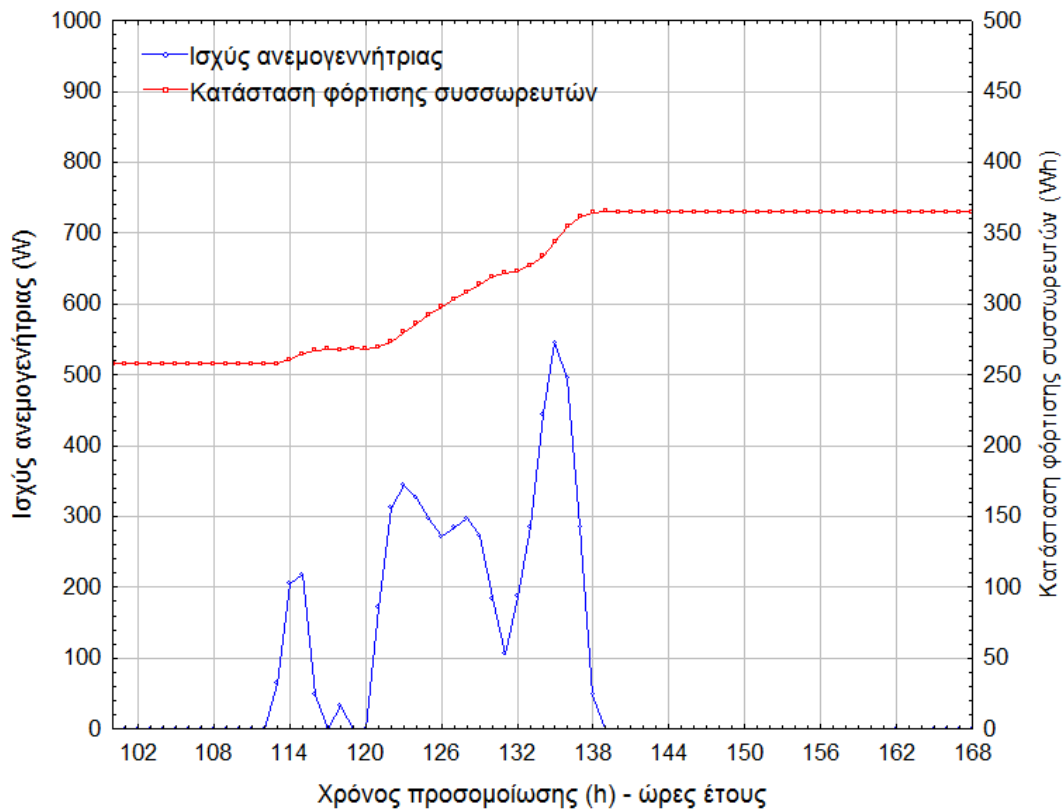
Σε αυτήν την τοπολογία, η ηλεκτρική ενέργεια από την ΑΓ φτάνει στον κινητήρα της μονάδας ΑΩ, μέσω του συσσωρευτή και του ανορθωτή - ρυθμιστή φόρτισης, βλέπε Εικόνα 4-40.



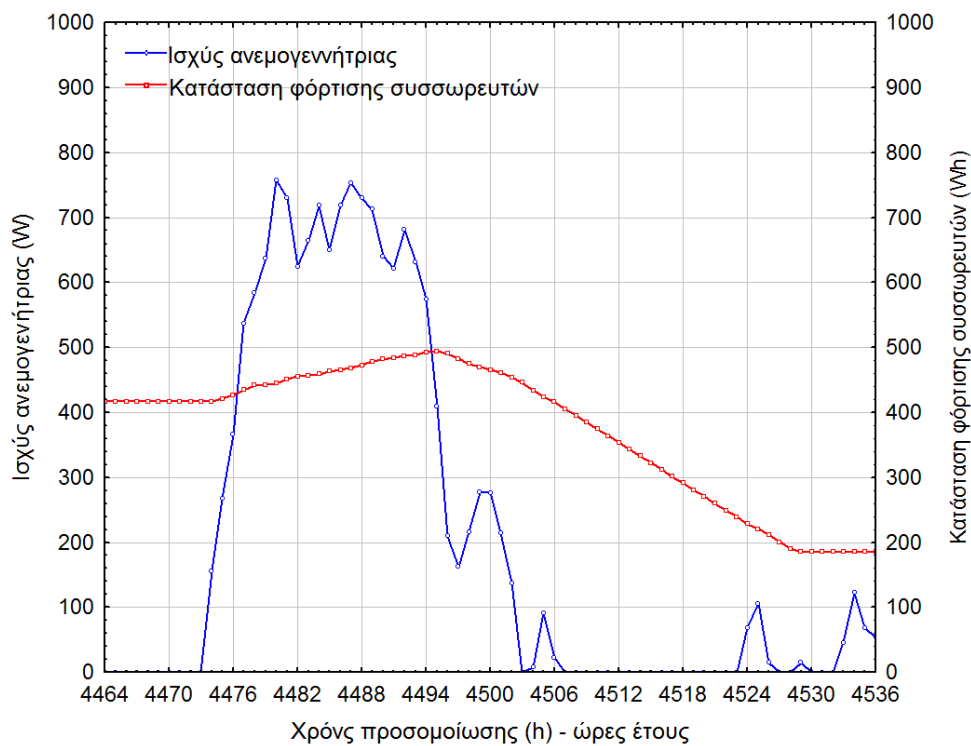


Εικόνα 4-40: Σύνδεση της μονάδας ΑΩ με ανεμογεννήτρια και συσσωρευτές, τοπολογία 5

Λόγω του χαμηλού αιολικού δυναμικού στην Αθήνα, κατά τη διάρκεια των τελευταίων τριών ημερών του Ιανουαρίου, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από την ανεμογεννήτρια δεν επαρκεί για την φόρτιση των συσσωρευτών, βλέπε Εικόνα 4-41. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μονάδα ΑΩ να μην τίθεται σε λειτουργία. Κατά τον μήνα Ιούλιο, το αιολικό δυναμικό επιτρέπει τη φόρτιση των συσσωρευτών σε σημείο μεγαλύτερο από το SOC 70% (441Wh), βλέπε Εικόνα 4-42.

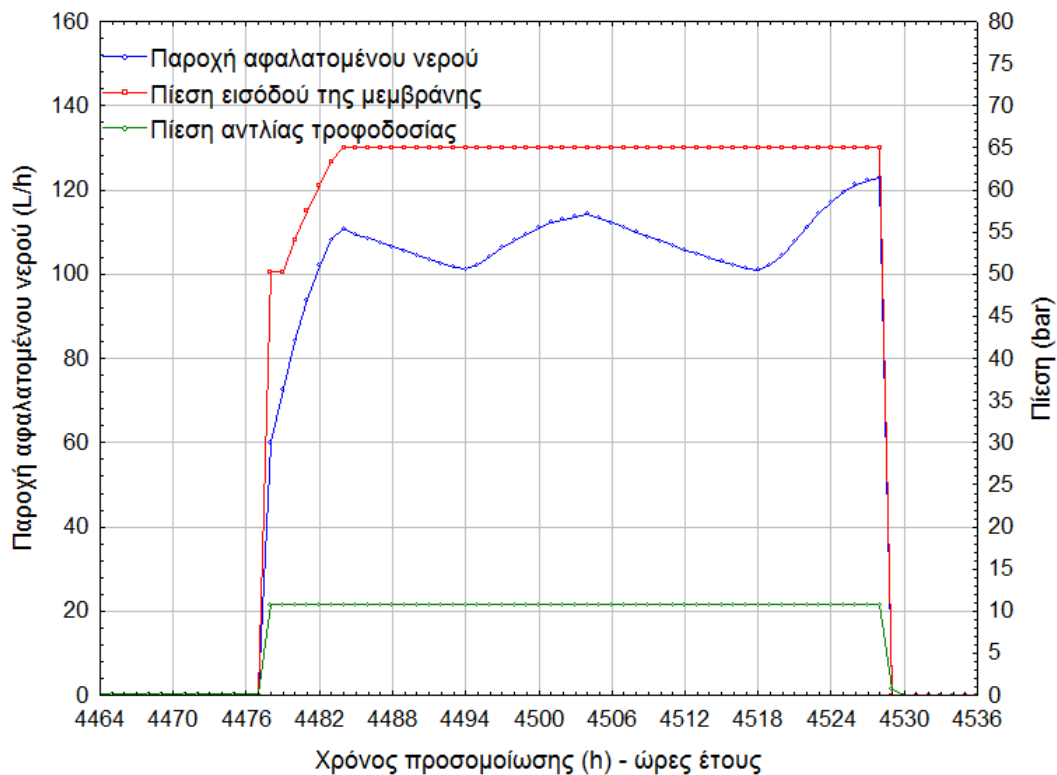


Εικόνα 4-41: Η ισχύς ανεμογεννήτριας και η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών για τον Ιανουάριο



Εικόνα 4-42: Η ισχύς ανεμογεννήτριας και η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών για τον Ιούλιο

Η μονάδα ΑΩ τίθεται σε λειτουργία σε σταθερές συνθήκες πίεσης και παροχής λόγω των συσσωρευτών για περίπου δυόμιση ημέρες όποτε διακόπτεται η λειτουργία της μονάδας ΑΩ για να ξαναφορτιστούν οι συσσωρευτές, βλέπε Εικόνα 4-43.



Εικόνα 4-43: Παροχή αφαλατωμένου νερού και η πίεση της αντλίας τροφοδοσίας και της εισόδου μεμβράνης για τον Ιούλιο

Η προσομοίωση του συνολικού συστήματος πραγματοποιήθηκε για τις πέντε τοπολογίες για ένα τυπικό έτος στην Αθήνα με σκοπό την πρόβλεψη της ετήσιας παραγόμενης ποσότητας του αφαλατωμένου νερού. Οι ποσότητες αυτές καταγράφονται στον πίνακα 4-5, όπου παρατηρείται ότι η ετήσια παραγωγή της απευθείας σύνδεσης είναι μεγαλύτερη από αυτή της απευθείας σύνδεση μέσω μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ. Αυτό οφείλεται στο ότι παρόλο την πρώιμη εκκίνηση του κινητήρα, με χρήση του μετατροπέα, υπάρχει απώλεια ενέργειας λόγω της απόδοσης του μετατροπέα. Η χρήση ανεμογεννήτριας και Φ/Β αυξάνει σημαντικά την παραγωγή του αφαλατωμένου νερού λόγω αύξησης της διαθέσιμης ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα δεδομένα αυτά της προσομοίωσης θα χρησιμοποιηθούν στο επόμενο κεφάλαιο για υπολογιστεί ο κόστος του αφαλατωμένου νερού για κάθε τοπολογία.

Πίνακας 4-5: Ετήσια ποσότητα αφαλατωμένου νερού για κάθε τοπολογία

| Τοπολογία                                    | Ετήσια ποσότητα<br>αφαλατωμένου νερού (m <sup>3</sup> /έτος) |
|--|--|
| Τοπολογία 1 (Φ/Β+συσσωρευτές)                | 257  |
| Τοπολογία 2 (Φ/Β+συσσωρευτές+ανεμογεννήτρια) | 630  |
| Τοπολογία 3 (Φ/Β+μετατροπέας ΣΡ/ΣΡ)          | 325  |
| Τοπολογία 4 (μόνο Φ/Β)                       | 330  |
| Τοπολογία 5 (μόνο ανεμογεννήτρια)            | 353  |

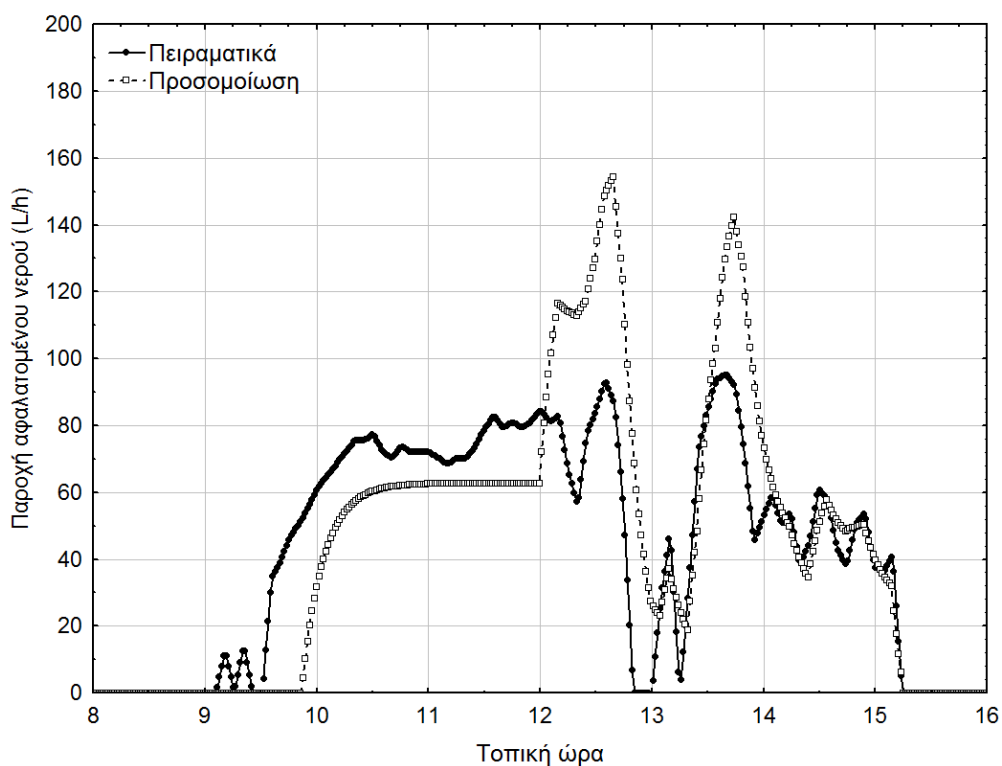
#### 4.8 Σύγκριση πειραματικών δεδομένων με αποτελέσματα προσομοίωσης του συνολικού συστήματος

Κρίνεται απαραίτητο σε αυτό το στάδιο να προσδιοριστεί η ακρίβεια του συνολικού μοντέλου προσομοίωσης του συστήματος στο TRNSYS. Το προτεινόμενο μοντέλο προσομοίωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσομοίωση λειτουργίας συστημάτων αφαλάτωσης ΑΩ εξοπλισμένα με ανακτητή ενέργειας και που τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ. Το τελικό αποτέλεσμα της προσομοίωσης και το οποίο επηρεάζεται από τα αποτελέσματα των άλλων ρουτινών είναι η παροχή και η συγκέντρωση αλάτων του αφαλατωμένου νερού. Η σύγκριση πραγματοποιείται μεταξύ μετρήσεων και δεδομένων προσομοίωσης που προέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον λογισμικού TRNSYS, τα επιμέρους υπο-μοντέλα του οποίου παρουσιάστηκαν πιο πάνω. Η σύγκριση έγινε για χρονικές περιόδους για τις οποίες ήταν διαθέσιμα πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα μιας ημέρας, καθώς και πειραματικά αποτελέσματα από τη λειτουργία του συστήματος. Τα κλιματολογικά δεδομένα των περιόδων αυτών εισήχθησαν ως αρχείο εισόδου στο λογισμικό TRNSYS. Τα πειραματικά δεδομένα προέρχονται από τη σύνδεση της μονάδας ΑΩ στην τοπολογία 4 (απευθείας σύνδεση χωρίς συσσωρευτές και μετατροπέα), και αντιστοιχούν στα πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα που παρουσιάστηκαν στην Εικόνα 3-55. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων και ο συντελεστής συσχέτισης (82%) για της παροχή αφαλατωμένου νερού παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-44 και στην Εικόνα 4-45 αντίστοιχα.

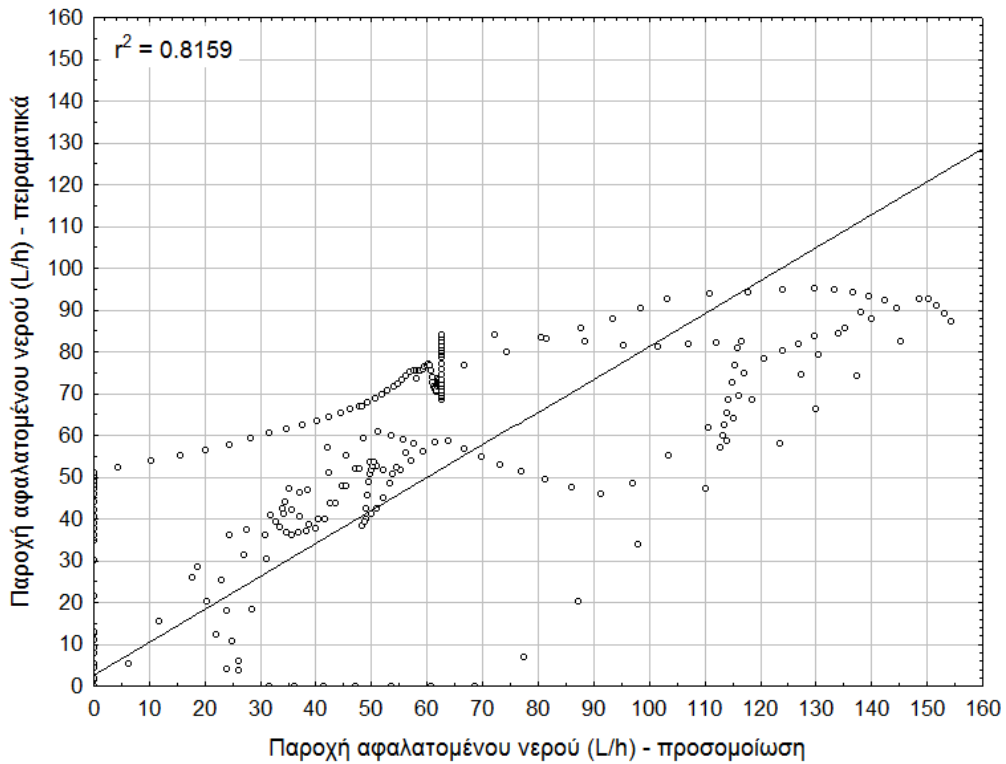
Για την ίδια ημέρα καταγράφονται τα πειραματικά δεδομένα της συγκέντρωσης των αλάτων του αφαλατωμένου νερού και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Στην Εικόνα 4-46 παρουσιάζεται η σύγκριση των πειραματικών και των θεωρητικών

δεδομένων, ενώ στην Εικόνα 4-47 παρουσιάζεται ο συντελεστής συσχέτισης αυτής της σύγκρισης (82%).

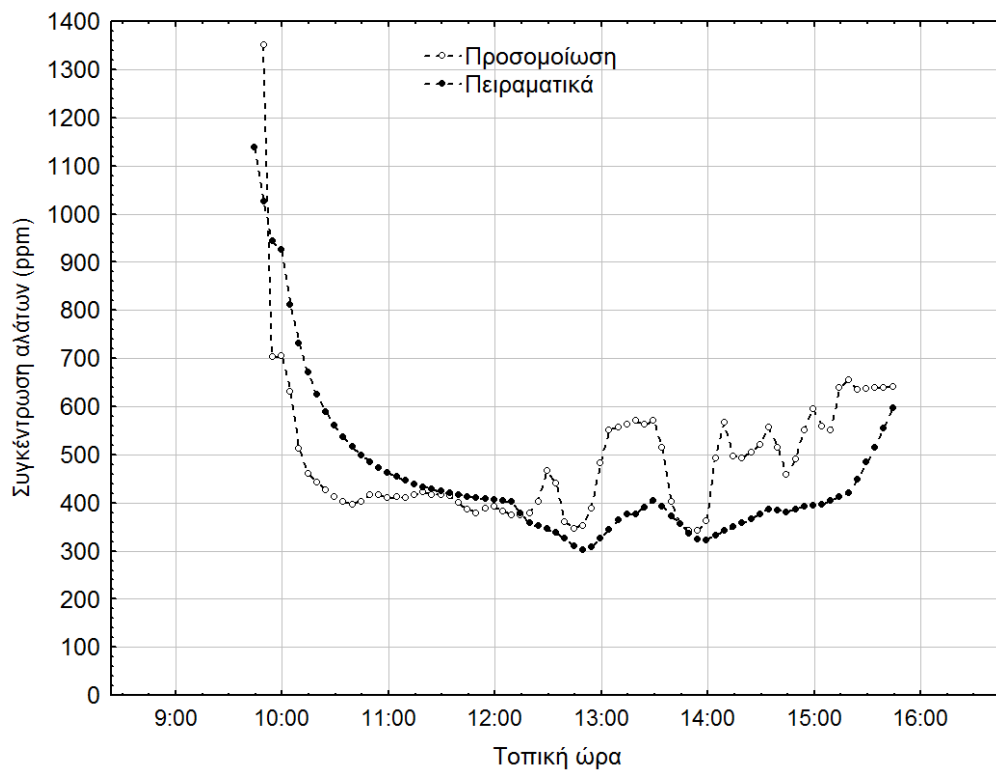
Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα που αφορούν την επικύρωση του μοντέλου του συνολικού συστήματος δεν είναι τόσο ικανοποιητικά όσο αυτά της επικύρωσης των επιμέρους υπό-συστημάτων. Οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν μπορούν να αποδοθούν στην ύπαρξη μεταβατικών φαινομένων και αδρανειακών καταστάσεων που δεν έχουν παρθεί υπόψη από το συνολικό αυτό μοντέλο. Το μοντέλο όμως αυτό κρίνεται ως ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για προσομοίωση της συγκεκριμένης μονάδας ΑΩ σε διάφορες τοποθεσίες ή προσομοίωση διαφόρων μεγεθών μονάδων ΑΩ με σκοπό τον προσδιορισμό του βέλτιστου σχεδιασμού.



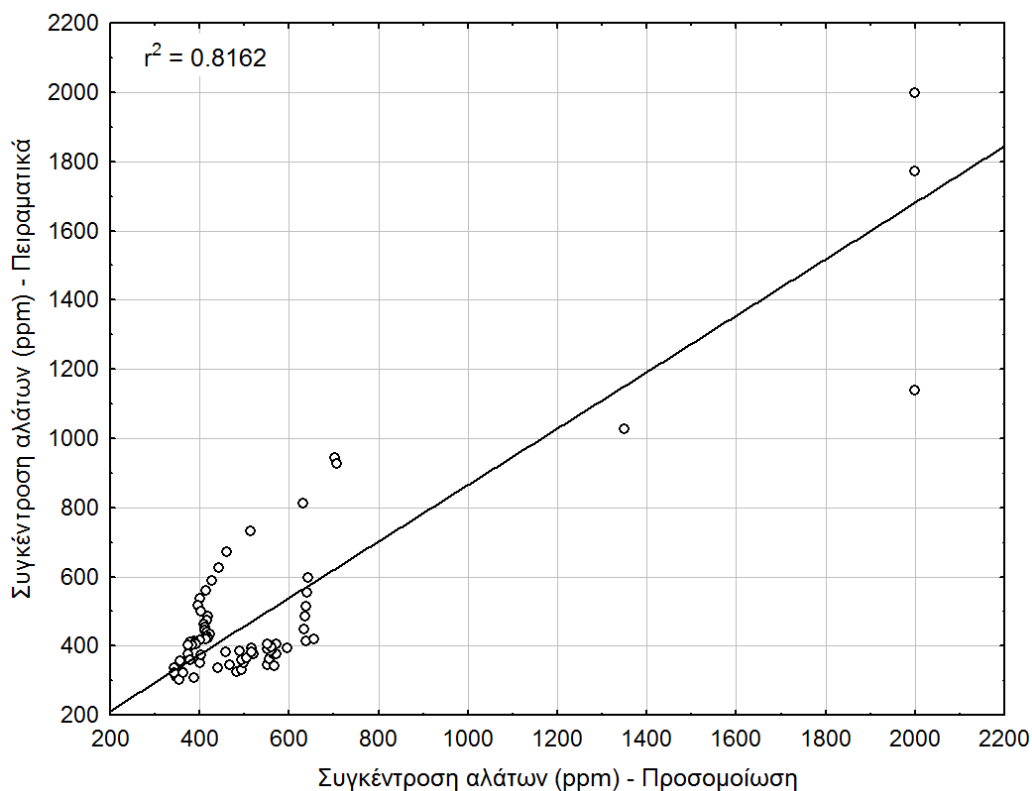
Εικόνα 4-44: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για την παροχή του αφαλατωμένου νερού



Εικόνα 4-45: Ο συντελεστής συσχέτισης των θεωρητικών και των πειραματικών δεδομένων της παροχής του αφαλατωμένου νερού



Εικόνα 4-46: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για συγκέντρωση των αλάτων του αφαλατωμένου



Εικόνα 4-47: Ο συντελεστής συσχέτισης των θεωρητικών και των πειραματικών δεδομένων της συγκέντρωσης των αλάτων του αφαλατωμένου νερού

#### 4.9 Συμπεράσματα

- Το λογισμικό TRNSYS είναι ένα επεκτάσιμο δυναμικό περιβάλλον λεπτομερούς προσομοίωσης ενεργειακών συστημάτων ΑΠΕ. Το μεγάλο πλεονέκτημα του TRNSYS είναι η αρθρωτή δομή του που το κάνει κατάλληλο και εύκολο στη χρήση σε πάρα πολλά πολύπλοκα συστήματα. Το TRNSYS περιέχει μεγάλη βιβλιοθήκη υποπρογραμμάτων προσομοίωσης διαφόρων συστημάτων και ταυτόχρονα επιτρέπει την προσθήκη καινούριων μοντέλων και η σύνδεσή τους με την βασική βιβλιοθήκη του TRNSYS.
- Τα υπάρχοντα μοντέλα προσομοίωσης της μεμβράνης ΑΩ είτε είναι πολύ πολύπλοκα και εξυπηρετούν τη μικροσκοπική ανάλυση των υλικών των μεμβρανών είτε δεν καλύπτουν τις ανάγκες λειτουργίας της μεμβράνης σε μεταβλητές συνθήκες πίεσης και παροχής. Το προτεινόμενο μοντέλο της μεμβράνης είναι απλό και αποτελεσματικό στις μεταβλητές συνθήκες λειτουργίας της μεμβράνης. Το μοντέλο συνδυάζει τις πειραματικές εμπειρικές παραμέτρους και τις αναλυτικές εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία των μεμβρανών ΑΩ.

- Αναπτύχθηκαν μοντέλα για την αντλία Clark και για τον κινητήρα-αντλία τροφοδοσίας που βασίζονται σε αναλυτικές εξισώσεις που περιγράφουν την αρχή διατήρησης της μάζας και της ενέργειας στην αντλία Clark, ενώ για το κινητήρα και για την αντλία τροφοδοσίας χρησιμοποιήθηκαν εμπειρικές εξισώσεις που αντιπροσωπεύουν τα πειραματικά δεδομένα της λειτουργίας και της αντλίας και του κινητήρα.
- Η επικύρωση των αποτελεσμάτων των καινούριων μοντέλων πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια, το πρώτο είναι η επικύρωση του κάθε μοντέλου ξεχωριστά (σε μορφή FORTRAN) και ύστερα η επικύρωση των καινούριων μοντέλων σε συνδυασμό με τα άλλα μοντέλα του TRNSYS. Ο συντελεστής συσχέτισης για την επικύρωση των μοντέλων στη FORTRAN αγγίζει το 99% ενώ στην περίπτωση της επικύρωσης του συνολικού μοντέλου φτάνει μέχρι 81%.
- Τα αποτελέσματα που αφορούν την επικύρωση του μοντέλου του συνολικού συστήματος δεν ήταν τόσο ικανοποιητικά όσο αυτά της επικύρωσης των επιμέρους υπό-συστημάτων. Οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν μπορούν να αποδοθούν στην ύπαρξη μεταβατικών φαινομένων και αδρανειακών καταστάσεων που δεν έχουν παρθεί υπόψη από το συνολικό αυτό μοντέλο. Το μοντέλο όμως αυτό κρίνεται ως ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για προσομοίωση της συγκεκριμένης μονάδας ΑΩ σε διάφορες τοποθεσίες ή προσομοίωση διαφόρων μεγεθών μονάδων ΑΩ με σκοπό τον προσδιορισμό του βέλτιστου σχεδιασμού.
- παρατηρείται ότι η ετήσια παραγωγή αφαλατωμένου νερού της απευθείας σύνδεσης είναι μεγαλύτερη από αυτή της απευθείας σύνδεση μέσου μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ. Αυτό οφείλεται στο ότι παρόλο την πρώιμη εκκίνηση του κινητήρα, με χρήση του μετατροπέα, υπάρχει απώλεια ενέργειας λόγω της απόδοσης του μετατροπέα. Η χρήση ανεμογεννήτριας και Φ/Β (υβριδικός σχεδιασμός) αυξάνει σημαντικά την παραγωγή του αφαλατωμένου νερού λόγω της συμπληρωματικότητας της ηλιακής και αιολικής ενέργειας.
- Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των τοπολογιών έδειξαν ότι η τοπολογία 2 (υβριδικός σχεδιασμός) προσφέρει τη μεγαλύτερη ετήσια ποσότητα αφαλατωμένου νερού, ακολουθεί η τοπολογία 4 (απευθείας σύνδεση). Η τοπολογία 4 (απευθείας σύνδεση) επιλέγεται ως η πλέον τεχνικά κατάλληλη λόγω του απλού σχεδιασμού.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου για ένα τυπικό έτος, θα χρησιμοποιηθούν στην οικονομική ανάλυση που ακολουθεί στο επόμενο κεφάλαιο





## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:**

# **ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ / ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**



## 5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ / ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

### 5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύσσεται ένα μοντέλο για την οικονομική αξιολόγηση των συστημάτων αφαλάτωσης σε συνδυασμό με ΑΠΕ. Καταρχήν, παρουσιάζονται οι βασικές οικονομικές έννοιες και ορισμοί έτσι ώστε να είναι πιο κατανοητή η παρουσίαση του οικονομικού μοντέλου. Στη συνέχεια, αναφέρονται οι κυριότεροι παράμετροι που επηρεάζουν το κόστος του παραγόμενου νερού από αφαλάτωση.

Χρησιμοποιείται η μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo για την οικονομική αξιολόγηση του συστήματος σε συνθήκες αβεβαιότητας, με σκοπό όχι μόνο τον προσδιορισμό του κόστους του αφαλατωμένου νερού αλλά τον προσδιορισμό της πιθανότητας ότι η καθαρή παρούσα αξία (ΚΠΑ) της επένδυσης να είναι θετική.

Τελικά, εφαρμόζεται η προσομοίωση Monte Carlo για κάθε τοπολογία σύνδεσης των συστημάτων ΑΠΕ με τη μονάδα ΑΩ, με σκοπό τον προσδιορισμό της βέλτιστης τοπολογίας από οικονομικής άποψης. Η βέλτιστη οικονομικά τοπολογία είναι αυτή που έχει τη μεγαλύτερη τιμή της καθαρής παρούσας αξίας και ταυτόχρονα μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης αυτής της ΚΠΑ κατά τη διάρκεια των στοχαστικών επαναλήψεων της προσομοίωσης Monte Carlo.

### 5.2 Γενικές οικονομικές έννοιες και ορισμοί

#### 5.2.1 Το κεφάλαιο ή η αρχική επένδυση

Το κεφάλαιο που χρησιμοποιείται για την αρχική επένδυση είναι ένας από τους συντελεστές της παραγωγής, δηλαδή συμμετέχει στη διαδικασία της παραγωγής. Η αξία του κεφαλαίου μετριέται με το μέγεθος και την παραγωγικότητά του, δηλαδή την ικανότητα του να παράγει άλλα αγαθά.

Το κεφάλαιο υπό μορφή χρήματος είναι εξαιρετικά ευέλικτο και μπορεί να αξιοποιηθεί σε πάρα πολλές διαφορετικές χρήσεις δηλαδή εναλλακτικές δραστηριότητες. Η αξιολόγηση των επενδύσεων αναπτύσσει τη μεθοδολογία και τους τρόπους αξιολόγησης και επιλογής αυτών των εναλλακτικών χρήσεων ή τοποθετήσεων του κεφαλαίου και διευκολύνει τη λήψη των επενδυτικών αποφάσεων.

### 5.2.2 Τόκος

Είναι η αύξηση του κεφαλαίου που οφείλεται στην παραγωγικότητά του. Ο τόκος είναι ανάλογος του κεφαλαίου, του χρόνου κατά τον οποίο το κεφάλαιο είναι παραγωγικό και του επιτοκίου. Το *επιτόκιο* είναι ο τόκος μιας νομισματικής μονάδας (π.χ ενός ευρώ) στη μονάδα του χρόνου. Στην παρούσα ανάλυση ως νομισματική μονάδα θα χρησιμοποιείται το ευρώ και ως χρονική μονάδα το έτος.

### 5.2.3 Κεφαλαιοποίηση

Υπάρχουν τρία συστήματα κεφαλαιοποίησης, δηλαδή συστήματα υπολογισμού των τόκων και του ύψους του κεφαλαίου σε διάφορες χρονικές στιγμές. Το σύστημα της απλής, σύνθετης και συνεχούς κεφαλαιοποίησης. Η απλή κεφαλαιοποίηση εφαρμόζεται συνήθως για περιόδους μικρότερες του ενός έτους. Στη σύνθετη κεφαλαιοποίηση ο τόκος ενσωματώνεται στο κεφάλαιο στο τέλος κάθε περιόδου. Αντιθέτως, στη συνεχή κεφαλαιοποίηση, θεωρείται ότι ο τόκος ενσωματώνεται κάθε στιγμή στο κεφάλαιο, δηλαδή σε μια χρονική περίοδο γίνονται άπειρες κεφαλαιοποιήσεις του τόκου. Στην αξιολόγηση επενδύσεων όμως εφαρμόζεται κυρίως το σύστημα της σύνθετης κεφαλαιοποίησης. Ο τύπος της σύνθετης κεφαλαιοποίησης είναι:

$$C_n = C_0(1+i)^n \quad 5-1$$

Όπου  $i$  είναι το τραπεζικό επιτόκιο και  $C_n$  το ύψος του κεφαλαίου μετά από  $n$  περιόδους. Ο παράγοντας  $(1+i)^n$  λέγεται συντελεστής σύνθετης κεφαλαιοποίησης.

Λύνοντας τον τύπο της σύνθετης κεφαλαιοποίησης ως προς την αρχική αξία του κεφαλαίου  $C_0$ , προκύπτει ο τύπος της προεξόφλησης, με τη χρήση του οποίου υπολογίζεται η παρούσα αξία.

$$C_0 = C_n(1+i)^{-n} \quad 5-2$$

### 5.2.4 Παρούσα αξία (Present Value, PV)

Μετράει την τρέχουσα αξία των μελλοντικών χρηματικών ροών προεξοφλώντας τις με ένα κατάλληλο προεξοφλητικό επιτόκιο. Η έννοια της παρούσας αξίας συνδέεται με την μελλοντική αξία και συναντάται πολύ συχνά στα χρηματοοικονομικά.

### 5.2.5 Η καθαρή παρούσα αξία ως κριτήριο αξιολόγησης της επένδυσης (Net Present Value NPV ή ΚΠΑ)

Το κριτήριο της ΚΠΑ είναι το σημαντικότερο από όλα τα κριτήρια, επειδή είναι σύμφωνο με τη θεωρία της λήψης των επενδυτικών αποφάσεων και υπολογίζει το απόλυτο μέγεθος του καθαρού όφελος από την επένδυση.

Η ΚΠΑ λαμβάνει υπόψη όλα τα μελλοντικά έσοδα και έξοδα της επένδυσης και έτσι αξιολογεί τη συνολική της επίπτωση στην επιχείρηση. Για να γίνει δυνατή η άθροιση και σύγκριση των χρηματικών ποσών που αναφέρονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, το κριτήριο της ΚΠΑ προεξοφλεί όλες τις μελλοντικές χρηματικές ροές που οφείλονται ή προκύπτουν από την επένδυση και αθροίζει αλγεβρικά τις παρούσες αξίες τους. Αν η ΚΠΑ μιας επένδυσης είναι θετική, τότε η επένδυση κρίνεται θετικά αλλιώς απορρίπτεται. Θετική ΚΠΑ σημαίνει ότι τα προεξοφλημένα οφέλη (έσοδα) είναι μεγαλύτερα από τις προεξοφλημένες δαπάνες (έξοδα) και επομένως η ΚΠΑ μετράει το ποσό κατά το οποίο τα μελλοντικά έσοδα υπερβαίνουν τις μελλοντικές δαπάνες.

Ο μαθηματικός τύπος της ΚΠΑ η οποία συνήθως συμβολίζεται με τα γράμματα NPV, (Net Present Value), είναι απλός και προκύπτει από τον ορισμό της :

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+d)^t} \quad 5-3$$

Όπου:

- $CF_t$     διαφορά μεταξύ εσόδων και εξόδων της περιόδου  
 $d$         Επιτόκιο προεξόφλησης περιόδου, συνήθως ενιαίο για όλες τις περιόδους.  
 $n$         Συνολικός αριθμός περιόδων της αξιολόγησης

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου της ΚΠΑ είναι:

- Λαμβάνει υπόψη τη διαχρονική αξία του χρήματος
- Λειτουργεί και για αμοιβαία αποκλεισμένες ή αλληλοεξαρτώμενες επενδύσεις
- Βελτιστοποιεί το χρηματο-οικονομικό στόχο των επιχειρήσεων
- Ιεραρχεί σωστά τις επενδυτικές προτάσεις
- Λειτουργεί και με μεταβλητό συντελεστή προεξόφλησης

Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι απαιτεί προσδιορισμό κατάλληλου συντελεστή προεξόφλησης.

### 5.2.6 Το ισοδύναμο σταθερό ετήσιο κόστος

Η λογική του ετήσιου ισοδύναμου σταθερού κόστους, θεωρεί ότι το κόστος αγοράς ενός συστήματος μπορεί να αντικατασταθεί με μια ισοδύναμη σειρά ομοιόμορφων ληξιπρόθεσμων πληρωμών, που έχει παρούσα (αρχική) αξία ίση με το κόστος αγοράς του συστήματος. Δηλαδή, το ετήσιο ισοδύναμο σταθερό κόστος είναι ίσο με τη δόση αποπληρωμής του συστήματος, αν η πληρωμή του γινόταν με δόσεις. Το ισοδύναμο σταθερό ετήσιο κόστος περιγράφεται από την εξίσωση 5-4

$$C_{cap} = \frac{C \times i}{1 - (1 + i)^{-n}} \quad 5-4$$

|           |   |
|-----------|---|
| $C_{cap}$ | Ισοδύναμο σταθερό ετήσιο κόστος (€/yr)        |
| $C$       | Αρχικό Κόστος επένδυσης του υποσυστήματος (€) |
| $i$       | Επιτόκιο προεξόφλησης (%/year)                |
| $n$       | Περίοδος ανάλυσης (year)                      |

### 5.3 Παράμετροι που καθορίζουν το κόστος του αφαλατωμένου νερού

Το κόστος του αφαλατωμένου νερού παρουσιάζεται συνήθως ανά μονάδα όγκου παραγόμενου νερού δηλαδή €/m<sup>3</sup>. Υπάρχουν διάφοροι παράμετροι που καθορίζουν το κόστος του παραγόμενου νερού και είναι οι εξής:

#### 5.3.1 Μέγεθος της μονάδας αφαλάτωσης (οικονομία κλίμακας)

Το μέγεθος της μονάδας αφαλάτωσης (οικονομία κλίμακας). Πχ., για μια μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης δυναμικότητας 5000 m<sup>3</sup>/ημέρα, το κόστος του νερού είναι περίπου 1.5 €/m<sup>3</sup>, ενώ σε αντίστοιχο σύστημα 20000 €/m<sup>3</sup> είναι 0.75 €/m<sup>3</sup> και για πολύ μικρή μονάδα αφαλάτωσης 10 €/ημέρα φτάνει το ποσό των 5 €/m<sup>3</sup>, όπως αναφέρει ο Wilf, (2007).

#### 5.3.2 Ο συντελεστής διαθεσιμότητας

Ο συντελεστής διαθεσιμότητας ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου που η μονάδα αφαλάτωσης παράγει ποσότητα νερού που ισούται ή είναι μεγαλύτερη της ονομαστικής ετήσιας δυναμικότητας. Για παράδειγμα, μια μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού

αντίστροφης ώσμωσης δυναμικότητας  $10 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$  παράγει  $10 \times 365 \times 1=3650 \text{ m}^3/\text{έτος}$  με συντελεστή διαθεσιμότητας 100%. Ενώ αν η ίδια μονάδα λειτουργεί 10% του χρόνου με δυναμικότητα λιγότερη από  $10 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ , τότε η ετήσια παραγωγή θα είναι  $10 \times 365 \times 0.9=3285 \text{ m}^3/\text{έτος}$ . Η αύξηση στην ετήσια παραγωγή λόγω αύξησης του συντελεστή διαθεσιμότητας, επιφέρει και αύξηση στο ετήσιο μεταβλητό κόστος λειτουργίας, αλλά ταυτόχρονα συνήθως τα έσοδα από τη πώληση του νερού υπερκαλύπτουν αυτά τα έξοδα.

### **5.3.3 Είδος μεθόδου αφαλάτωσης**

Κάθε μέθοδος αφαλάτωσης έχει διαφορετικό κόστος παραγωγής νερού και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Κάθε μέθοδος θα πρέπει να εξετασθεί στο συγκεκριμένο τόπο και για την συγκεκριμένη δυναμικότητα και να αξιολογηθεί συγκριτικά με τις υπόλοιπες. Έτσι θα πρέπει να αξιολογηθούν για κάθε μέθοδο ενδεικτικά:

- Το κόστος επένδυσης
- Η δυναμικότητα της μονάδας
- Το κόστος λειτουργίας
- Η ύπαρξη ανταλλακτικών και κατάλληλου εργατικού δυναμικού
- Συχνότητα και κόστος συντήρησης
- Διάρκεια ζωής της μονάδας

### **5.3.4 Κόστος συστήματος τροφοδοσίας**

Θα πρέπει να αξιολογηθεί η δαπάνη επένδυσης και λειτουργίας του συστήματος τροφοδοσίας του. Επίσης θα πρέπει να αναλυθεί λεπτομερώς το σύστημα προ-επεξεργασία του νερού τροφοδοσίας.

### **5.3.5 Κόστος ενέργειας**

Η διατιθέμενη ενέργεια και η τιμή της είναι από τους σημαντικούς παράγοντες που καθορίζουν το τελικό κόστος παραγωγής νερού. Θα πρέπει να εξετασθεί η δυνατότητα εγκατάστασης συστήματος ανάκτησης ενέργειας όπου αυτό είναι δυνατό.

### **5.3.6 Είδος νερού τροφοδοσίας**



Η ποιότητα του νερού τροφοδοσίας, δηλαδή η αλατότητα, η θερμοκρασία, η θολότητα, η ύπαρξη οργανικής ουσίας, η ύπαρξη χημικών στοιχείων όπως το πυρίτιο, μαγνήσιο και το κάλιο, επηρεάζουν το κόστος του παραγόμενου νερού ειδικά στην αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση. Η αύξηση της αλατότητας του νερού τροφοδοσίας αυξάνει το αρχικό κόστος κατασκευής της μονάδας, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας γενικά μειώνει το κόστος παραγωγής λόγω αύξησης της παραγόμενης ποσότητας. Η αύξηση όμως της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας στα συστήματα αντίστροφης ώσμωσης μειώνει την ποιότητα του παραγόμενου νερού και πάνω από 40 °C καταστρέφει τις συστοιχίες των μεμβρανών. Οι χημικές ουσίες που βρίσκονται στο νερό τροφοδοσίας αυξάνουν το κόστος της προ-επεξεργασίας και μετα-επεξεργασίας του νερού.

### **5.3.7 Είδος αφαλατωμένου νερού**

Η επιθυμητή ποιότητα του παραγόμενου νερού είναι μια σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό του κόστους του νερού. Η ποιότητα του παραγόμενου νερού ειδικά στην περίπτωση του πόσιμου νερού αυξάνει το κόστος κατασκευής και το κόστος λειτουργίας.

### **5.3.8 Τρόπος διαχείρισης της άλμης**

Το κόστος της διαχείρισης της άλμης εξαρτάται από την μέθοδο απόρριψης της άλμης. Χρήση των συμβατικών μεθόδων όπως η επιστροφή της άλμης στη θάλασσα, επιφέρει το μικρότερο κόστος ενώ άλλη μέθοδος όπως η χρήση ηλιακών λιμνών αυξάνει σε μεγάλο βαθμό το κόστος του νερού.

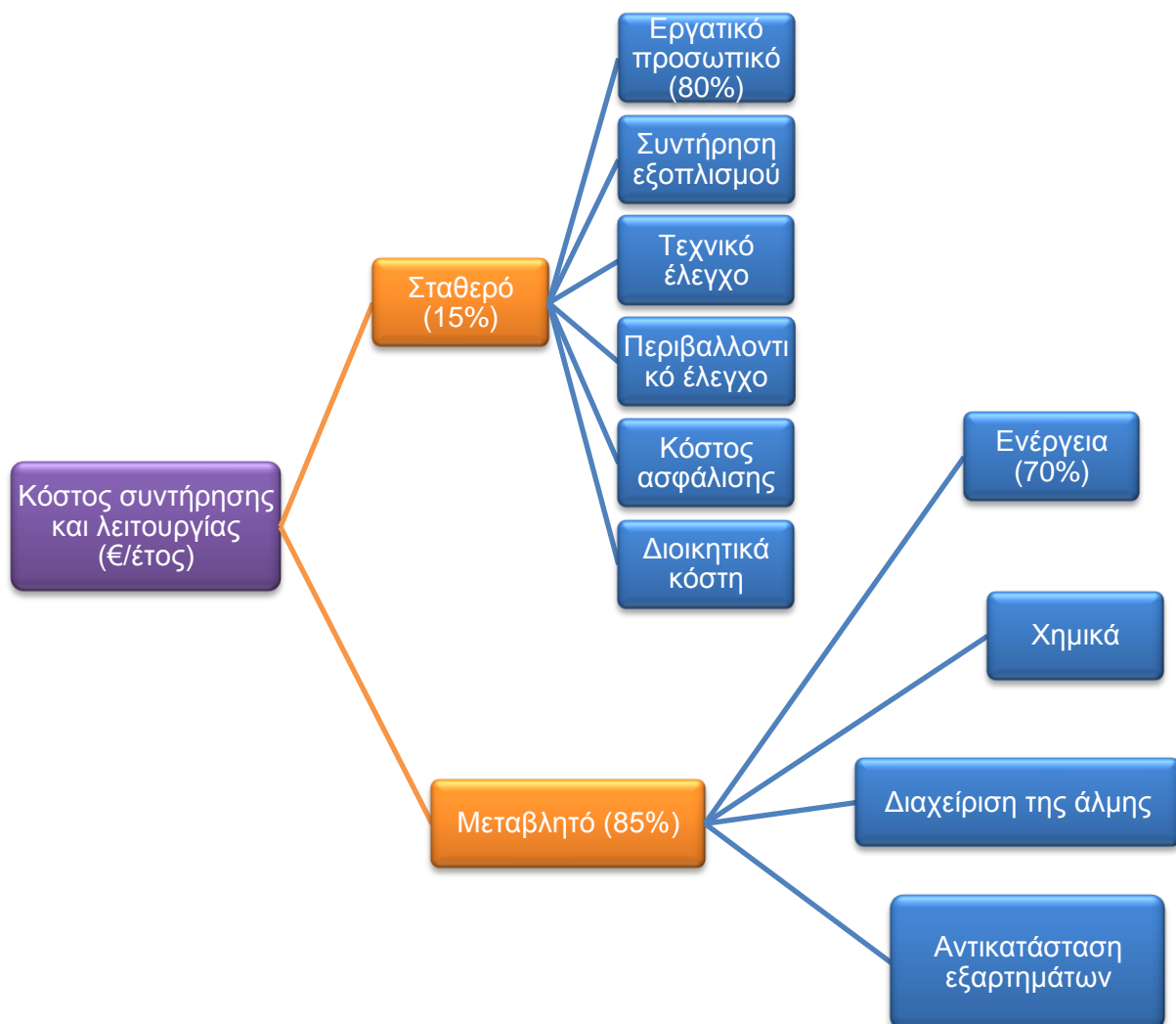
## **5.4 Υπολογισμός του κόστους του νερού**

Συνεπώς σε μία αξιόπιστη μελέτη σκοπιμότητας θα πρέπει να προσδιορισθεί με ακρίβεια το κόστος επένδυσης, συμπεριλαμβανομένων των τόκων του επενδύομένου κεφαλαίου και το κόστος λειτουργίας ώστε να διαπιστωθεί η βιωσιμότητα της επένδυσης.

Στην Εικόνα 5-1, παρουσιάζονται οι συνιστώσες του αρχικού κόστους της αφαλάτωσης. Το κόστος αγοράς και εγκατάστασης αποτελεί περίπου 85% του αρχικού κόστους επένδυσης. Στην Εικόνα 5-2, παρουσιάζονται οι συνιστώσες του κόστους συντήρησης και λειτουργίας των μονάδων αφαλάτωσης. Το κόστος της ενέργειας αποτελεί το μεγαλύτερο μεταβλητό κόστος που φτάνει σε μερικές περιπτώσεις και το 70% του κόστους συντήρησης και λειτουργίας, αναφέρει ο *Wilf*, (2007).



Εικόνα 5-1: Συναρτήσεις του αρχικού κόστους αφαλάτωσης



Εικόνα 5-2: Συναρτήσεις του κόστους συντήρησης και λειτουργίας μονάδων αφαλάτωσης

Ο υπολογισμός του κόστους του αφαλατωμένου νερού γίνεται με βάση το ετήσιο ισοδύναμο κόστος του συστήματος. Η υπολογισμένη ετήσια παραγωγή αφαλατωμένου νερού έχει προαναφερθεί στον πίνακα 4-5, ενώ το ισοδύναμο ετήσιο κόστος υπολογίστηκε με φύλλο εργασίας στο Excel, όπου φαίνεται αναλυτικά το κόστος κάθε εξαρτήματος στο σύστημα. Το υπολογιστικό φύλλο της οικονομικής ανάλυσης έχει αρθρωτή μορφή, δηλαδή υπολογίζεται το ισοδύναμο κόστος της μονάδας αφαλάτωσης, της Φ/Β συστοιχίας και της ανεμογεννήτριας ξεχωριστά και αθροίζονται στο τέλος της ανάλυσης, με σκοπό τη λεπτομερή οικονομική ανάλυση του κάθε υποσυστήματος. Θεωρώντας ότι το επιτόκιο προεξόφλησης είναι 8%, αναπτύχθηκαν οι πίνακες 5-1, 5-2 και 5-3 που παρουσιάζουν τα διάφορα κόστη της Φ/Β συστοιχίας, της ανεμογεννήτριας και της μονάδας ΑΩ αντίστοιχα. Οι πίνακες επαναλαμβάνονται για κάθε τοπολογία, για παράδειγμα οι πίνακες 5-1,5-2 και 5-3 παριστάνουν την τοπολογία 1, 2 και 5 (τοπολογίες με συσσωρευτές).

Πίνακας 5-1: Τα στοιχεία κόστους του Φ/Β συστήματος

| Αρχική επένδυση του Φ/Β συστήματος                            | Μέγεθος | Κόστος μονάδας                   | Συνολικό κόστος (€) | % από το συνολικό κόστος | Ωφέλιμος χρόνος ζωής (έτη) | Ετήσιο ισοδύναμο κόστος (€/έτος) |
|---|---------|----------------------------------|---------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Ισχύς ΦΒ συστοιχίας (kW)                                      | 0.85    | 5,000.00                         | 4,257.31            | 65.1%                    | 25.00                      | 398.82                           |
| Ρυθμιστής φόρτωσης (kW)                                       | 0.84    | 700.00                           | 346.86              | 5.3%                     | 10.00                      | 51.69                            |
| Μετατροπέα υποβιβασμού ΣΡ/ΣΡ (kW)                             | 0.70    | 360.00                           | 0.00                | 0.0%                     | 10.00                      | 0.00                             |
| Κατασκευή στήριξης ΦΒ συστοιχίας                              | 1.00    | 350.00                           | 350.00              | 5.4%                     | 25.00                      | 32.79                            |
| Καλωδίωση   | 1.00    | 100.00                           | 100.00              | 1.5%                     | 20.00                      | 10.19                            |
| Μεταφορά & εγκατάσταση(€)                                     | 1.00    | 350.00                           | 350.00              | 5.4%                     | 25.00                      | 32.79                            |
| Συσσωρευτές (kWh)   | 7.56    |                                  | 1,133.67            | 17.3%                    | 6.24                       | 237.70                           |
| <b>Σύνολο</b>   |         |                                  | <b>6,537.84</b>     | <b>100.0%</b>            |                            | <b>763.97</b>                    |
| <b>Κόστος συντήρησης και λειτουργίας ΦΒ συστήματος (€/yr)</b> |         | <b>% από την αρχική επένδυση</b> | <b>(€/έτος)</b>     |                          |                            |                                  |
| Συντήρηση συσσωρευτών   | 5.0%    |                                  | 56.68               | 51.22%                   |                            |                                  |
| Καθάρισμα ΦΒ πλαισίων   | 0.5%    |                                  | 21.29               | 19.24%                   |                            |                                  |
| Γενικά έξοδα συντήρησης                                       | 0.5%    |                                  | 32.69               | 29.54%                   |                            |                                  |
| <b>Σύνολο</b>   |         |                                  | <b>110.66</b>       | <b>100.00%</b>           |                            | <b>110.66</b>                    |
| <b>Ισοδύναμο ετήσιο κόστος Φ/Β</b>                            |         |                                  |                     |                          |                            | <b>874.63</b>                    |

Πίνακας 5-2: Τα στοιχεία κόστους της Ανεμογεννήτριας

| Αρχική επένδυση ΑΓ (€)                             | % από την αρχική επένδυση | Κόστος μονάδας | Συνολικό κόστος (€) | % από το συνολικό κόστος | Ωφέλιμος χρόνος ζωής (έτη) | Ετήσιο ισοδύναμο κόστος (€/έτος) |
|--|---------------------------|----------------|---------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Ανεμογεννήτρια                                     | 1.00                      | 2,000.00       | 2,008.89            | 67.2%                    | 20.00                      | 204.61                           |
| Ιστός  | 6.00                      | 80.00          | 480.00              | 16.1%                    | 30.00                      | 42.64                            |
| Καλωδίωση  | 1.00                      | 100.00         | 100.00              | 3.3%                     | 20.00                      | 10.19                            |
| Μεταφορά και εγκατάστασης (€)                      |                           |                | 400.00              | 13.4%                    | 20.00                      | 40.74                            |
| Πτερύγια της ΑΓ                                    | 3.00                      | 150.00         | 450.00              | 15.1%                    | 10.00                      | 67.06                            |
| <b>Σύνολο</b>                                      | <b>1.00</b>               |                | <b>2,988.89</b>     | <b>100.0%</b>            |                            | <b>298.17</b>                    |
| <b>Κόστος συντήρησης και λειτουργίας ΑΓ (€/yr)</b> |                           |                |                     |                          |                            |                                  |
| Συντήρηση ΑΓ                                       | 5%                        |                | 100.44              |                          |                            |                                  |
| Ηλεκτρικές ρυθμίσεις                               | 1%                        |                | 29.89               |                          |                            |                                  |
| <b>Σύνολο</b>                                      |                           |                | <b>130.33</b>       |                          |                            | <b>130.33</b>                    |
| <b>Ισοδύναμο ετήσιο κόστος ΑΓ</b>                  |                           |                |                     |                          |                            | <b>428,5</b>                     |

Πίνακας 5-3: Τα στοιχεία κόστους του συστήματος αφαλάτωσης

| Αρχική επένδυση της μονάδας αφαλάτωσης (€)                                  | Μέγεθος | Κόστος μονάδας | Συνολικό κόστος (€) | % από το συνολικό κόστος | Ωφέλιμο χρόνο ζωής (έτος) | Ετήσιο ισοδύναμο κόστος (€/έτος) |
|---|---------|----------------|---------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| Μεμβράνες   | 2.00    | 450.00         | 945.82              | 10.01%                   | 5.01                      | 236.60                           |
| Μεμβρανοθήκη  | 2.00    | 750.00         | 1,592.52            | 16.86%                   | 30.00                     | 141.46                           |
| Φίλτρα  | 3.00    | 15.00          | 48.99               | 0.52%                    | 2.00                      | 27.47                            |
| Αισθητήρια  | 1.00    | 500.00         | 319.49              | 3.38%                    | 10.00                     | 47.61                            |
| Αντλία τροφοδοσίας  | 1.00    | 300.00         | 335.87              | 3.56%                    | 15.00                     | 39.24                            |
| Κινητήρας ΣΡ  | 1.00    | 1,000.00       | 790.41              | 8.37%                    | 20.00                     | 80.51                            |
| Αντλία υψηλής πίεσης (αντλία Clark)   | 1.00    | 3,400.00       | 4,097.50            | 43.38%                   | 20.00                     | 417.34                           |
| Μονάδα ελέγχου  | 1.00    | 500.00         | 522.47              | 5.53%                    | 20.00                     | 53.21                            |
| Υδραυλικά και σωλήνες   | 1.00    | 100.00         | 89.18               | 0.94%                    | 30.00                     | 7.92                             |
| Καλωδίωση   | 1.00    | 100.00         | 90.05               | 0.95%                    | 20.00                     | 9.17                             |
| Δεξαμενή τροφοδοσίας  | 1.00    | 150.00         | 132.16              | 1.40%                    | 50.00                     | 10.80                            |
| Δεξαμενή παραγόμενου νερού  | 1.00    | 100.00         | 122.01              | 1.29%                    | 50.00                     | 9.97                             |
| Μεταφορά και εγκατάσταση  |         |                | 359.66              | 3.81%                    | 25.00                     | 33.69                            |
| <b>Σύνολο</b>   |         |                | <b>9,446.12</b>     | <b>100.00%</b>           |                           | <b>1,067.39</b>                  |
| <b>Κόστος συντήρησης και λειτουργίας (€/έτος)</b>                           |         |                |                     |                          |                           |                                  |
| Χημικά  |         | 0.10           | 30.18               |                          |                           | 30.18                            |
| Συντήρηση   |         |                | 100                 |                          |                           | 100                              |
| <b>Σύνολο</b>   |         |                |                     |                          |                           | <b>130.18</b>                    |
| <b>Ισοδύναμο ετήσιο κόστος ΑΩ</b>   |         |                |                     |                          |                           | <b>1197.57</b>                   |
| <b>Γενικό σύνολο του ισοδύναμου ετήσιου κόστους του συστήματος (€/έτος)</b> |         |                |                     |                          |                           | <b>2500.70</b>                   |

Το κόστος παραγωγής του νερού μπορεί να υπολογιστεί για κάθε τοπολογία θεωρώντας κάθε φορά το αντίστοιχο ισοδύναμο ετήσιο κόστος και την παραγόμενη ποσότητα αφαλατωμένου νερού, όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 5-4. Παρατηρούμε ότι η τοπολογία 1 έχει το μεγαλύτερο κόστος παραγωγής λόγω απωλειών στην ενέργεια των Φ/Β στις συσσωρευτές και στο ρυθμιστή φόρτισης και ως αποτέλεσμα της μείωσης της παραγόμενης ποσότητας νερού. Το μικρότερο κόστος έχει το υβριδικό σύστημα (τοπολογία 2), παρά την αύξηση του ετήσιου ισοδύναμου κόστους υπάρχει δυσανάλογη αύξηση στην παραγωγή αφαλατωμένου νερού με αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους του νερού. Παρατηρείται επίσης ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στο κόστος μεταξύ της τοπολογίας 3 και 4, με αποτέλεσμα να πλεονεκτεί η τοπολογία 4 επειδή είναι πιο απλή (απευθείας σύνδεση χωρίς μετατροπέα).

Πίνακας 5-4: Τα στοιχεία κόστους του συστήματος αφαλάτωσης

|                          | Ετήσια παραγωγή νερού (m <sup>3</sup> /έτος) | Ετήσιο ισοδύναμο κόστος (€/έτος) | Κόστος παραγωγής του νερού (€/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------|--|----------------------------------|--|
| Τοπολογία 1 <sup>1</sup> | 257  | 2072.2                           | 8.1  |
| Τοπολογία 2 <sup>2</sup> | 630  | 2500.7                           | 4  |
| Τοπολογία 3 <sup>3</sup> | 325  | 1655.31                          | 5.1  |
| Τοπολογία 4 <sup>4</sup> | 330  | 1617.74                          | 4.9  |
| Τοπολογία 5 <sup>5</sup> | 353  | 2042.96                          | 5.8  |

## 5.5 Ανάλυση ευαισθησίας

Ανάλυση ευαισθησίας είναι η μελέτη της ανταπόκρισης μιας εξαρτημένης μεταβλητής στις διαταραχές που προκαλούνται σε μεταβλητές, με τις οποίες υπάρχει συναρτησιακή σχέση. Το μαθηματικό πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί στην ανάλυση ευαισθησίας είναι ο υπολογισμός των αλλαγών στη συμπεριφορά του συστήματος (π.χ. κόστος παραγωγής του νερού) που οφείλεται στις μεταβολές κάποιων παραμέτρων (π.χ. χρόνο ζωής της μεμβράνης ή των συσσωρευτών). Για το σκοπό αυτό προσδιοριστήκαν πέντε παράμετροι που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του συστήματος, όπως ο χρόνος ζωής της μεμβράνης, των συσσωρευτών, της αντλίας Clark και του αντλητικού συστήματος, βλέπε Εικόνα 5-3.

<sup>1</sup> Φ/Β + συσσωρευτές

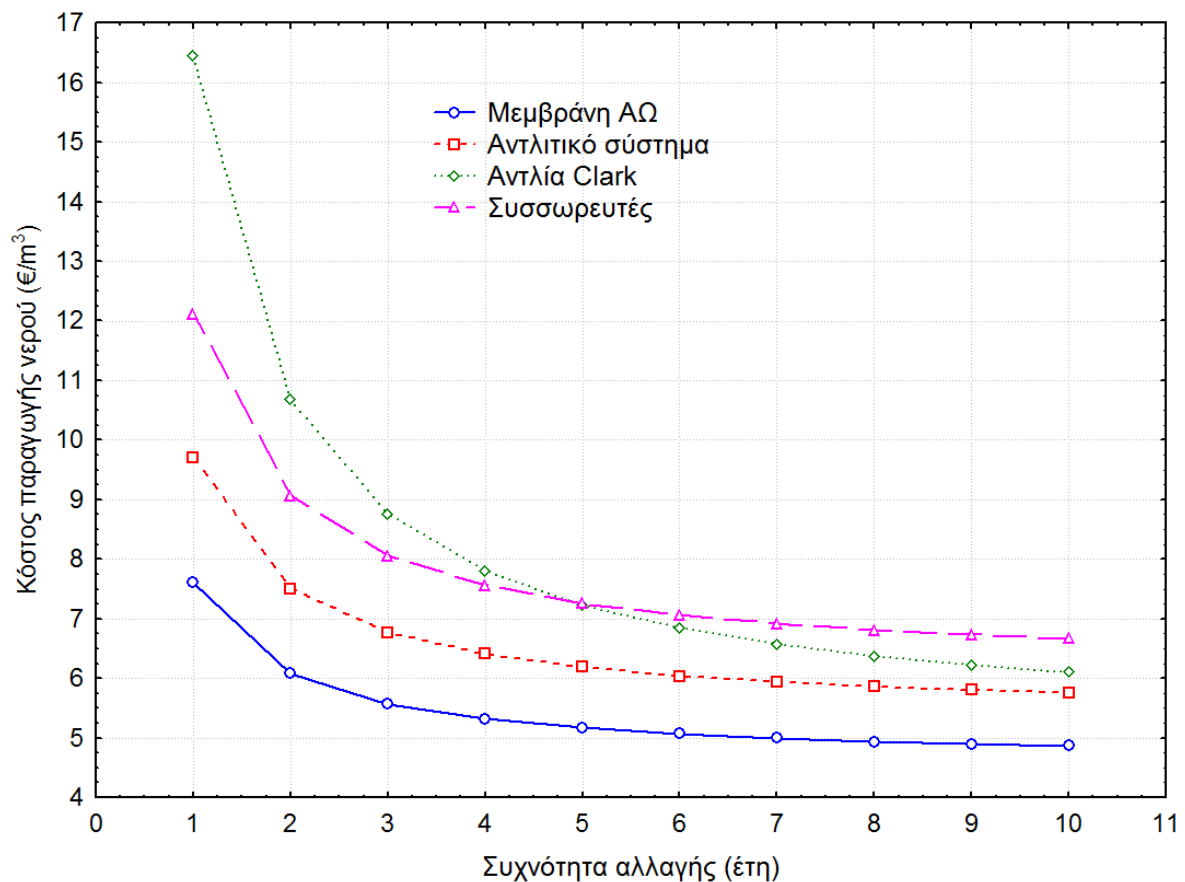
<sup>2</sup> Φ/Β + συσσωρευτές + ανεμογεννήτρια

<sup>3</sup> Φ/Β + μετατροπέας ΣΡ/ΣΡ

<sup>4</sup> Μόνο Φ/Β

<sup>5</sup> Μόνο ανεμογεννήτρια

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με την μεταβολή μίας παραμέτρου (π.χ. χρόνος ζωής της μεμβράνης) κρατώντας κάθε φορά σταθερές όλες τις άλλες παραμέτρους. Δηλαδή υπολογίζονται οι πίνακες 5-1, 5-2 και 5-3 σαράντα φορές (4 παράμετροι επί 10 επαναλήψεις) Η Εικόνα 5-3 απεικονίζει την μεταβολή του κόστους παραγωγής του νερού σε σχέση με την μεταβολή του χρόνου ζωής της κάθε παραμέτρου. Παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη μεταβολή στο κόστος του παραγόμενου νερού πραγματοποιείται με την αλλαγή του χρόνου ζωής της αντλίας Κλαρκ, ακολουθεί η μεταβολή του κόστους λόγω μεταβολής του χρόνου ζωής των συσσωρευτών, ενώ το κόστος του νερού δεν μεταβάλλεται σημαντικά με την μεταβολή του χρόνου ζωής της μεμβράνης.



Εικόνα 5-3: Ανάλυση ευαισθησίας για κρίσιμες παραμέτρους του συστήματος

Το γεγονός ότι η επίδραση της αύξησης της συχνότητας αλλαγής των μεμβρανών είναι σχετικά μικρότερη από την επίδραση της συχνότητας αλλαγής των άλλων εξαρτημάτων του συστήματος, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η τοπολογία της απευθείας σύνδεσης (τοπολογία 4) αναμένεται να πλεονεκτεί οικονομικά σε σχέση με τις τοπολογίες που περιέχουν συσσωρευτές. Δεδομένου ότι η απευθείας σύνδεση έχει αρνητική επίδραση στο χρόνο ζωής των μεμβρανών, αναμένεται να μειωθεί ο χρόνος ζωής τους και να αυξάνεται η συχνότητα

αλλαγής τους. Σημειώνεται ότι η ανάλυση ευαισθησίας έγινε για την τοπολογία 1, δηλαδή Φ/Β συστοιχία και συσσωρευτές συνδεδεμένα με την μονάδα ΑΩ. Παρατηρείται στην Εικόνα 5-3 ότι με την αύξηση της συχνότητας αλλαγής, η τιμή του παραγόμενου νερού τείνει σε μία σταθερή τιμή. Για παράδειγμα, η αύξηση της συχνότητας αλλαγής των συσσωρευτών σε τιμές μεγαλύτερες από 10 έτη έχει ως αποτέλεσμα η τιμή του παραγόμενου νερού να πλησιάζει περίπου την τιμή της 6.8 €/m<sup>3</sup>. Η τιμή αυτή είναι το κόστος του παραγόμενου νερού όταν το ισοδύναμο ετήσιο κόστος των συσσωρευτών τείνει προς το μηδέν.

## 5.6 Οικονομική αξιολόγηση του συστήματος σε συνθήκες αβεβαιότητας - διαχείριση κινδύνου (Risk management)

Ο σκοπός κάθε οικονομικής δραστηριότητας είναι η αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση καταστάσεων που παρουσιάζουν αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης απωλειών. Για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητος ο εντοπισμός και καθορισμός της σημαντικότητας των επικείμενων κινδύνων. Η πιο δημοφιλής μέθοδος διαχείρισης χρηματοοικονομικού κινδύνου είναι η αξία σε περίπτωση κινδύνου (Value at Risk, VaR).

Τις τελευταίες δεκαετίες οι κίνδυνοι που αφορούν τη διαβίωση μιας οικονομικής δραστηριότητας έχουν αυξηθεί σε τέτοιο βαθμό που κρίνεται ακόμη και η ίδια η ύπαρξή τους, ανέφεραν οι *Tesetsekos and Varangis*, (2000). Οι αλλαγές των τιμών μπορούν να οδηγήσουν είτε σε μεγάλα κέρδη είτε σε μεγάλες ζημιές. Αυτή είναι και η αιτία που η διαχείριση κινδύνου αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα στα οικονομικά, όπως αναφέρει ο *Gang*, (2005).

Ωστόσο ο κίνδυνος δεν έχει μόνο αρνητικές επιπτώσεις. Ο κίνδυνος ουσιαστικά είναι η αβεβαιότητα για τις μελλοντικές αποδόσεις και κατά πόσο οι επιλογές ενός επενδυτή είναι σωστές ή όχι, *Leung*, (1998). Γι' αυτό και οι περισσότερες εταιρίες προσπαθούν να κάνουν σωστή διαχείριση του κινδύνου καθώς μέσα από αυτή τη διαδικασία η εκάστοτε εταιρία και ο εκάστοτε επενδυτής μπορεί να αντιστρέψει την εικόνα και ο κίνδυνος αυτός να μετατραπεί σε όφελος, *Cuoco and Liu*, (2006). Η ανάληψη του κινδύνου δείχνει κατά πόσο μια εταιρία είναι υγιής καθώς ο σκοπός κάθε εταιρίας και επενδυτή είναι το κέρδος.

Οι τεχνικές ελέγχου του κινδύνου υπάρχουν από πολύ παλιά, αφού ο πρώτος που έκανε έλεγχο του κινδύνου ήταν ο *Markowitz* το 1952. Το μοντέλο του βασιζόταν στην τυπική απόκλιση την οποία κάποιος έπρεπε να λαμβάνει υπόψη για να μειώσει τον κίνδυνο. Τα τελευταία χρόνια η πιο δημοφιλής θεωρία είναι η αξία σε περίπτωση κινδύνου (Value at Risk, VaR). Η μέθοδος VaR. Αναπτύχθηκε το 1993 και στην αρχή χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο κινδύνου στην αγορά Παραγώγων αλλά αργότερα επεκτάθηκε και σε άλλους κλάδους. Θεωρητικά η VaR εκφράζει τη μέγιστη δυνατή ζημιά ενός χαρτοφυλακίου για μια δεδομένη



χρονική περίοδο και για ένα δεδομένο διάστημα εμπιστοσύνης, αναφέρουν οι Hoyt, et al., (2007).

### **5.6.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της VaR**

Ενώ η μέθοδος VaR μπορεί να προβλέψει την ανώτατη ζημία, δεν μπορεί ωστόσο να την προσδιορίσει με ποσοτική ακρίβεια ιδιαίτερα στην περίπτωση των ακραίων αλλαγών των τιμών. Η μέθοδος VaR λαμβάνει υπόψη τη διασπορά στο χαρτοφυλάκιο δηλαδή τη διαφορετική σύνθεση του χαρτοφυλακίου. Άλλο ένα πλεονέκτημα της εν λόγω μεθόδου, είναι ότι λαμβάνει υπόψη τη μεταβλητότητα (volatility), σε περιόδους όπου η μεταβλητότητα των αγορών αυξάνεται. Τέλος ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι παρουσιάζει τον κίνδυνο ως μοναδική έννοια. Αυτό κάνει πιο εύκολη την ανάλυση των αποτελεσμάτων για τους διαχειριστές του κινδύνου αλλά και στον απλό κόσμο που ενδιαφέρεται για επένδυση σε συγκεκριμένη δραστηριότητα.

### **5.6.2 Μέθοδος ιστορικής προσομοίωσης**

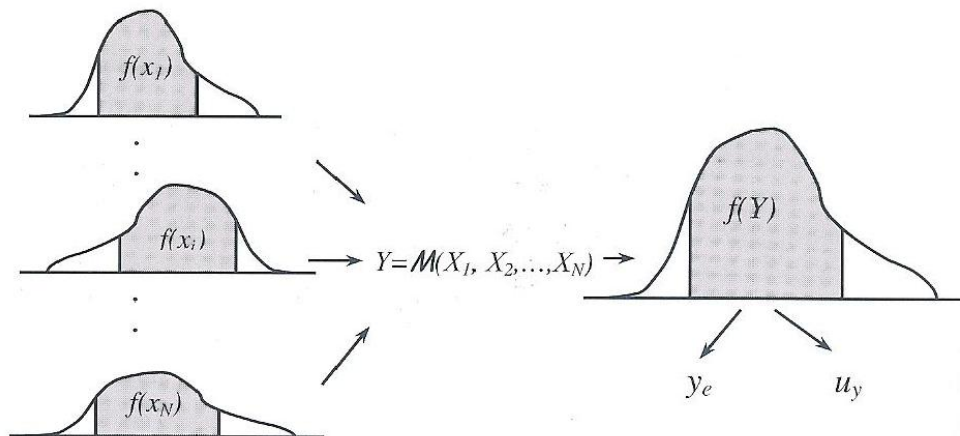
Αυτή η μέθοδος είναι η πιο απλή στον υπολογισμό της αξίας του κινδύνου. Χρησιμοποιεί τις ιστορικές τιμές όχι για να υπολογίσει τη διακύμανση αλλά για τον υπολογισμό των μελλοντικών τιμών. Δηλαδή θεωρεί ότι οι μελλοντικές τιμές θα έχουν την ίδια συμπεριφορά με τις ιστορικές τιμές. Η μέθοδος αυτή δεν ακολουθεί την κανονική κατανομή.

### **5.6.3 Προσομοίωση Monte Carlo**

Πρόκειται για μια εξελιγμένη ιστορική μέθοδο που λαμβάνει υπόψη χιλιάδες τυχαία σενάρια για την εξέλιξη των τιμών των τίτλων. Περιλαμβάνει ένα πρότυπο και γίνονται πολλαπλές δοκιμές βάσει αυτού του προτύπου. Η διαφορά με την ιστορική προσομοίωση είναι ότι λαμβάνει περισσότερες παρατηρήσεις για την εξαγωγή της VaR. Όλες οι τιμές επιλέγονται τυχαία και μετά ακολουθείται ακριβώς η ίδια διαδικασία με την ιστορική προσομοίωση. Συνήθως χρησιμοποιούνται από 1000 έως και 100000 τυχαίοι αριθμοί. Επειδή οι αριθμοί επιλέγονται τυχαία, οι διαφορές των τιμών σε κάθε χρονική περίοδο δεν αντιπροσωπεύουν τις ιστορικές τιμές.

Για την εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo απαιτείται η γνώση των συναρτήσεων κατανομών πιθανοτήτων των πρωτογενών μεγεθών  $X_1, X_2, \dots, X_N$ . Απαιτείται επίσης ένας αλγόριθμος σε H/Y ο οποίος:

- Παράγει σύνολα από τυχαίες τιμές για τα υπό μελέτη μεγέθη, παίρνοντας υπόψη, για κάθε μέγεθος, την αντίστοιχη συνάρτηση κατανομής.
- Υπολογίζει για κάθε σύνολο τιμών, την αντίστοιχη τιμή του μετρούμενου μεγέθους από τη σχέση στην Εικόνα 5-4,  $Y = M(X_1, X_2, \dots, X_N)$ .
- Επαναλαμβάνει τη διαδικασία πολλές φορές, έτσι ώστε να καλυφθεί το σύνολο των περιοχών των επιμέρους συναρτήσεων κατανομών.

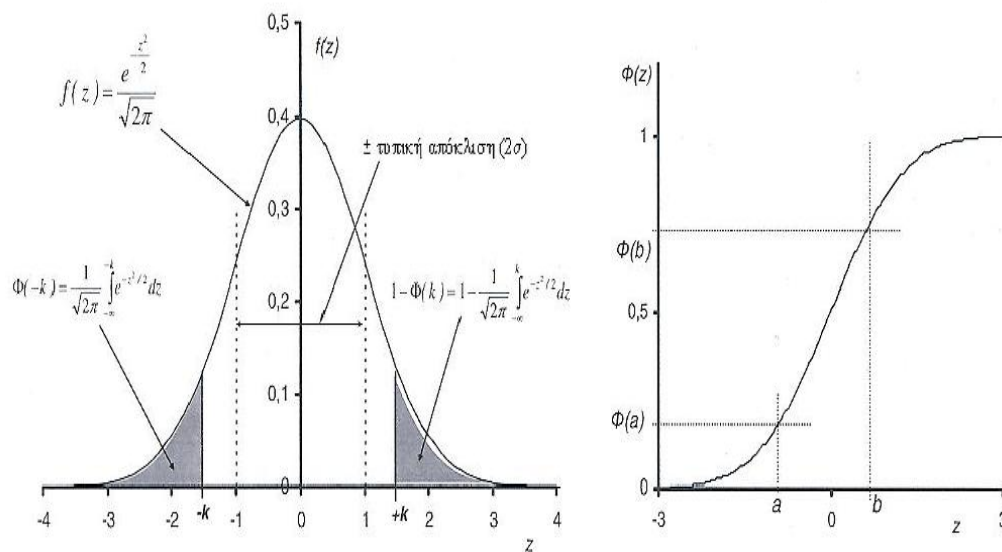


Εικόνα 5-4: Εκτίμηση αβεβαιοτήτων με προσομοίωση Monte Carlo. Πηγή, *Μαθιουλάκης*, (2004)

Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα σύνολο τιμών του υπολογιζόμενου μεγέθους, από το οποίο είναι δυνατόν να υπολογιστεί η κατανομή συχνοτήτων και, κατά συνέπεια, να προσεγγιστεί η χαρακτηριστική συνάρτηση κατανομής πιθανοτήτων. Στη συνέχεια, εκτιμώνται τα χαρακτηριστικά της κατανομής, δηλαδή η αναμενόμενη τιμή  $y_e$  του μετρούμενου μεγέθους  $Y$  και η αβεβαιότητα που τη χαρακτηρίζει  $u_y$ , όπως αναφέρει ο *Μαθιουλάκης*, (2004).

Η κανονική κατανομή ή Gaussian είναι η πλέον σημαντική κατανομή, δεδομένου ότι βρίσκει εφαρμογή σε μια σειρά τομείς ευρύτερου ενδιαφέροντος, όπως η μετρολογία, η βιολογία τεχνολογικές εφαρμογές και φυσικά η οικονομία. Η σημασία της κανονικής κατανομής έγκειται στο ότι το κανονικό μοντέλο αποτελεί συχνά μια επεξεργάσιμη αναπαράσταση πραγματικών φαινομένων. Οι μεταβλητές που συναντώνται στην πραγματικότητα παρουσιάζουν στατιστικές συμπεριφορές παρόμοιες με αυτήν της κανονικής μεταβλητής (ή που μπορούν να προσομοιωθούν με αυτήν χωρίς σημαντικά σφάλματα), επιτρέποντας, κατά συνέπεια, τη γενίκευση της χρήσης των εργαλείων που ισχύουν για την κανονική κατανομή, όπως αναφέρει ο *Μαθιουλάκης*, (2004) και *Spiegel*, (1977).

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται η κανονική κατανομή για την περιγραφή των κατανομών των πιθανοτήτων των διαφόρων μεταβλητών που επιλέχθηκαν για την ανάλυση. Επίσης χρησιμοποιείται η ομοιόμορφη κατανομή για την περιγραφή των μεταβλητών που η κατανομή πιθανοτήτων δεν μεταβάλλεται και παραμένει σταθερά. Ο υπολογισμός των πιθανοτήτων διευκολύνεται σημαντικά με τον ορισμό της αθροιστικής κατανομής  $\Phi(z)$  ως αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης της συνάρτησης κατανομής  $f(z)$ , βλέπε Εικόνα 5-5. Παρατηρείται στην Εικόνα 5-5 επίσης ότι για τον υπολογισμό της κανονικής κατανομής χρειάζεται να είναι γνωστές οι τιμές της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης.



Εικόνα 5-5: Τυπική κανονική κατανομή  $f(z)$  και αθροιστική κανονική κατανομή  $\Phi(z)$ . Πηγή, Μαθιουλάκης, (2004)

### 5.7 Εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo για την οικονομική αξιολόγηση των διαφόρων τοπολογιών του συστήματος

Τα βήματα εφαρμογής της μεθόδου Monte Carlo για την οικονομική αξιολόγηση του συστήματος σε συνθήκες αβεβαιότητας είναι τα ακόλουθα:

#### **Βήμα 1:**

Προσδιορίζονται οι τεχνικές ή/και οικονομικές πρωτογενείς παράμετροι από τους πίνακες 5-1, 5-2 και 5-3. Οι παράμετροι αυτοί επιλέγονται με την υπόθεση ότι οι τιμές τους παρουσιάζει κάποια αβεβαιότητα, για παράδειγμα ο χρόνος ζωής των μεμβρανών παρουσιάζουν μεγάλη αβεβαιότητα στην τοπολογία της απευθείας σύνδεσης, σαφώς μεγαλύτερη από αυτήν της τοπολογίας που περιέχει συσσωρευτές. Για κάθε παράμετρο

καταγράφεται η συνηθέστερη τιμή, η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση ή ελάχιστη και η μέγιστη τιμή (στην περίπτωση της ομοιόμορφης κατανομής) και τέλος, το είδος της κατανομής.

Οι παράμετροι οι οποίοι μεταβάλλονται στοχαστικά στην ανάλυση είναι αυτές που φαίνονται στον Πίνακα 5-5. Ο Πίνακας 5-5 επαναλαμβάνεται για κάθε τοπολογία με διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης και μέσος όρος

Πίνακας 5-5: Παράμετροι που μεταβάλλονται στοχαστικά

|  | Πραγματικό<br>κόστος (€) | Μέσος<br>όρος | Τυπική<br>απόκλιση | min | max | Τύπος<br>κατανομής |
|--|--------------------------|---------------|--------------------|-----|-----|--------------------|
| ΦΒ συστοιχία   | 4250                     | 4000          | 200                |     |     | Κανονική           |
| Ρυθμιστής φόρτισης                                   | 350                      |               |                    | 300 | 400 | Ομοιόμορφη         |
| Μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ                                     | 500                      |               |                    | 300 | 500 | Ομοιόμορφη         |
| Συσσωρευτές  | 1200                     | 1200          | 100                |     |     | Κανονική           |
| Ανεμογεννήτρια                                       | 2000                     | 2000          | 500                |     |     | Κανονική           |
| Μεμβράνες  | 450                      | 500           | 50                 |     |     | Κανονική           |
| Φίλτρα   | 20                       | 20            | 5                  |     |     | Κανονική           |
| Ετήσια παραγωγή νερού<br>(m <sup>3</sup> /έτος)      | 300                      | 300           | 30                 |     |     | Κανονική           |
| Ειδική κατανάλωση<br>ενέργειας (kWh/m <sup>3</sup> ) | 5                        | 5             | 1                  |     |     | Κανονική           |
| Μεμβρανοθήκη   | 1500                     | 1500          | 100                |     |     | Κανονική           |
| Αντλία τροφοδοσίας                                   | 300                      | 300           | 30                 |     |     | Κανονική           |
| Ωφέλιμος χρόνος ζωής των<br>συσσωρευτών              | 5                        | 5             | 1.5                |     |     | Κανονική           |
| Ωφέλιμος χρόνος ζωής των<br>μεμβρανών                | 3                        | 3             | 0.5                |     |     | Κανονική           |

### **Βήμα 2:**

Αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic (VB) ως μακρο-εντολή στο Excel (Macro). Ο αλγόριθμος αυτός (βλέπε Παράρτημα 4) υπολογίζει την καθαρή παρούσα αξία σε συνθήκες αβεβαιότητας λόγω της τυχαίας μεταβολής των παραμέτρων του πίνακα 5-5.

### **Βήμα 3:**

Ο αλγόριθμος εκτελείται και επαναλαμβάνεται πολλές φορές (π.χ 100 φορές), παράγονται 100 τιμές της καθαρής παρούσας αξίας. Υπολογίζεται και κατασκευάζεται η

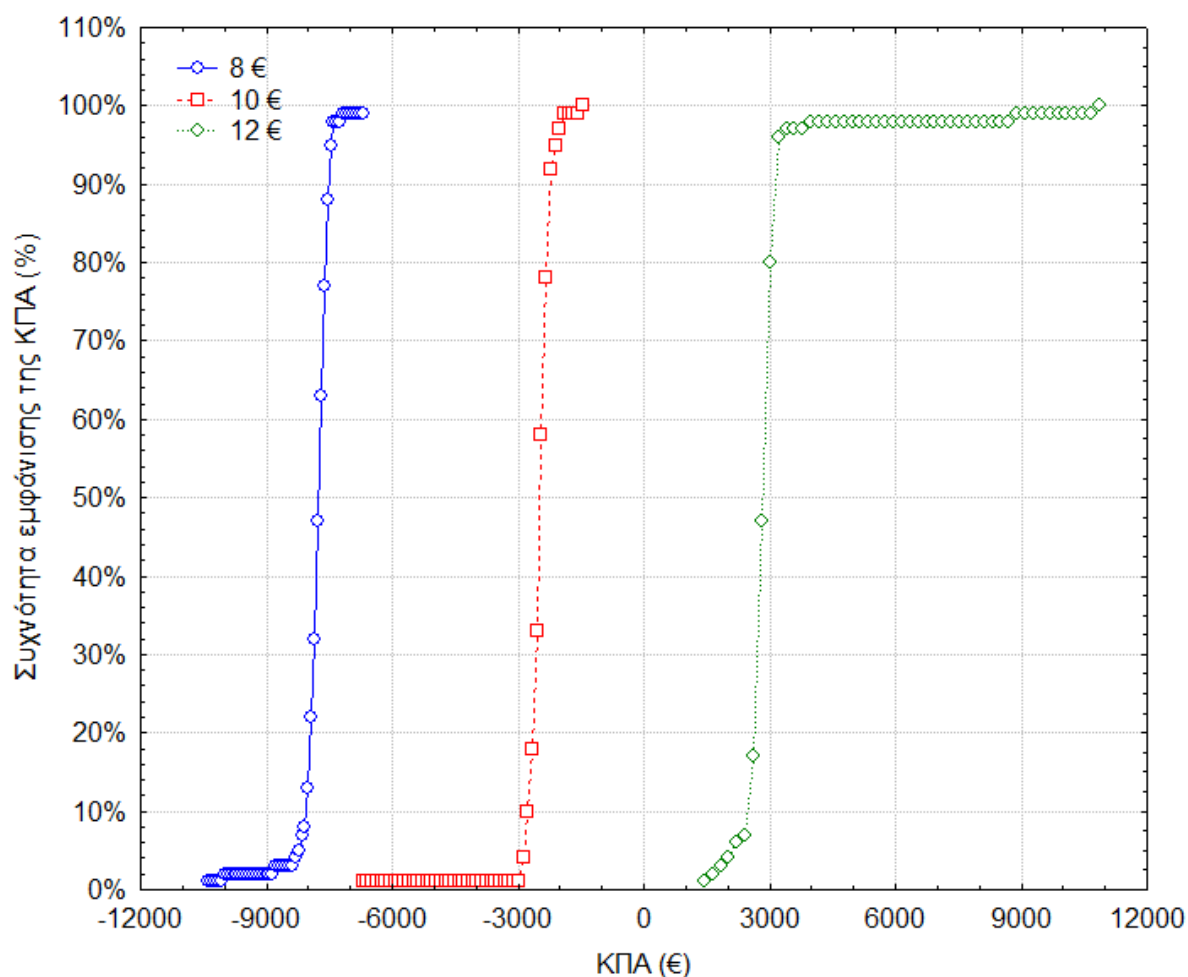
αθροιστική καμπύλη πιθανοτήτων της καθαρής παρούσας αξίας της συγκεκριμένης τοπολογίας.

### 5.7.1 Οικονομική αξιολόγηση της τοπολογίας 1

Η οικονομική αξιολόγηση της τοπολογίας 1 (Φ/Β συστοιχία, συσσωρευτές και ρυθμιστής φόρτισης), πραγματοποιείται με την τροποποίηση των πινάκων 5-1 και 5-3, ο πίνακας 5-2 δεν χρησιμοποιείται σε αυτήν την τοπολογία λόγω απουσίας της ανεμογεννήτριας από την τοπολογία 1. Στη συνέχεια, τροποποιούνται οι παράμετροι του πίνακα 5-5. Οι κυριότερες τροποποιήσεις στις παραμέτρους της τοπολογίας είναι οι ακόλουθες:

- Λόγω της σταθερής παροχής της ενέργειας, ο χρόνος ζωής της μεμβράνης ΑΩ προβλέπεται να είναι μέσα στα όρια που αναφέρει ο κατασκευαστής της μεμβράνης, δηλαδή 5 έτη και ότι η τυπική απόκλιση της τιμής αυτής είναι 3 μήνες. Από τον ορισμό της τυπικής απόκλισης προκύπτει ότι υπάρχει πιθανότητα 95.45% ο χρόνος ζωής της μεμβράνης να κυμαίνεται μεταξύ 4.5 – 5.5 έτη.
- Μηδενίζονται τα κόστη της ανεμογεννήτριας και του μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ.
- Η μέση ετήσια παραγωγή αφαλατωμένου νερού είναι 275 m<sup>3</sup>/έτος, (από τον πίνακα 4-5) με τυπική απόκλιση 10 m<sup>3</sup>/έτος.
- Ο μέσος χρόνος ζωής των συσσωρευτών είναι 5 έτη με τυπική απόκλιση 1.5 έτος.
- Για λόγους σύγκρισης αλλά και για να βρεθεί η τιμή πώλησης του νερού που θα έχει ως αποτέλεσμα να επιτευχθεί θετική καθαρή παρούσα αξία, υποθέσαμε τιμή πώλησης του αφαλατωμένου νερού 8, 10 και 13 €/m<sup>3</sup>.

Οι αθροιστικές καμπύλες της τοπολογίας 1 παρουσιάζονται στην Εικόνα 5-6. Παρατηρείται ότι η πώληση του νερού με 8 €/m<sup>3</sup>, έχει ως αποτέλεσμα ολόκληρη η αντίστοιχη αθροιστική καμπύλη να είναι μικρότερη του μηδέν, και συγκεκριμένα η καθαρή παρούσα αξία θα είναι -6500 €. Ενώ αν πουληθεί το νερό με 10 €/m<sup>3</sup>, η καθαρή παρούσα αξία αφενός θα παραμένει κάτω από το μηδέν αλλά αφετέρου θα είναι -1000 €. Και τέλος, αν το αφαλατωμένο νερό πουληθεί με 12 €/m<sup>3</sup>, παρατηρούμε ότι υπάρχει μικρή πιθανότητα (5%) ότι η καθαρή παρούσα αξία να είναι μικρότερη από 2500 €. Το συμπέρασμα ότι σε αυτήν την τοπολογία το αφαλατωμένο νερό πρέπει να πουληθεί τουλάχιστον 12 €/m<sup>3</sup> για να εξασφαλιστεί η κερδοφορία της επένδυσης με τη μικρότερη αβεβαιότητα.



Εικόνα 5-6: Αθροιστική καμπύλη της τοπολογίας 1

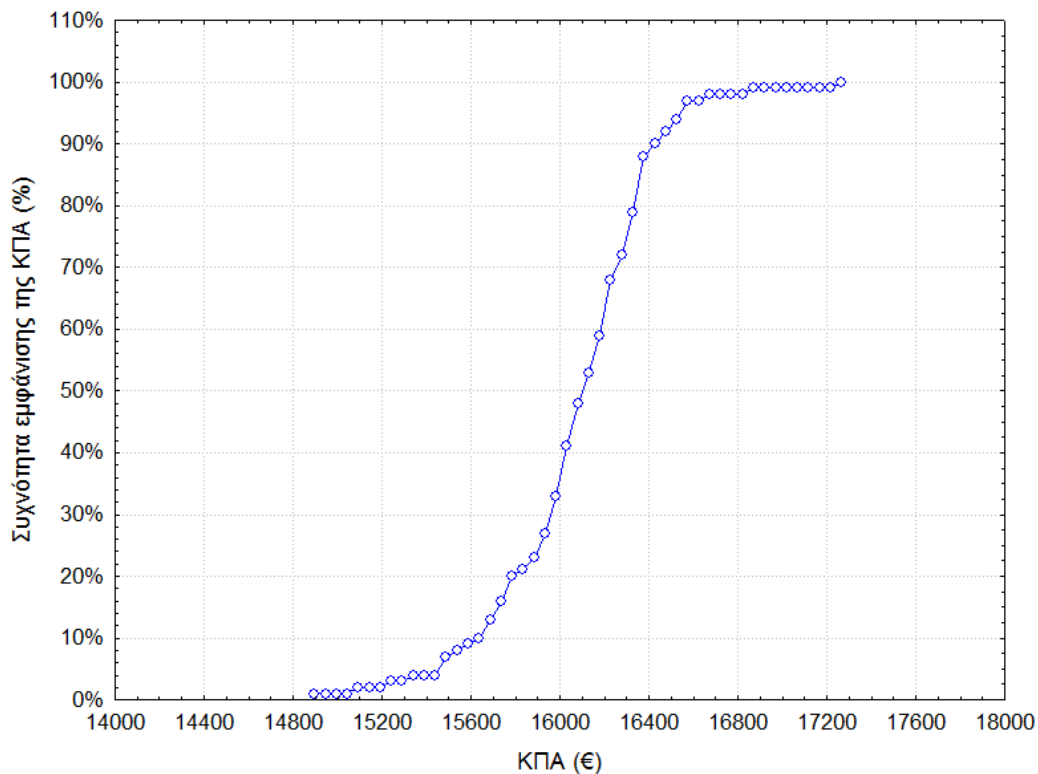
### 5.7.2 Οικονομική αξιολόγηση της τοπολογίας 2

Η οικονομική αξιολόγηση της τοπολογίας 2 (υβριδικό σύστημα που αποτελείται από Φ/Β συστοιχία, ανεμογεννήτρια, ανορθωτής, συσσωρευτές και ρυθμιστής φόρτισης), πραγματοποιείται με την τροποποίηση των πινάκων 5-1, 5-2 και 5-3. Στη συνέχεια, τροποποιούνται οι παράμετροι του πίνακα 5-5. Οι κυριότερες τροποποιήσεις στις παραμέτρους της τοπολογίας είναι οι ακόλουθες:

- Λόγω της σταθερής παροχής της ενέργειας, ο χρόνος ζωής της μεμβράνης ΑΩ προβλέπεται να είναι μέσα στα όρια που αναφέρει ο κατασκευαστής της μεμβράνης, δηλαδή 5 έτη και ότι η τυπική απόκλιση της τιμής αυτής είναι 3 μήνες. Από τον ορισμό της τυπικής απόκλισης προκύπτει ότι υπάρχει πιθανότητα 95.45% ο χρόνος ζωής της μεμβράνης να κυμαίνεται μεταξύ 4.5 – 5.5 έτη.
- Μηδενίζεται το κόστος του μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ.

- Ο μέσος χρόνος ζωής των συσσωρευτών είναι 5 έτη με τυπική απόκλιση 0.5 έτος. Παρατηρείται ότι η τυπική απόκλιση μειώνεται σε αυτήν την τοπολογία λόγω του ότι ο υβριδικός σχεδιασμός μειώνει τον αριθμό των κύκλων φόρτισης εκφόρτισης των συσσωρευτών, αυξάνοντας το χρόνο ζωής τους.
- Η μέση ετήσια παραγωγή αφαλατωμένου νερού είναι  $630 \text{ m}^3/\text{έτος}$ , (από τον πίνακα 4-5) με τυπική απόκλιση  $60 \text{ m}^3/\text{έτος}$ . Άρα υπάρχει 95.45% πιθανότητα η ετήσια παραγωγή αφαλατωμένου νερού να κυμαίνεται μεταξύ 510 και  $750 \text{ m}^3/\text{έτος}$ .
- Υποθέσουμε ότι η τιμή πώληση του νερού  $8.5 \text{ €/m}^3$

Η αθροιστική καμπύλη της τοπολογίας 1 παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-7. Παρατηρείται ότι η πώληση του νερού με  $8.5 \text{ €/m}^3$ , έχει ως αποτέλεσμα ολόκληρη η αντίστοιχη αθροιστική καμπύλη να είναι μεγαλύτερη από το μηδέν, και πιο συγκεκριμένα υπάρχει πολύ μικρή πιθανότητα (5%) ότι η καθαρή παρούσα αξία θα είναι μικρότερη από 15500.



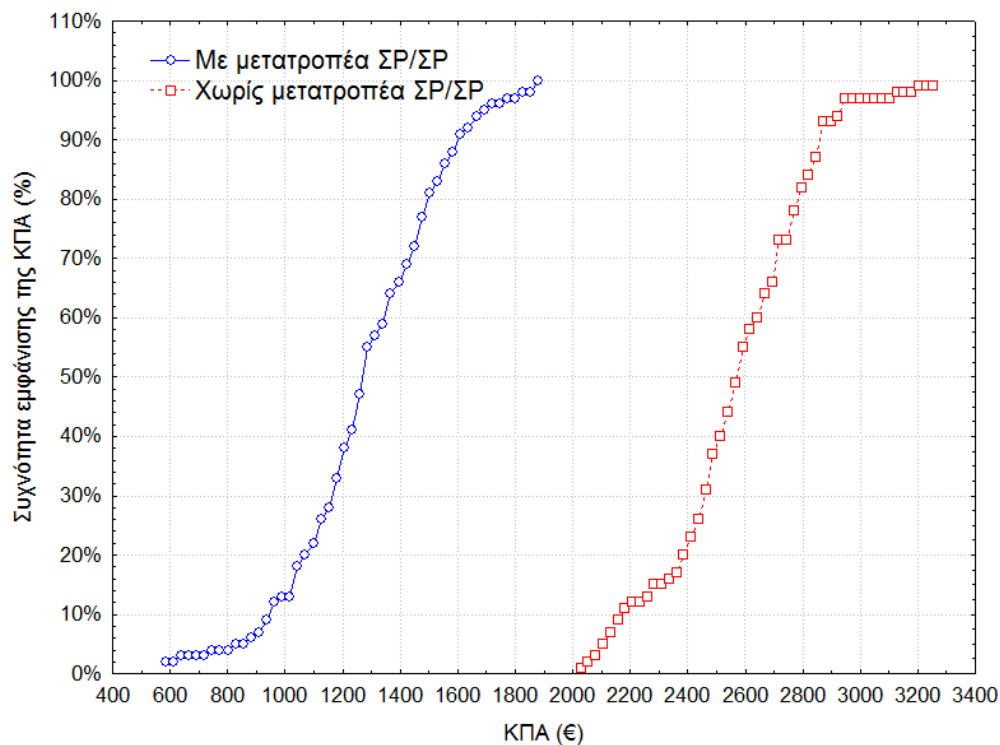
Εικόνα 5-7: Αθροιστική καμπύλη περίπτωσης 2

### 5.7.3 Οικονομική αξιολόγηση της τοπολογίας 3 και 4

Η οικονομική αξιολόγηση των τοπολογιών 3 και 4 (απευθείας σύνδεση της Φ/Β συστοιχίας μέσω και χωρίς μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ), πραγματοποιείται με την τροποποίηση των πινάκων 5-1 και 5-3. Στη συνέχεια, τροποποιούνται οι παράμετροι του πίνακα 5-5. Οι κυριότερες τροποποιήσεις στις παραμέτρους της τοπολογίας είναι οι ακόλουθες:

- Λόγω των μη σταθερών συνθηκών λειτουργίας στις τοπολογίες της απευθείας σύνδεσης, ο χρόνος ζωής της μεμβράνης ΑΩ προβλέπεται να μειωθεί και να μεγαλώνει η αβεβαιότητα για την ακριβή τιμή της. Ο χρόνος ζωής της μεμβράνης ΑΩ ρυθμίζεται σε 3 έτη με τυπική απόκλιση 6 μηνών. Από τον ορισμό της τυπικής απόκλισης αυτό σημαίνει ότι υπάρχει πιθανότητα 95.45% ο χρόνος ζωής της μεμβράνης να κυμαίνεται μεταξύ 2 – 4 έτη.
- Μηδενίζεται το κόστος του μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ στην τοπολογία 4.
- Μηδενίζεται το κόστος των συσσωρευτών.
- Η μέση ετήσια παραγωγή αφαλατωμένου νερού είναι 330 m<sup>3</sup>/έτος για την τοπολογία 3 και 325 m<sup>3</sup>/έτος για την τοπολογία 4 (από τον πίνακα 4-5) με τυπική απόκλιση 30 m<sup>3</sup>/έτος. Η αύξηση της τυπικής απόκλισης σε σχέση με τις άλλες τοπολογίες, οφείλεται στην αύξηση της αβεβαιότητας της παραγόμενης ενέργειας και η έλλειψη συσσωρευτών.
- Υποθέσουμε ότι η τιμή πώλησης του νερού 8.5 €/m<sup>3</sup>

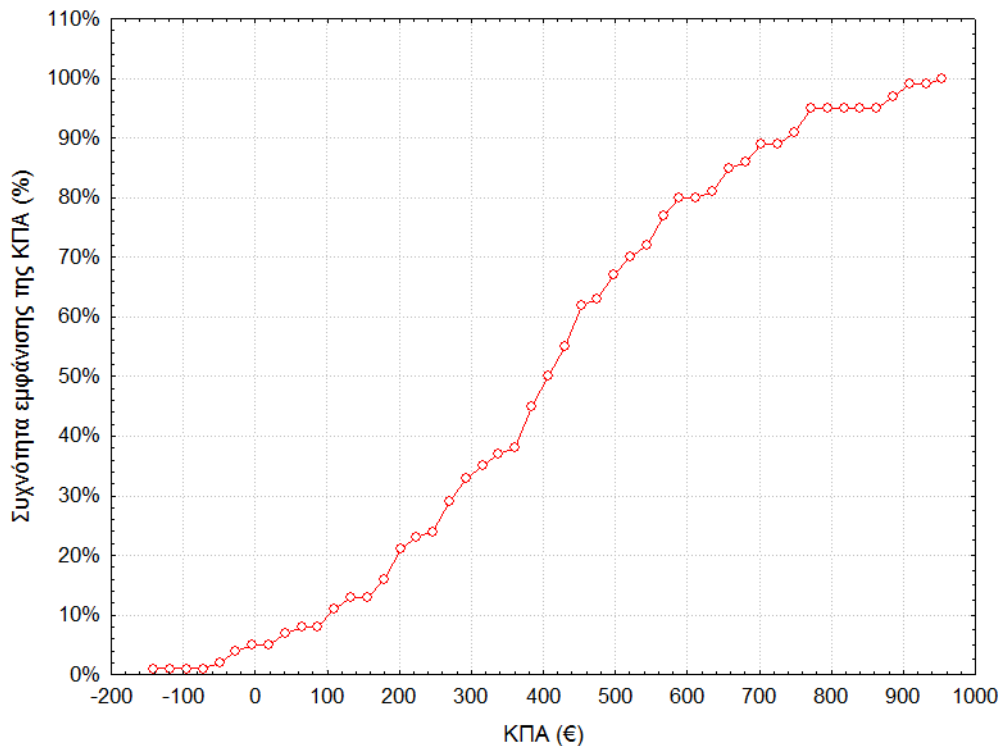
Οι αθροιστικές καμπύλες των τοπολογιών 3 και 4 παρουσιάζονται στην Εικόνα 5-8. Παρατηρείται ότι η πώληση του νερού σε τιμή 8.5 €/m<sup>3</sup>, έχει ως αποτέλεσμα ολόκληρη η αντίστοιχη αθροιστική καμπύλη και των δύο τοπολογιών να είναι μεγαλύτερη από το μηδέν, και πιο συγκεκριμένα υπάρχει πολύ μικρή πιθανότητα (5%) ότι η καθαρή παρούσα αξία να είναι μικρότερη από 900 € για την τοπολογία 3 και 2100 για την τοπολογία 4.



Εικόνα 5-8: Οι αθροιστικές καμπύλες των τοπολογιών 3 και 4 (απευθείας σύνδεση)



Αν εξετάζουμε την περίπτωση όπου επιτρέπουμε αρνητικές τιμές της ΚΠΑ κατά 5%, η τιμή πώλησης του νερού στην τοπολογία 4 (απευθείας σύνδεσης χωρίς μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ) μειώνεται σε 7.8 €/m<sup>3</sup>, βλέπε. Εικόνα 5-9. Αυτό σημαίνει ότι το αφαλατωμένο νερό μπορεί να πωληθεί στην τιμή της 7.8 €/m<sup>3</sup> με πιθανότητα 5% να έχουμε αρνητικές τιμές της καθαρής παρούσας αξίας.



Εικόνα 5-9: Αθροιστική καμπύλη της τοπολογίας 4 με τιμή πώλησης του νερού 7.8 €/m<sup>3</sup>

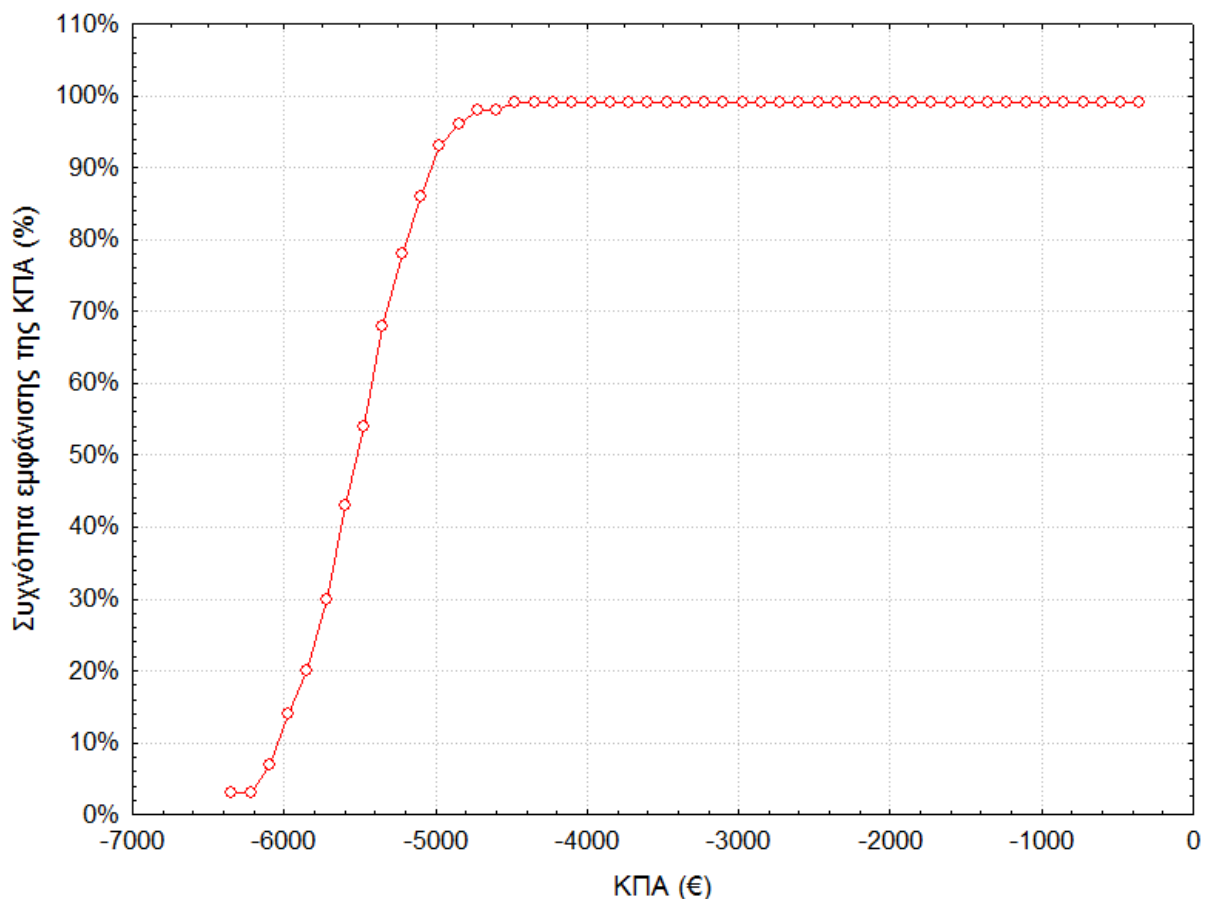
#### 5.7.4 Οικονομική αξιολόγηση της τοπολογίας 5

Η οικονομική αξιολόγηση της τοπολογίας 5 (μόνο ανεμογεννήτρια και συσσωρευτές), πραγματοποιείται με την τροποποίηση των πινάκων 5-2 και 5-3. Στη συνέχεια, τροποποιούνται οι παράμετροι του πίνακα 5-5. Οι κυριότερες τροποποιήσεις στους παραμέτρους της τοπολογίας είναι τα ακόλουθα:

- Λόγω της σταθερής παροχής της ενέργειας, ο χρόνος ζωής της μεμβράνης ΑΩ προβλέπεται να είναι μέσα στα όρια που αναφέρει ο κατασκευαστής της μεμβράνης, δηλαδή 5 έτη και η τυπική απόκλιση της τιμής αυτής είναι 3 μήνες. Από τον ορισμό της τυπικής απόκλισης αυτό σημαίνει ότι υπάρχει πιθανότητα 95.45% ο χρόνος ζωής της μεμβράνης να κυμαίνεται μεταξύ 4.5 – 5.5 έτη.
- Μηδενίζεται το κόστος του μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ.
- Μηδενίζεται το κόστος της Φ/Β συστοιχίας.

- Ο μέσος χρόνος ζωής των συσσωρευτών είναι 5 έτη με τυπική απόκλιση 1.5 έτος.
- Η μέση ετήσια παραγωγή αφαλατωμένου νερού είναι  $353 \text{ m}^3/\text{έτος}$ , (από τον πίνακα 4-5) με τυπική απόκλιση  $30 \text{ m}^3/\text{έτος}$ .
- Υποθέσουμε ότι η τιμή πώλησης του νερού είναι  $8.5 \text{ €/m}^3$ .

Η αθροιστική καμπύλη της τοπολογίας 5 παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-10. Παρατηρείται ότι η πώληση του νερού σε τιμή  $8.5 \text{ €/m}^3$ , έχει ως αποτέλεσμα ολόκληρη η αντίστοιχη αθροιστική καμπύλη να είναι μικρότερη από το μηδέν, ή με άλλα λόγια υπάρχει πιθανότητα 100% η καθαρή παρούσα αξία να είναι αρνητική στην τοπολογία της σύνδεσης της μονάδας ΑΩ με την ανεμογεννήτρια και τους συσσωρευτές.



Εικόνα 5-10: Αθροιστική καμπύλη της τοπολογίας 5 (μόνο ανεμογεννήτρια και συσσωρευτές)

Οι υποθέσεις των διαφόρων τοπολογιών συνοψίζονται στον πίνακα 5-6, στον οποίο καταγράφονται και οι αντίστοιχες τιμές της ΚΠΑ. Στον πίνακα 5-7, συνοψίζονται οι τιμές της αρχικής επένδυσης, το κόστος συντήρησης & λειτουργίας και το ετήσιο ισοδύναμο κόστος του συστήματος και οι διάφορες τοπολογίες του.

Παρατηρείται από την οικονομική ανάλυση ότι η τοπολογία 2 είναι η πιό οικονομικά ενδιαφέρουσα λύση (υβριδικός σχεδιασμός), δεδομένου ότι έχει την μεγαλύτερη τιμή της καθαρής παρούσας αξίας (16000 €). Το γεγονός αυτό οφείλεται στη συμπληρωματική δράση ηλιακού και αιολικού δυναμικού και στη μειωμένη αβεβαιότητα του χρόνου ζωής των συσσωρευτών. Ακολουθεί η τοπολογία 4 (απευθείας σύνδεση της Φ/Β συστοιχίας με τη μονάδα ΑΩ), με καθαρή παρούσα αξία 3000 €. Λόγω όμως της χαμηλής ειδικής κατανάλωσης ενέργειας της τοπολογίας της απευθείας σύνδεσης, όπως αυτό έχει αποδειχθεί από το κεφάλαιο 3 ( $4.1 \text{ kWh/m}^3$ ) καθώς και του απλού σχεδιασμού του, κρίνεται ότι η συγκεκριμένη τοπολογία 4 είναι η πιο τεχνικά κατάλληλη και οικονομικά βιώσιμη. Παρατηρείται επίσης ότι η σύνδεση της ανεμογεννήτριας με συσσωρευτές και τη μονάδα ΑΩ (τοπολογία 5) δεν είναι οικονομικά βιώσιμο λόγω του χαμηλού αιολικού δυναμικού της περιοχής της Αθήνας

Πίνακας 5-6: Σύνοψη των υποθέσεων των διαφόρων τοπολογιών

|             | Χρόνος ζωής των μεμβρανών (έτη) | Χρόνος ζωής των συσσωρευτών (έτη) | Μέση ετήσια παραγωγή του νερού (m <sup>3</sup> /έτος) | ΚΠΑ (€) για 95% πιθανότητα εμφάνισης και τιμή πώλησης του νερού (€/m <sup>3</sup> ) |       |       |       |      |
|-------------|---------------------------------|-----------------------------------|---|---|-------|-------|-------|------|
|             |                                 |                                   |   | 7.8   | 8     | 8.5   | 10    | 12   |
| Τοπολογία 1 | 4.5 – 5.5                       | 2 - 8                             | 237 - 277   |   | -7000 |       | -1500 | 3000 |
| Τοπολογία 2 | 2 - 4                           | 4 - 6                             | 516 - 756   |   |       | 16000 |       |      |
| Τοπολογία 3 | 2 - 4                           | -                                 | 265 - 385   |   |       | 1700  |       |      |
| Τοπολογία 4 | 4.5 – 5.5                       | -                                 | 270 - 390   | 780   |       | 3000  |       |      |
| Τοπολογία 5 | 4.5 – 5.5                       | 2 - 8                             | 293 - 413   |   |       | -5000 |       |      |

Πίνακας 5-7: Αρχική επένδυση, κόστος συντήρησης και λειτουργίας και το ετήσιο ισοδύναμο κόστος του συστήματος

|             | Αρχική επένδυση (€) | Ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας Σ&Λ (€/έτος) | Ετήσιο ισοδύναμο κόστος (€/έτος) |
|-------------|---------------------|---|----------------------------------|
| Τοπολογία 1 | 16000               | 757   | 2072.2                           |
| Τοπολογία 2 | 19000               | 900   | 2500.7                           |
| Τοπολογία 3 | 14000               | 700   | 1655.31                          |
| Τοπολογία 4 | 13500               | 698   | 1617.74                          |
| Τοπολογία 5 | 12000               | 800   | 2042.96                          |

## 5.8 Συμπεράσματα

- Η ανάλυση ευαισθησίας είναι η μελέτη της ανταπόκρισης ενός συστήματος στις διαταραχές που προκαλούνται σε μεταβλητές, με τις οποίες υπάρχει συναρτησιακή σχέση. Είναι μια προκαταρκτική διαδικασία για τον προσδιορισμό των σημαντικών παραμέτρων που επηρεάζουν το κόστος του παραγόμενου νερού.
- Το κριτήριο της καθαρής παρούσας αξίας κρίθηκε κατάλληλο για την αξιολόγηση της επένδυσης μονάδας αφαλάτωσης που τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ για το λόγο ότι λαμβάνει υπόψη όλα τα μελλοντικά έσοδα και έξοδα της επένδυσης και έτσι αξιολογεί τη συνολική της επίπτωση στην επιχείρηση.
- Η χρήση της μεθόδου διαχείρισης χρηματοοικονομικού κινδύνου, η μέθοδος Monte Carlo και το κριτήριο της καθαρής παρούσας αξίας, λαμβάνουν υπόψη την τυχαία μεταβολή του κόστους των επιμέρους συστημάτων και τελικά η αξιολόγηση της επένδυσης πραγματοποιείται με την πιθανότητα εμφάνισης του κινδύνου της αρνητικής καθαρής παρούσας αξίας.
- Το κόστος του παραγόμενου νερού από μια μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με απευθείας σύνδεση με Φ/Β συστοιχία, που κυμαίνεται μεταξύ 7.8 και 8.5 €/m<sup>3</sup>, είναι ανταγωνιστικό του κόστους μεταφοράς του νερού στα νησιά με καράβια για το 2007 που καταγράφηκε σε 8 €/m<sup>3</sup>.
- Οι τοπολογίες 2 και 4 (υβριδικός σχεδιασμός και απευθείας σύνδεση χωρίς μετατροπέα αντίστοιχα) κρίθηκαν να είναι οι πιο οικονομικά βιώσιμες με θετική καθαρή παρούσα αξία. Η τοπολογία 4 της απευθείας σύνδεσης είναι τεχνικά πιο αποδεκτή για το λόγο ότι έχει την μικρότερη ειδική κατανάλωση ενέργειας και είναι πιο απλή στον σχεδιασμό και στη λειτουργία λόγω απουσίας των συσσωρευτών και της ανεμογεννήτριας.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:**

# **ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ**



## 6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ

### 6.1 Εισαγωγή

Αντικείμενο της διατριβής ήταν η ανάπτυξη, η πειραματική και θεωρητική διερεύνηση καθώς και η τεχνική και οικονομική αξιολόγηση, μικρής δυναμικότητας ενεργειακού αυτόνομων συστημάτων αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με αντίστροφη ώσμωση (ΑΩ), εξοπλισμένων με συσκευή ανάκτησης υδραυλικής ενέργειας της άλμης. Στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκε και μελετήθηκε εκτενώς μικρή μονάδα ΑΩ ονομαστικής δυναμικότητας 1.7 m<sup>3</sup>/day. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα κυριότερα συμπεράσματα της διατριβής καθώς και μελλοντικά πεδία έρευνας.

### 6.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι τεχνολογίες αφαλάτωσης που βρήκαν ευρεία εφαρμογή και έχουν πλήρως δοκιμαστεί και κυκλοφορούν στο εμπόριο τα τελευταία 30 έως 40 χρόνια είναι η εξάτμιση, η ιοντικές μέθοδοι, και η αντίστροφη ώσμωση. Υπάρχουν άλλοι μέθοδοι αφαλάτωσης που δεν βρήκαν ακόμα ευρεία εμπορική εφαρμογή, όπως η αφαλάτωση με ψύξη και η απόσταξη με μεμβράνες.

Η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της αφαλάτωσης μπορεί να πραγματοποιηθεί με συμβατικές πηγές ενέργειας όπως η ηλεκτρική ενέργεια, η θερμότητα, η πυρηνική ενέργεια και η απορριπτόμενη ενέργεια από διάφορες βιομηχανίες. Από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η ηλεκτρική ηλιακή ενέργεια αποτελεί το 43% του ποσοστού χρήσης για κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των ήδη εγκατεστημένων συστημάτων αφαλάτωσης, ακολουθεί η θερμική ηλιακή ενέργεια με 27%, η αιολική ενέργεια με 20% και τα υβριδικά συστήματα με 10%. Προς το παρόν, η βιομάζα δεν αποτελεί βιώσιμη πηγή ενέργειας για την αφαλάτωση.

Υπάρχουν και άλλοι πηγές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που τουλάχιστον θεωρητικά μπορούν να συνδυαστούν με μονάδες αφαλάτωσης, όπως η γεωθερμική ενέργεια και η ενέργεια από τους Ωκεανούς.

Από τις μεθόδους αφαλάτωσης που συνδυάζονται άριστα με τις ΑΠΕ, η πλέον διαδεδομένη είναι η αντίστροφη ώσμωση, η οποία χρησιμοποιείται στο 65% των εγκατεστημένων μονάδων αφαλάτωσης που συνδυάζονται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ακολουθεί η MSF με 11%, η MED με 10% και το ED και το VC με 4%.

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ανακτητών ενέργειας για μονάδες αφαλάτωσης με ΑΩ, 1) τα συμβατικά συστήματα ανάκτησης ενέργειας, όπως οι ο στρόβιλος Pelton και 2) νέα



συστήματα ανάκτησης και εξοικονόμησης ενέργειας, όπως οι εναλλάκτες πίεσης, οι περιστροφικές αντλίες της εταιρίας Danfoss. Για πολύ μικρές μονάδες ΑΩ υπάρχουν μόνο οι αντλίες Clark.

Από την εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση προκύπτει ότι η απευθείας σύνδεση της Φ/Β συστοιχίας με μονάδα αφαλάτωσης ΑΩ θαλασσινού νερού δεν έχει μελετηθεί πειραματικά, και πιο συγκεκριμένα όταν αυτή λειτουργεί με συνεχές ρεύμα και είναι εξοπλισμένη με συσκευή ανάκτησης υδραυλικής ενέργειας της άλμης.

### 6.3 Συμβατικά συστήματα αφαλάτωσης και θεωρητική διερεύνηση

Τα στοιχεία μεμβρανών ΑΩ αποτελούν την καρδιά του συστήματος μέσα στα οποία πραγματοποιείται η διεργασία της αφαλάτωσης. Υπάρχουν διάφοροι παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία των μεμβρανών ΑΩ, όπως η πίεση εισόδου της μεμβράνης, η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας, η συγκέντρωση των αλάτων του νερού τροφοδοσίας, ο βαθμός ανάκτησης του αφαλατωμένου νερού και ο βαθμός pH.

Η θεωρητική διερεύνηση των στοιχείων μεμβρανών ΑΩ που είναι συνδεδεμένα στη σειρά πραγματοποιείται για κάθε στοιχείο ξεχωριστά και στη συνέχεια εφαρμόζονται ισοζύγια μάζας και ενέργειας για το σύνολο των στοιχείων.

Οι φυγόκεντροι αντλίες, χρησιμοποιούνται στις συμβατικές μονάδες αφαλάτωσης κυρίως ως αντλίες τροφοδοσίας, ενώ οι πολυβάθμιες χρησιμοποιούνται και ως αντλίες υψηλής πίεσης. Οι αντλίες θετικής μετατόπισης χρησιμοποιούνται κυρίως ως αντλίες υψηλής πίεσης, λόγω του μεγάλου βαθμού απόδοσης και της ικανότητας ανάπτυξης υψηλών πιέσεων. Οι παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν τη λειτουργία των περιστροφικών αντλιών είναι η ονομαστική πίεση λειτουργίας, ο κανονικός αριθμός στροφών, η θεωρητική και η πραγματική παροχή, και η θεωρητική ισχύς. Ο υπολογισμός των δυναμικών αντλιών, δηλαδή η παροχή, η πίεση και οι στροφές, πραγματοποιείται με την εφαρμογή των εξισώσεων ομοιότητας των δυναμικών αντλιών.

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. Η θεωρητική διερεύνηση της αντλίας Clark, πραγματοποιείται με την εφαρμογή εξισώσεων ισοζυγίων μάζας και ενέργειας για το διερχόμενο νερό τροφοδοσίας (χαμηλής πίεσης), την άλμη (υψηλής πίεσης) και το νερό τροφοδοσίας προς τις μεμβράνες (υψηλής πίεσης). Η αντλία Clark όπως και όλες τις δυναμικές αντλίες έχει μεγάλο και σταθερό ογκομετρικό βαθμό απόδοσης. Ο ολικός βαθμός απόδοσης της αντλίας Clark αποτελείται από το γινόμενο του ογκομετρικού βαθμού απόδοσης και το μηχανικό βαθμό απόδοσης.

#### 6.4 Πειραματική διερεύνηση του συστήματος

Ο σχεδιασμός των μονάδων ΑΩ βασίζεται κυρίως στα λογισμικά σχεδιασμού και προσομοίωσης των κατασκευαστικών εταιριών των μεμβρανών. Τα λογισμικά αυτά ενώ είναι πολύ χρήσιμα εργαλεία για το σχεδιασμό της μονάδας ΑΩ (προσδιορισμός των κυρίων διαστάσεων της μονάδας), δεν μπορούν όμως να πραγματοποιήσουν δυναμική προσομοίωση ούτε μπορούν να υπολογίζουν την παραγωγή των μεμβρανών εκτός των ορίων λειτουργίας που θέτει η εταιρία (πίεση και παροχή τροφοδοσίας).

Η μεγάλη ειδική κατανάλωση ενέργειας που χαρακτηρίζει τις μικρές μονάδες ΑΩ, οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι αυτές οι μονάδες δεν διαθέτουν συσκευές ανάκτησης της υδραυλικής ενέργειας της άλμης. Η πειραματική διερεύνηση της συμβατικής πειραματικής μονάδας έδειξε ότι η πειραματική μονάδα παράγει σταθερή ποσότητα αφαλατωμένου νερού και ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα ήταν στα όρια των προδιαγραφών του πόσιμου νερού. Επίσης η πειραματική διερεύνηση έδειξε όμως ότι η ειδική κατανάλωση ενέργειας ανήλθε στην τιμή των 18.3 kWh/m<sup>3</sup>. Αυτή η τιμή της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας καθιστά τη μονάδα ΑΩ πολύ ενεργοβόρα, και δυσκολεύει τη σύνδεσή της με συστήματα ΑΠΕ. Ο ολικός βαθμός απόδοσης των μονάδων ΑΩ εξαρτάται από την ύπαρξη συσκευής ανάκτησης ενέργειας ή όχι. Οι συμβατικές μονάδες ΑΩ απορρίπτουν περίπου 85 – 90% της καταναλισκόμενης ενέργειας, ενώ η χρήση συσκευής ανάκτησης ενέργειας ανακτά ένα μεγάλο ποσοστό από αυτή την απορριπτόμενη ενέργεια αυξάνοντας έτσι τον συνολικό βαθμό απόδοσης των μονάδων ΑΩ.

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος ΑΠΕ για κάλυψη των ενεργειακών αναγκών είναι μια τεχνο-οικονομική διαδικασία που μπορεί να πραγματοποιηθεί με λογισμικό Η/Υ, όπως για παράδειγμα με το λογισμικό ΟΜΗΡΟΣ. Το μέγεθος της Φ/Β συστοιχίας που θα κάλυπτε τις ενεργειακές ανάγκες της μονάδας ΑΩ που μελετήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας υπολογίστηκε σε 6 kWp με αντίστοιχο κόστος παραγωγής του νερού 22 €/m<sup>3</sup>. Η χρήση κατάλληλης συσκευής ανάκτησης της υδραυλικής ενέργειας της άλμης έδειξε ότι η ειδική κατανάλωση ενέργειας μπορεί να μειωθεί σε 4.5 kWh/m<sup>3</sup>.

Η λεπτομερής μελέτη του κινητήρα ΣΡ προσέφερε σημαντικές πληροφορίες, όπως ο πραγματικός βαθμός απόδοσης ή οι σχέσεις μεταξύ κατανάλωσης ρεύματος και ροπής και στροφών του κινητήρα. Οι πληροφορίες αυτές ήταν απαραίτητες λόγω του ότι ο κινητήρας ΣΡ αποτελεί το μοναδικό καταναλωτή ενέργειας στη μονάδα ΑΩ, και για το λόγω αυτό κρίθηκε αναγκαία η μελέτη των παραμέτρων λειτουργίας του.

Οι μεταβλητές συνθήκες λειτουργίας τις μονάδες ΑΩ δεν επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα (συγκέντρωση των αλάτων) και τη συνολική παραγόμενη ποσότητα του αφαλατωμένου νερού, και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το αφαλατωμένο νερό

αποθηκεύεται σε δεξαμενές νερού όπου η συγκέντρωση των αλάτων υπολογίζεται ως ο μέσος όρος της παραγόμενης ποσότητας από τη μονάδα.

Από τη πειραματική διερεύνηση της τροποποιημένης μονάδας ΑΩ προκύπτει ότι η χρήση συσσωρευτών προσφέρει σταθερές συνθήκες λειτουργίας στη μονάδα ΑΩ αλλά ταυτόχρονα αυξάνει το ποσοστό της ενέργειας που χάνεται λόγω φόρτισης-εκφόρτισης των συσσωρευτών. Ενώ η απευθείας σύνδεση της μονάδας ΑΩ με τη Φ/Β συστοιχία προσφέρει την καλύτερη χρήση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα Φ/Β στοιχεία λόγω μείωσης των απωλειών.

Η χρήση ενός μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ μπορεί να βελτιώνει τις συνθήκες εκκίνησης των μονάδων ΑΩ, όμως ο χαμηλός βαθμός απόδοσης του μετατροπέα μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη σπατάλη της ενέργειας κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας.

Η χρήση ανεμογεννήτριας προϋποθέτει τοποθεσία με υψηλό αιολικό δυναμικό και χρήση συσσωρευτών. Η απευθείας σύνδεση της ανεμογεννήτριας με μονάδες ΑΩ είναι τεχνικά δύσκολη λόγω της αστάθειας της παραγόμενης ενέργειας από την ανεμογεννήτρια..

## 6.5 Προσομοίωση του συστήματος

Η ύπαρξη αξιόπιστων και απλών στην εφαρμογή μοντέλων των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης με ΑΩ συνιστά προϋπόθεση για τον σωστό τους σχεδιασμό και την ρεαλιστική αποτίμηση των επιδόσεων τους σε δεδομένες κλιματολογικές συνθήκες. Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας αναπτύχθηκε και επικυρώθηκε με επιτυχία ένα τέτοιο μοντέλο, βασιζόμενο στο συνδυασμό επιμέρους υπο-μοντέλων για τα διάφορα υποσυστήματα της εγκατάστασης. Για το σκοπό αυτό αξιοποιήθηκε το λογισμικό TRNSYS, το οποίο είναι ένα επεκτάσιμο δυναμικό περιβάλλον λεπτομερούς προσομοίωσης ενεργειακών συστημάτων ΑΠΕ. Το μεγάλο πλεονέκτημα του TRNSYS είναι η αρθρωτή δομή του που το κάνει κατάλληλο για χρήση σε πολλά πολύπλοκα συστήματα.

Τα υπάρχοντα μοντέλα προσομοίωσης της μεμβράνης ΑΩ είτε είναι πολύ πολύπλοκα και εξυπηρετούν τη μικροσκοπική ανάλυση των υλικών των μεμβρανών, είτε δεν καλύπτουν τις ανάγκες λειτουργίας της μεμβράνης σε μεταβλητές συνθήκες πίεσης και παροχής. Το προτεινόμενο μοντέλο της μεμβράνης, το οποίο επικυρώθηκε στα πλαίσια της παρούσας έρευνας, είναι απλό στην εφαρμογή και αποτελεσματικό σε μεταβλητές συνθήκες λειτουργίας της μεμβράνης. Το μοντέλο βασίζεται στο συνδυασμό των πειραματικών εμπειρικών δεδομένων και των αναλυτικών εξισώσεων που περιγράφουν τη λειτουργία των μεμβρανών ΑΩ.

Αναπτύχθηκαν επίσης και επικυρώθηκαν αντίστοιχα μοντέλα για την αντλία Clark και για τον κινητήρα-αντλία τροφοδοσίας. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται, στην περίπτωση της αντλίας Clark, σε αναλυτικές εξισώσεις που περιγράφουν την αρχή διατήρησης της μάζας

και της ενέργειας, ενώ για το κινητήρα και για την αντλία τροφοδοσίας χρησιμοποιήθηκαν εμπειρικές εξισώσεις που αντιπροσωπεύουν τα πειραματικά δεδομένα της λειτουργίας τους.

Η επικύρωση των αποτελεσμάτων των καινούριων μοντέλων πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια. Αρχικά έγινε η επικύρωση του κάθε μοντέλου ξεχωριστά, σε μορφή FORTRAN, και στη συνέχεια η επικύρωση του συνολικού μοντέλου του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των υφιστάμενων υπο-μοντέλων του TRNSYS. Ο συντελεστής συσχέτισης για την επικύρωση των μοντέλων στη FORTRAN αγγίζει το 99%, ενώ στην περίπτωση της επικύρωσης του συνολικού μοντέλου φτάνει μέχρι 81%. Οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν μεταξύ συνολικού μοντέλου και πειραματικών τιμών, μπορούν να αποσωθούν τόσο στην ύπαρξη μεταβατικών φαινομένων και αδρανειακών καταστάσεων που δεν έχουν παρθεί υπόψη από το συνολικό αυτό μοντέλο, όσο και στη συσσώρευση των σφαλμάτων των επιμέρους υπό-μοντέλων.

Το συνολικό μοντέλο που αναπτύχθηκε είναι πολύ χρήσιμο εργαλείο για προσομοίωση όχι μόνο της συγκεκριμένης μονάδας ΑΩ, αλλά και για το σχεδιασμό παρόμοιων εγκαταστάσεων σε διάφορες τοποθεσίες, ή ακόμα για την προσομοίωση διαφόρων μεγεθών μονάδων ΑΩ που τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ, με σκοπό τον προσδιορισμό του βέλτιστου σχεδιασμού. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου για ένα τυπικό έτος, μπορούν εξάλλου να χρησιμοποιηθούν στην οικονομική ανάλυση και αξιολόγηση παρόμοιων εγκαταστάσεων.

## 6.6 Οικονομική αξιολόγηση του συστήματος

Γενικά οι παράμετροι του κόστους της αφαλάτωσης κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: το αρχικό κόστος επένδυσης, το κόστος συντήρησης και λειτουργίας (Σ&Λ) και το κόστος του παραγόμενου νερού. Το αρχικό κόστος επένδυσης περιλαμβάνει όλα τα κόστη κατασκευής, σχεδιασμού, προμήθειας, έκδοση της άδειας εγκατάστασης και δανειοδότησης της μονάδας αφαλάτωσης. Το μεγαλύτερο ποσοστό του αρχικού κόστους επένδυσης έχει το κόστος κατασκευής της μονάδας. Το κόστος κατασκευής (άμεσο κόστος) περιλαμβάνει τα κόστη προμήθειας, κατασκευής και εγκατάστασης της μονάδας αφαλάτωσης καθώς και τα συστήματα προ-επεξεργασίας και μετ-επεξεργασίας του νερού. Το άμεσο αρχικό κόστος αποτελεί περίπου το 85% του αρχικού κόστους επένδυσης. Το υπόλοιπο ποσοστό δηλαδή 15%, είναι το έμμεσο κόστος που περιλαμβάνει τα κόστη του σχεδιασμού, μελέτης, έκδοσης της άδειας εγκατάστασης και δανειοδότησης καθώς και όλα τα διοικητικά κόστη του έργου. Όλο το αρχικό κόστος επένδυσης μπορεί να μετατραπεί σε ισοδύναμο ετήσιο κόστος με μονάδα μέτρησης το €/έτος.

Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας περιλαμβάνει τις ετήσιες δαπάνες για την ενέργεια, εργατικό προσωπικό, αντικατάσταση των εξαρτημάτων και τα αναλώσιμα της

μονάδας. Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας κατατάσσεται σε δύο κατηγορίες: σταθερό και μεταβλητό ετήσιο κόστος. Το σταθερό κόστος συντήρησης και λειτουργίας (Σ&Λ) περιλαμβάνει όλα τα κόστη που δεν εξαρτώνται από την ποσότητα παραγωγής του πόσιμου νερού. Τέτοια κόστη είναι: εργατικό κόστος, συντήρηση εξοπλισμού, περιβαλλοντικό και τεχνικό έλεγχο, κόστος ασφάλισης και διοικητικά κόστη. Το μεταβλητό κόστος Σ&Λ περιλαμβάνει όλα τα κόστη που εξαρτούνται από την παραγόμενη ποσότητα νερού, όπως τα κόστη για την καταναλισκόμενη ενέργεια, χημικά, αντικατάστασης των εξαρτημάτων και διαχείριση της άλμης. Το μεταβλητό κόστος είναι συνήθως της τάξεως των 85% του συνολικού κόστους Σ&Λ, ενώ το σταθερό κόστος είναι της τάξης του 15%. Η μονάδα μέτρησης του συνολικού κόστους Σ&Λ είναι το €/έτος.

Το κόστος του παραγόμενου νερού περιλαμβάνει όλα τα προηγούμενα κόστη, δηλαδή το αρχικό κόστος επένδυσης και το συνολικό κόστος συντήρησης και λειτουργίας. Το κόστος του νερού υπολογίζεται με το άθροισμα του ισοδύναμου ετήσιου κόστους επένδυσης και το ετήσιο κόστος Σ&Λ. Η μονάδα μέτρησης του κόστους του παραγόμενου νερού είναι €/m<sup>3</sup>.

Υπάρχουν παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν το κόστος παραγωγής του αφαλατωμένου νερού, όπως το μέγεθός της μονάδας αφαλάτωσης (οικονομία κλίμακας). Μια άλλη παράμετρος που επηρεάζει σημαντικά το κόστος του νερού είναι ο λεγόμενος συντελεστής διαθεσιμότητας. Το είδος νερού τροφοδοσίας αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα που θα καθορίσει και το τελικό κόστος του παραγόμενου νερού. Υψηλή συγκέντρωση αλάτων, όπως στο θαλασσίνο νερό, απαιτεί πολύ μεγαλύτερη πίεση λειτουργίας σε μία μονάδα ΑΩ από ότι στην περίπτωση του υφάλμυρου νερού. Ετήσιος, η ποιότητα του παραγόμενου νερού είναι σημαντική παράμετρος προσδιορισμού του κόστους παραγωγής ειδικά για το πόσιμο νερό. Η διαχείριση της άλμης σε μερικές περιπτώσεις επηρεάζει σημαντικά το κόστος του αφαλατωμένου νερού. Το κόστος διαχείρισης της άλμης επηρεάζει το κόστος του αφαλατωμένου νερού στις περιπτώσεις χρήσης μη συμβατικών μεθόδων διαχείρισης της άλμης. Το κόστος ενέργειας επηρεάζει σημαντικά το κόστος του νερού. Το ενεργειακό κόστος φτάνει μέχρι 70% του μεταβλητού κόστους Σ&Λ.

Η ανάλυση ευαισθησίας έχει ως σκοπό τη μελέτη της ανταπόκρισης του κόστους παραγωγής του αφαλατωμένου νερού στις μεταβολές κρίσιμων παραμέτρων όπως για παράδειγμα η συχνότητα αλλαγής ζώης των μεμβρανών και η συχνότητα αλλαγής των συσσωρευτών. Η ανάλυση έδειξε ότι το κόστος του αφαλατωμένου νερού δεν επηρεάζεται σημαντικά με την αύξηση της συχνότητας αλλαγής των μεμβρανών όσο είναι με την αύξηση της συχνότητας αλλαγής των συσσωρευτών. Το αποτέλεσμα αυτό ευνοεί την τοπολογία της απευθείας σύνδεσης, η οποία απαιτεί συχνότερη αλλαγή των μεμβρανών λόγω των μεταβαλλόμενων συνθηκών λειτουργίας (μεταβλητή πίεση και παροχή του νερού τροφοδοσίας).

Η μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo είναι μια εξελεγμένη μέθοδος υπολογισμού χρηματοοικονομικού κινδύνου. Απαιτεί τη γνώση των συναρτήσεων κατανομών πιθανοτήτων (χρήση της κανονικής και της ομοιόμορφης κατανομής) των πρωτογενών μεγεθών όπως την ετήσια παραγωγή του νερού, η τιμή και ο χρόνος ζωής των μεμβρανών. Απαιτεί επίσης ένα αλγόριθμο σε Η/Υ για να παράγει σύνολα από τυχαίες τιμές για τα υπό μελέτη μεγέθη και να υπολογίζει για κάθε σύνολο τιμών, την αντίστοιχη τιμή του μετρούμενου μεγέθους (η καθαρή παρούσα αξία) επαναλαμβάνοντας αυτή τη διαδικασία αρκετές φορές. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα σύνολο τιμών της καθαρής παρούσας αξίας, από την οποία είναι δυνατόν να υπολογιστεί η κατανομή συχνοτήτων και, κατά συνέπεια, να εκτιμώνται τα χαρακτηριστικά της κατανομής και η αβεβαιότητα που τη χαρακτηρίζει.

Τα αποτελέσματα της οικονομικής ανάλυσης έδειξαν ότι ο υβριδικός σχεδιασμός (τοπολογία 2) έχει τη μεγαλύτερη καθαρή παρούσα αξία, κυρίως λόγω της συμπληρωματικότητας του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού και της μειωμένης αβεβαιότητας του χρόνου ζωής των συσσωρευτών. Ακολουθεί η απευθείας σύνδεση της μονάδας ΑΩ με τη Φ/Β συστοιχία (τοπολογία 4), η οποία και κρίθηκε πιο κατάλληλη τεχνικά λόγω χαμηλότερης ειδικής κατανάλωσης ενέργειας και απλού σχεδιασμού.

## 6.7 Μελλοντικά πεδία έρευνας

- Η χρήση των μεμβρανών χαμηλής πίεσης (Low pressure Membranes) ή/και των μεμβρανών με μεγάλη αντοχή στη μόλυνση μπορεί να μειώσει την απαιτούμενη πίεση και κατά συνέπεια μείωση των ενεργειακών αναγκών και κόστος παραγωγής του νερού.
- Χρήση συσκευών ανάκτησης ενέργειας στις οποίες ο βαθμός απόδοσης ξεπερνά το 95% όπως οι αντλίες αξονικών εμβόλων της εταιρίας Danfoss. Το μόνο εμπόδιο στη χρήση τους είναι ότι το μικρότερο μέγεθος μονάδας αφαλάτωσης μεγαλύτερες των 15 m<sup>3</sup>/day. Άρα η χρήση τους περιορίζεται ακόμα σε μικρές και μεσαίου μεγέθους μονάδες αφαλάτωσης και όχι πολύ μικρές (μέχρι 15 m<sup>3</sup>/day).
- Η λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης σε τοπολογία μικροδικτύων εξασφαλίζει σταθερές συνθήκες λειτουργίας προστατεύοντας ταυτόχρονα τους συσσωρευτές λόγω μείωσης των αριθμών κύκλων φόρτισης εκφόρτισης.
- Χρήση τεχνολογιών βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα συστήματα ΑΠΕ, όπως η αποθήκευση υπό μορφή υδρογόνου ή η χρήση υπερ-πυκνωτών. Σημειώνεται εδώ ότι το κόστος παραγωγής του νερού σε αυτή την περίπτωση θα είναι το κριτήριο αποδοχής και απόρριψης της μεθόδου, παρόλο ότι η μέθοδος αυτή παρουσιάζει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον. Η χρήση δοχείου

αναστολής μπορεί να αποθηκεύει και να σταθεροποιήσει την πίεση εισόδου της μεμβράνης, στις τοπολογίες της απευθείας σύνδεσης.

- Η λεπτομερής μελέτη της διαχείρισης της άλμης και ο υπολογισμός του εξωτερικού κόστους στο περιβάλλον, καθώς και ο υπολογισμός του εξωτερικού κόστους που αποφεύχθηκε λόγω χρήσης των ΑΠΕ.
- Χρήση της εξεργειακής ανάλυσης του συστήματος επιτρέπει μια πιο λεπτομερή μελέτη της ενεργειακής συμπεριφοράς της μονάδας  $A\Omega$  και του συστήματος ΑΠΕ που της συνοδεύει.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΩ





SUBROUTINE TYPE265 (TIME,XIN,OUT,T,DTDT,PAR,INFO,ICNTRL,\*)

```

C*****
C Object: RO_Membrane
C Simulation Studio Model: Type265
C
C Author:
C Editor:
C Date: Αύγουστος 14, 2008 last modified: Αύγουστος 14, 2008
C
C
C ***
C *** Model Parameters
C ***
C           A      - [-Inf;+Inf]
C           b      - [-Inf;+Inf]
C           dp     BAR [-Inf;+Inf]
C           SR     - [-Inf;+Inf]
C           T0     C [-Inf;+Inf]
C
C ***
C *** Model Inputs
C ***
C           Ph     BAR [-Inf;+Inf]
C           Qh     kg/hr [-Inf;+Inf]
C           Cf     - [-Inf;+Inf]
C           T1     C [-Inf;+Inf]
C
C ***
C *** Model Outputs
C ***
C           Qp     kg/hr [-Inf;+Inf]
C           Pb     BAR [-Inf;+Inf]
C           Qb     kg/hr [-Inf;+Inf]
C           R      - [-Inf;+Inf]
C           Cp     - [-Inf;+Inf]
C           Cb     - [-Inf;+Inf]
C
C ***
C *** Model Derivatives
C ***
C (Comments and routine interface generated by TRNSYS Studio)
C*****
C  TRNSYS access functions (allow to access TIME etc.)
C    USE TrnsysConstants
C    USE TrnsysFunctions
C-----
C  REQUIRED BY THE MULTI-DLL VERSION OF TRNSYS
C    IDEC$ATTRIBUTES DLLEXPORT :: TYPE265          !SET THE CORRECT TYPE
C    NUMBER HERE
C-----
C  TRNSYS DECLARATIONS
C  IMPLICIT NONE                                !REQUIRES THE USER TO DEFINE ALL VARIABLES
C  BEFORE USING THEM
C
C  DOUBLE PRECISION XIN          !THE ARRAY FROM WHICH THE INPUTS TO THIS TYPE WILL BE
C  RETRIEVED

```

```

DOUBLE PRECISION OUT !THE ARRAY WHICH WILL BE USED TO STORE THE
OUTPUTS FROM THIS TYPE
DOUBLE PRECISION TIME !THE CURRENT SIMULATION TIME - YOU MAY USE THIS
VARIABLE BUT DO NOT SET IT!
DOUBLE PRECISION PAR !THE ARRAY FROM WHICH THE PARAMETERS FOR
THIS TYPE WILL BE RETRIEVED
DOUBLE PRECISION STORED !THE STORAGE ARRAY FOR HOLDING VARIABLES
FROM TIMESTEP TO TIMESTEP
DOUBLE PRECISION T !AN ARRAY CONTAINING THE RESULTS FROM THE
DIFFERENTIAL EQUATION SOLVER
DOUBLE PRECISION DTD T !AN ARRAY CONTAINING THE DERIVATIVES TO BE
PASSED TO THE DIFF.EQ. SOLVER
INTEGER*4 INFO(15) !THE INFO ARRAY STORES AND PASSES VALUABLE
INFORMATION TO AND FROM THIS TYPE
INTEGER*4 NP,NI,NOUT,ND !VARIABLES FOR THE MAXIMUM NUMBER OF
PARAMETERS,INPUTS,OUTPUTS AND DERIVATIVES
INTEGER*4 NPAR,NIN,NDER !VARIABLES FOR THE CORRECT NUMBER OF
PARAMETERS,INPUTS,OUTPUTS AND DERIVATIVES
INTEGER*4 IUNIT,ITYPE !THE UNIT NUMBER AND TYPE NUMBER FOR THIS
COMPONENT
INTEGER*4 ICNTRL !AN ARRAY FOR HOLDING VALUES OF CONTROL
FUNCTIONS WITH THE NEW SOLVER
INTEGER*4 NSTORED !THE NUMBER OF VARIABLES THAT WILL BE PASSED
INTO AND OUT OF STORAGE
CHARACTER*3 OCHECK !AN ARRAY TO BE FILLED WITH THE CORRECT
VARIABLE TYPES FOR THE OUTPUTS
CHARACTER*3 YCHECK !AN ARRAY TO BE FILLED WITH THE CORRECT
VARIABLE TYPES FOR THE INPUTS
C-----
C USER DECLARATIONS - SET THE MAXIMUM NUMBER OF PARAMETERS (NP), INPUTS (NI),
C OUTPUTS (NOUT), AND DERIVATIVES (ND) THAT MAY BE SUPPLIED FOR THIS TYPE
C PARAMETER (NP=5,NI=4,NOUT=6,ND=0,NSTORED=0)
C-----
C REQUIRED TRNSYS DIMENSIONS
C DIMENSION XIN(NI),OUT(NOUT),PAR(NP),YCHECK(NI),OCHECK(NOUT),
C 1 STORED(NSTORED),T(ND),DTD T(ND)
C INTEGER NITEMS
C-----
C ADD DECLARATIONS AND DEFINITIONS FOR THE USER-VARIABLES HERE

C PARAMETERS
DOUBLE PRECISION A
DOUBLE PRECISION b
DOUBLE PRECISION dp
DOUBLE PRECISION SR
DOUBLE PRECISION T0

C INPUTS
DOUBLE PRECISION Ph
DOUBLE PRECISION Qh
DOUBLE PRECISION Cf
DOUBLE PRECISION T1,Qp,TCF,Cb,Cp,Pb,R,Qb
C-----
C READ IN THE VALUES OF THE PARAMETERS IN SEQUENTIAL ORDER
A=PAR(1)
b=PAR(2)
dp=PAR(3)
SR=PAR(4)
T0=PAR(5)

```

C RETRIEVE THE CURRENT VALUES OF THE INPUTS TO THIS MODEL FROM THE XIN ARRAY IN SEQUENTIAL ORDER

```
Ph=XIN(1)
Qh=XIN(2)
Cf=XIN(3)
T1=XIN(4)
  IUNIT=INFO(1)
  ITYPE=INFO(2)
```

C SET THE VERSION INFORMATION FOR TRNSYS  
IF (INFO(7).EQ.-2) THEN  
 INFO(12)=16  
 RETURN 1  
ENDIF

C-----  
C DO ALL THE VERY LAST CALL OF THE SIMULATION MANIPULATIONS HERE  
IF (INFO(8).EQ.-1) THEN  
 RETURN 1  
ENDIF

C-----  
C PERFORM ANY 'AFTER-ITERATION' MANIPULATIONS THAT ARE REQUIRED HERE  
C e.g. save variables to storage array for the next timestep  
IF (INFO(13).GT.0) THEN  
 NITEMS=0  
 STORED(1)=... (if NITEMS > 0)  
 CALL setStorageVars(STORED,NITEMS,INFO)  
 RETURN 1  
ENDIF

C-----  
C DO ALL THE VERY FIRST CALL OF THE SIMULATION MANIPULATIONS HERE  
IF (INFO(7).EQ.-1) THEN

C SET SOME INFO ARRAY VARIABLES TO TELL THE TRNSYS ENGINE HOW THIS TYPE IS TO WORK  
 INFO(6)=NOUT  
 INFO(9)=1  
 INFO(10)=0 !STORAGE FOR VERSION 16 HAS BEEN CHANGED

C SET THE REQUIRED NUMBER OF INPUTS, PARAMETERS AND DERIVATIVES THAT THE USER SHOULD SUPPLY IN THE INPUT FILE

C IN SOME CASES, THE NUMBER OF VARIABLES MAY DEPEND ON THE VALUE OF PARAMETERS TO THIS MODEL....

```
NIN=NI
  NPAR=NP
  NDER=ND
```

C CALL THE TYPE CHECK SUBROUTINE TO COMPARE WHAT THIS COMPONENT REQUIRES TO WHAT IS SUPPLIED IN

C THE TRNSYS INPUT FILE  
 CALL TYPECK(1,INFO,NIN,NPAR,NDER)

C SET THE NUMBER OF STORAGE SPOTS NEEDED FOR THIS COMPONENT  
 NITEMS=0

C CALL setStorageSize(NITEMS,INFO)

C RETURN TO THE CALLING PROGRAM  
 RETURN 1

ENDIF

C-----  
C DO ALL OF THE INITIAL TIMESTEP MANIPULATIONS HERE - THERE ARE NO ITERATIONS AT THE INITIAL TIME

```

IF (TIME .LT. (getSimulationStartTime() +
.getSimulationTimeStep()/2.D0)) THEN

C   SET THE UNIT NUMBER FOR FUTURE CALLS
    IUNIT=INFO(1)
    ITYPE=INFO(2)

C   CHECK THE PARAMETERS FOR PROBLEMS AND RETURN FROM THE SUBROUTINE IF
AN ERROR IS FOUND
C   IF(...) CALL TYPECK(-4,INFO,0,"BAD PARAMETER #",0)

C   PERFORM ANY REQUIRED CALCULATIONS TO SET THE INITIAL VALUES OF THE
OUTPUTS HERE
C       Qp          OUT(1)=100
C       Pb          OUT(2)=50
C       Qb          OUT(3)=900
C       R           OUT(4)=0.1
C       Cp          OUT(5)=250
C       Cb          OUT(6)=40000

C   PERFORM ANY REQUIRED CALCULATIONS TO SET THE INITIAL STORAGE VARIABLES
HERE
    NITEMS=0
C   STORED(1)=...

C   PUT THE STORED ARRAY IN THE GLOBAL STORED ARRAY
C   CALL setStorageVars(STORED,NITEMS,INFO)

C   RETURN TO THE CALLING PROGRAM
    RETURN 1

ENDIF

C-----
C *** ITS AN ITERATIVE CALL TO THIS COMPONENT ***
C-----
C   RETRIEVE THE VALUES IN THE STORAGE ARRAY FOR THIS ITERATION
C   NITEMS=
C   CALL getStorageVars(STORED,NITEMS,INFO)
C   STORED(1)=
C-----
C   CHECK THE INPUTS FOR PROBLEMS
C   IF(...) CALL TYPECK(-3,INFO,'BAD INPUT #',0,0)
C   IF(IERROR.GT.0) RETURN 1
C-----
C *** PERFORM ALL THE CALCULATION HERE FOR THIS MODEL. ***
C-----

C   ADD YOUR COMPONENT EQUATIONS HERE; BASICALLY THE EQUATIONS
THAT WILL
C   CALCULATE THE OUTPUTS BASED ON THE PARAMETERS AND THE INPUTS.
REFER TO
C   CHAPTER 3 OF THE TRNSYS VOLUME 1 MANUAL FOR DETAILED
INFORMATION ON
C   WRITING TRNSYS COMPONENTS.

```

```

if (T1.GE.25) Then
TCF=EXP(2640/(T0+273.15))-2640/(T1+273.15))
else
TCF=EXP(3020/(T0+273.15))-3020/(T1+273.15))
endif

Qp=(A*Ph+b)*TCF
if (Qp .LT. 0) then
Qp=0
endif

if (Qh .EQ. 0) then
Qp=0
elseif (Ph .EQ. 0) then
Qp=0
endif

Pb=Ph-dP

Qb=Qh-Qp

R=Qp/Qh

Cb=Cf/1-(R)

! product salt concentration

Cp=Cf*(1-SR)*TCF*(55/(Ph+0.00001))
if (Cp .GT. 2000) then
Cp=2000
end if

```

```

C-----
C SET THE STORAGE ARRAY AT THE END OF THIS ITERATION IF NECESSARY
C NITEMS=
C STORED(1)=
C CALL setStorageVars(STORED,NITEMS,INFO)
C-----
C REPORT ANY PROBLEMS THAT HAVE BEEN FOUND USING CALLS LIKE THIS:
C CALL MESSAGES(-1,'put your message here','MESSAGE',IUNIT,ITYPE)
C CALL MESSAGES(-1,'put your message here','WARNING',IUNIT,ITYPE)
C CALL MESSAGES(-1,'put your message here','SEVERE',IUNIT,ITYPE)
C CALL MESSAGES(-1,'put your message here','FATAL',IUNIT,ITYPE)
C-----
C SET THE OUTPUTS FROM THIS MODEL IN SEQUENTIAL ORDER AND GET OUT
C      Qp      OUT(1)=Qp
C      Pb      OUT(2)=Pb
C      Qb      OUT(3)=Qb
C      R       OUT(4)=R
C      Cp      OUT(5)=Cp
C      Cb      OUT(6)=Cb
C-----
C EVERYTHING IS DONE - RETURN FROM THIS SUBROUTINE AND MOVE ON
C RETURN 1
C END
C-----

```



**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ**





SUBROUTINE TYPE280 (TIME,XIN,OUT,T,DTDT,PAR,INFO,ICNTRL,\*)

```

C*****
C Object: Motor pump assembly
C Simulation Studio Model: Type280
C
C Author:
C Editor:
C Date: March 17, 2008 last modified: March 17, 2008
C
C
C ***
C *** Model Parameters
C ***
C           A1      - [-Inf;+Inf]
C           A2      - [-Inf;+Inf]
C           A3      - [-Inf;+Inf]
C           B1      - [-Inf;+Inf]
C           B2      - [-Inf;+Inf]
C           B3      - [-Inf;+Inf]
C
C ***
C *** Model Inputs
C ***
C           P       W [-Inf;+Inf]
C
C ***
C *** Model Outputs
C ***
C           Pf      BAR [-Inf;+Inf]
C           Qf      kg/hr [-Inf;+Inf]
C
C ***
C *** Model Derivatives
C ***
C (Comments and routine interface generated by TRNSYS Studio)
C*****
C  TRNSYS access functions (allow to access TIME etc.)
C  USE TrnsysConstants
C  USE TrnsysFunctions
C-----
C  REQUIRED BY THE MULTI-DLL VERSION OF TRNSYS
C  !DEC$ATTRIBUTES DLLEXPORT :: TYPE280                !SET      THE
CORRECT TYPE NUMBER HERE
C-----
C  TRNSYS DECLARATIONS
C  IMPLICIT NONE                !REQUIRES THE USER TO DEFINE ALL VARIABLES
BEFORE USING THEM
C
C          DOUBLE PRECISION XIN    !THE ARRAY FROM WHICH THE INPUTS TO THIS TYPE
WILL BE RETRIEVED
C          DOUBLE PRECISION OUT    !THE ARRAY WHICH WILL BE USED TO STORE THE
OUTPUTS FROM THIS TYPE
C          DOUBLE PRECISION TIME   !THE CURRENT SIMULATION TIME - YOU MAY USE THIS
VARIABLE BUT DO NOT SET IT!
C          DOUBLE PRECISION PAR    !THE ARRAY FROM WHICH THE PARAMETERS FOR
THIS TYPE WILL BE RETRIEVED
C          DOUBLE PRECISION STORED !THE STORAGE ARRAY FOR HOLDING VARIABLES
FROM TIMESTEP TO TIMESTEP

```

```

      DOUBLE PRECISION T      !AN ARRAY CONTAINING THE RESULTS FROM THE
DIFFERENTIAL EQUATION SOLVER
      DOUBLE PRECISION DTD T !AN ARRAY CONTAINING THE DERIVATIVES TO BE
PASSED TO THE DIFF.EQ. SOLVER
      INTEGER*4 INFO(15)     !THE INFO ARRAY STORES AND PASSES VALUABLE
INFORMATION TO AND FROM THIS TYPE
      INTEGER*4 NP,NI,NOUT,ND !VARIABLES FOR THE MAXIMUM NUMBER OF
PARAMETERS,INPUTS,OUTPUTS AND DERIVATIVES
      INTEGER*4 NPAR,NIN,NDER !VARIABLES FOR THE CORRECT NUMBER OF
PARAMETERS,INPUTS,OUTPUTS AND DERIVATIVES
      INTEGER*4 IUNIT,ITYPE  !THE UNIT NUMBER AND TYPE NUMBER FOR THIS
COMPONENT
      INTEGER*4 ICNTRL       !AN ARRAY FOR HOLDING VALUES OF CONTROL
FUNCTIONS WITH THE NEW SOLVER
      INTEGER*4 NSTORED     !THE NUMBER OF VARIABLES THAT WILL BE PASSED
INTO AND OUT OF STORAGE
      CHARACTER*3 OCHECK    !AN ARRAY TO BE FILLED WITH THE CORRECT
VARIABLE TYPES FOR THE OUTPUTS
      CHARACTER*3 YCHECK    !AN ARRAY TO BE FILLED WITH THE CORRECT
VARIABLE TYPES FOR THE INPUTS
C-----
C  USER DECLARATIONS - SET THE MAXIMUM NUMBER OF PARAMETERS (NP), INPUTS (NI),
C  OUTPUTS (NOUT), AND DERIVATIVES (ND) THAT MAY BE SUPPLIED FOR THIS TYPE
C  PARAMETER (NP=6,NI=1,NOUT=2,ND=0,NSTORED=0)
C-----
C  REQUIRED TRNSYS DIMENSIONS
C  DIMENSION XIN(NI),OUT(NOUT),PAR(NP),YCHECK(NI),OCHECK(NOUT),
C  1 STORED(NSTORED),T(ND),DTD T(ND)
C  INTEGER NITEMS
C-----
C  ADD DECLARATIONS AND DEFINITIONS FOR THE USER-VARIABLES HERE

C  PARAMETERS
DOUBLE PRECISION A1
DOUBLE PRECISION A2
DOUBLE PRECISION A3
DOUBLE PRECISION B1
DOUBLE PRECISION B2
DOUBLE PRECISION B3

C  INPUTS
DOUBLE PRECISION P,Pf,Qf
C-----
C  READ IN THE VALUES OF THE PARAMETERS IN SEQUENTIAL ORDER
A1=PAR(1)
A2=PAR(2)
A3=PAR(3)
B1=PAR(4)
B2=PAR(5)
B3=PAR(6)
C-----
C  RETRIEVE THE CURRENT VALUES OF THE INPUTS TO THIS MODEL FROM THE XIN
ARRAY IN SEQUENTIAL ORDER

P=XIN(1)
IUNIT=INFO(1)
ITYPE=INFO(2)
C-----
C  SET THE VERSION INFORMATION FOR TRNSYS

```

```

IF(INFO(7).EQ.-2) THEN
  INFO(12)=16
  RETURN 1
ENDIF
C-----
C DO ALL THE VERY LAST CALL OF THE SIMULATION MANIPULATIONS HERE
IF (INFO(8).EQ.-1) THEN
  RETURN 1
ENDIF
C-----
C PERFORM ANY 'AFTER-ITERATION' MANIPULATIONS THAT ARE REQUIRED HERE
C e.g. save variables to storage array for the next timestep
IF (INFO(13).GT.0) THEN
  NITEMS=0
C   STORED(1)=... (if NITEMS > 0)
C   CALL setStorageVars(STORED,NITEMS,INFO)
  RETURN 1
ENDIF
C-----
C DO ALL THE VERY FIRST CALL OF THE SIMULATION MANIPULATIONS HERE
IF (INFO(7).EQ.-1) THEN

C   SET SOME INFO ARRAY VARIABLES TO TELL THE TRNSYS ENGINE HOW THIS TYPE IS
TO WORK
  INFO(6)=NOUT
  INFO(9)=1
  INFO(10)=0 !STORAGE FOR VERSION 16 HAS BEEN CHANGED

C   SET THE REQUIRED NUMBER OF INPUTS, PARAMETERS AND DERIVATIVES THAT THE
USER SHOULD SUPPLY IN THE INPUT FILE
C   IN SOME CASES, THE NUMBER OF VARIABLES MAY DEPEND ON THE VALUE OF
PARAMETERS TO THIS MODEL....
  NIN=NI
  NPAR=NP
  NDER=ND

C   CALL THE TYPE CHECK SUBROUTINE TO COMPARE WHAT THIS COMPONENT
REQUIRES TO WHAT IS SUPPLIED IN
C   THE TRNSYS INPUT FILE
  CALL TYPECK(1,INFO,NIN,NPAR,NDER)
C   SET THE NUMBER OF STORAGE SPOTS NEEDED FOR THIS COMPONENT
  NITEMS=0
C   CALL setStorageSize(NITEMS,INFO)

C   RETURN TO THE CALLING PROGRAM
  RETURN 1

ENDIF
C-----
C DO ALL OF THE INITIAL TIMESTEP MANIPULATIONS HERE - THERE ARE NO ITERATIONS
AT THE INITIAL TIME
IF (TIME .LT. (getSimulationStartTime() +
. getSimulationTimeStep()/2.D0)) THEN

C   SET THE UNIT NUMBER FOR FUTURE CALLS
  IUNIT=INFO(1)
  ITYPE=INFO(2)

```

```

C   CHECK THE PARAMETERS FOR PROBLEMS AND RETURN FROM THE SUBROUTINE IF
AN ERROR IS FOUND
C   IF(...) CALL TYPECK(-4,INFO,0,"BAD PARAMETER #",0)

C   PERFORM ANY REQUIRED CALCULATIONS TO SET THE INITIAL VALUES OF THE
OUTPUTS HERE
C   Pf
      OUT(1)=10
C   Qf
      OUT(2)=1000

C   PERFORM ANY REQUIRED CALCULATIONS TO SET THE INITIAL STORAGE VARIABLES
HERE
C   NITEMS=0
C   STORED(1)=...

C   PUT THE STORED ARRAY IN THE GLOBAL STORED ARRAY
C   CALL setStorageVars(STORED,NITEMS,INFO)

C   RETURN TO THE CALLING PROGRAM
RETURN 1

ENDIF

C-----
C *** ITS AN ITERATIVE CALL TO THIS COMPONENT ***
C-----
C RETRIEVE THE VALUES IN THE STORAGE ARRAY FOR THIS ITERATION
C NITEMS=
C   CALL getStorageVars(STORED,NITEMS,INFO)
C   STORED(1)=
C-----
C-----
C CHECK THE INPUTS FOR PROBLEMS
C IF(...) CALL TYPECK(-3,INFO,'BAD INPUT #',0,0)
C   IF(IERROR.GT.0) RETURN 1
C-----
C-----
C *** PERFORM ALL THE CALCULATION HERE FOR THIS MODEL. ***
C-----

C   ADD YOUR COMPONENT EQUATIONS HERE; BASICALLY THE EQUATIONS
THAT WILL
C   CALCULATE THE OUTPUTS BASED ON THE PARAMETERS AND THE INPUTS.
REFER TO
C   CHAPTER 3 OF THE TRNSYS VOLUME 1 MANUAL FOR DETAILED
INFORMATION ON
C   WRITING TRNSYS COMPONENTS.

      Pf=A1*P*P+A2*P+A3
      if (Pf .lt. 0) then
      Pf=0
      endif
      Qf=B1*P*P+B2*P+B3
      if (Qf .lt. 0) then
      Qf=0
      endif

C-----
C SET THE STORAGE ARRAY AT THE END OF THIS ITERATION IF NECESSARY
C NITEMS=
C STORED(1)=

```

```

C      CALL setStorageVars(STORED,NITEMS,INFO)
C-----
C-----
C      REPORT ANY PROBLEMS THAT HAVE BEEN FOUND USING CALLS LIKE THIS:
C      CALL MESSAGES(-1,'put your message here','MESSAGE',IUNIT,ITYPE)
C      CALL MESSAGES(-1,'put your message here','WARNING',IUNIT,ITYPE)
C      CALL MESSAGES(-1,'put your message here','SEVERE',IUNIT,ITYPE)
C      CALL MESSAGES(-1,'put your message here','FATAL',IUNIT,ITYPE)
C-----
C-----
C      SET THE OUTPUTS FROM THIS MODEL IN SEQUENTIAL ORDER AND GET OUT
C          Pf          OUT(1)=Pf
C          Qf          OUT(2)=Qf
C-----
C      EVERYTHING IS DONE - RETURN FROM THIS SUBROUTINE AND MOVE ON
C      RETURN 1
C      END
C-----

```



## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3: ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ CLARK**





SUBROUTINE TYPE270 (TIME,XIN,OUT,T,DTDT,PAR,INFO,ICNTRL,\*)

```

C*****
C Object: Clarck pump
C Simulation Studio Model: Type270
C
C Author: Essam Mohamed
C Editor:
C Date: March 02, 2008 last modified: March 02, 2008
C
C
C ***
C *** Model Parameters
C ***
C          dQ    kg/hr [0;+Inf]
C          dP    BAR [0;+Inf]
C          R     - [0;1]
C          Pe    BAR [0;+Inf]
C
C ***
C *** Model Inputs
C ***
C          Qf    kg/hr [0;1500]
C          Pf    BAR [0;20]
C          Qc    kg/hr [0;1500]
C          Pc    BAR [0;70]
C
C ***
C *** Model Outputs
C ***
C          Qh    kg/hr [0;1500]
C          Ph    BAR [0;70]
C          Qe    kg/hr [0;1500]
C
C ***
C *** Model Derivatives
C ***
C (Comments and routine interface generated by TRNSYS Studio)
C*****
C  TRNSYS access functions (allow to access TIME etc.)
C  USE TrnsysConstants
C  USE TrnsysFunctions
C-----
C  REQUIRED BY THE MULTI-DLL VERSION OF TRNSYS
C  !DEC$ATTRIBUTES DLLEXPORT :: TYPE270                !SET      THE
CORRECT TYPE NUMBER HERE
C-----
C  TRNSYS DECLARATIONS
C  IMPLICIT NONE                !REQUIRES THE USER TO DEFINE ALL VARIABLES
BEFORE USING THEM
C
C          DOUBLE PRECISION XIN    !THE ARRAY FROM WHICH THE INPUTS TO THIS TYPE
WILL BE RETRIEVED
C          DOUBLE PRECISION OUT    !THE ARRAY WHICH WILL BE USED TO STORE THE
OUTPUTS FROM THIS TYPE
C          DOUBLE PRECISION TIME   !THE CURRENT SIMULATION TIME - YOU MAY USE THIS
VARIABLE BUT DO NOT SET IT!
C          DOUBLE PRECISION PAR    !THE ARRAY FROM WHICH THE PARAMETERS FOR
THIS TYPE WILL BE RETRIEVED

```

```

DOUBLE PRECISION STORED !THE STORAGE ARRAY FOR HOLDING VARIABLES
FROM TIMESTEP TO TIMESTEP
DOUBLE PRECISION T      !AN ARRAY CONTAINING THE RESULTS FROM THE
DIFFERENTIAL EQUATION SOLVER
DOUBLE PRECISION DTD T !AN ARRAY CONTAINING THE DERIVATIVES TO BE
PASSED TO THE DIFF.EQ. SOLVER
INTEGER*4 INFO(15)      !THE INFO ARRAY STORES AND PASSES VALUABLE
INFORMATION TO AND FROM THIS TYPE
INTEGER*4 NP,NI,NOUT,ND !VARIABLES FOR THE MAXIMUM NUMBER OF
PARAMETERS,INPUTS,OUTPUTS AND DERIVATIVES
INTEGER*4 NPAR,NIN,NDER !VARIABLES FOR THE CORRECT NUMBER OF
PARAMETERS,INPUTS,OUTPUTS AND DERIVATIVES
INTEGER*4 IUNIT,ITYPE   !THE UNIT NUMBER AND TYPE NUMBER FOR THIS
COMPONENT
INTEGER*4 ICNTRL        !AN ARRAY FOR HOLDING VALUES OF CONTROL
FUNCTIONS WITH THE NEW SOLVER
INTEGER*4 NSTORED       !THE NUMBER OF VARIABLES THAT WILL BE PASSED
INTO AND OUT OF STORAGE
CHARACTER*3 OCHECK      !AN ARRAY TO BE FILLED WITH THE CORRECT
VARIABLE TYPES FOR THE OUTPUTS
CHARACTER*3 YCHECK      !AN ARRAY TO BE FILLED WITH THE CORRECT
VARIABLE TYPES FOR THE INPUTS
C-----
C  USER DECLARATIONS - SET THE MAXIMUM NUMBER OF PARAMETERS (NP), INPUTS (NI),
C  OUTPUTS (NOUT), AND DERIVATIVES (ND) THAT MAY BE SUPPLIED FOR THIS TYPE
C  PARAMETER (NP=4,NI=4,NOUT=3,ND=0,NSTORED=0)
C-----
C  REQUIRED TRNSYS DIMENSIONS
C  DIMENSION XIN(NI),OUT(NOUT),PAR(NP),YCHECK(NI),OCHECK(NOUT),
C  1 STORED(NSTORED),T(ND),DTD(T(ND))
C  INTEGER NITEMS
C-----
C  ADD DECLARATIONS AND DEFINITIONS FOR THE USER-VARIABLES HERE

C  PARAMETERS
DOUBLE PRECISION dQ
DOUBLE PRECISION dP
DOUBLE PRECISION R
DOUBLE PRECISION Pe

C  INPUTS
DOUBLE PRECISION Qf
DOUBLE PRECISION Pf
DOUBLE PRECISION Qc
DOUBLE PRECISION Pc,Ph

C-----
C  READ IN THE VALUES OF THE PARAMETERS IN SEQUENTIAL ORDER
C  dQ=PAR(1)
C  dP=PAR(2)
C  R=PAR(3)
C  Pe=PAR(4)
C-----
C  RETRIEVE THE CURRENT VALUES OF THE INPUTS TO THIS MODEL FROM THE XIN
C  ARRAY IN SEQUENTIAL ORDER

C  Qf=XIN(1)
C  Pf=XIN(2)
C  Qc=XIN(3)

```

```

Pc=XIN(4)
  IUNIT=INFO(1)
  ITYPE=INFO(2)
C-----
C  SET THE VERSION INFORMATION FOR TRNSYS
  IF(INFO(7).EQ.-2) THEN
    INFO(12)=16
    RETURN 1
  ENDIF
C-----
C-----
C  DO ALL THE VERY LAST CALL OF THE SIMULATION MANIPULATIONS HERE
  IF (INFO(8).EQ.-1) THEN
    RETURN 1
  ENDIF
C-----
C  PERFORM ANY 'AFTER-ITERATION' MANIPULATIONS THAT ARE REQUIRED HERE
C  e.g. save variables to storage array for the next timestep
  IF (INFO(13).GT.0) THEN
    NITEMS=0
  C    STORED(1)=... (if NITEMS > 0)
  C    CALL setStorageVars(STORED,NITEMS,INFO)
    RETURN 1
  ENDIF
C
C-----
C  DO ALL THE VERY FIRST CALL OF THE SIMULATION MANIPULATIONS HERE
  IF (INFO(7).EQ.-1) THEN

C    SET SOME INFO ARRAY VARIABLES TO TELL THE TRNSYS ENGINE HOW THIS TYPE IS
  TO WORK
    INFO(6)=NOUT
    INFO(9)=1
    INFO(10)=0  !STORAGE FOR VERSION 16 HAS BEEN CHANGED

C    SET THE REQUIRED NUMBER OF INPUTS, PARAMETERS AND DERIVATIVES THAT THE
  USER SHOULD SUPPLY IN THE INPUT FILE
  C    IN SOME CASES, THE NUMBER OF VARIABLES MAY DEPEND ON THE VALUE OF
  PARAMETERS TO THIS MODEL....
    NIN=NI
    NPAR=NP
    NDER=ND

C    CALL THE TYPE CHECK SUBROUTINE TO COMPARE WHAT THIS COMPONENT
  REQUIRES TO WHAT IS SUPPLIED IN
  C    THE TRNSYS INPUT FILE
    CALL TYPECK(1,INFO,NIN,NPAR,NDER)

C    SET THE NUMBER OF STORAGE SPOTS NEEDED FOR THIS COMPONENT
    NITEMS=0
  C    CALL setStorageSize(NITEMS,INFO)

C    RETURN TO THE CALLING PROGRAM
    RETURN 1

  ENDIF
C-----

```

```

C DO ALL OF THE INITIAL TIMESTEP MANIPULATIONS HERE - THERE ARE NO ITERATIONS
AT THE INITIAL TIME
  IF (TIME .LT. (getSimulationStartTime() +
    . getSimulationTimeStep()/2.D0)) THEN

C SET THE UNIT NUMBER FOR FUTURE CALLS
  IUNIT=INFO(1)
  ITYPE=INFO(2)

C CHECK THE PARAMETERS FOR PROBLEMS AND RETURN FROM THE SUBROUTINE IF
AN ERROR IS FOUND
C IF(...) CALL TYPECK(-4,INFO,0,"BAD PARAMETER #",0)

C PERFORM ANY REQUIRED CALCULATIONS TO SET THE INITIAL VALUES OF THE
OUTPUTS HERE
C Qh OUT(1)=1000
C Ph OUT(2)=60
C Qe OUT(3)=900

C PERFORM ANY REQUIRED CALCULATIONS TO SET THE INITIAL STORAGE VARIABLES
HERE
  NITEMS=0
C STORED(1)=...

C PUT THE STORED ARRAY IN THE GLOBAL STORED ARRAY
C CALL setStorageVars(STORED,NITEMS,INFO)

C RETURN TO THE CALLING PROGRAM
RETURN 1

ENDIF

C-----
C *** ITS AN ITERATIVE CALL TO THIS COMPONENT ***
C-----
C RETRIEVE THE VALUES IN THE STORAGE ARRAY FOR THIS ITERATION
C NITEMS=
C CALL getStorageVars(STORED,NITEMS,INFO)
C STORED(1)=
C-----
C CHECK THE INPUTS FOR PROBLEMS
C IF(...) CALL TYPECK(-3,INFO,'BAD INPUT #',0,0)
C IF(IERROR.GT.0) RETURN 1
C-----
C *** PERFORM ALL THE CALCULATION HERE FOR THIS MODEL. ***
C-----

C ADD YOUR COMPONENT EQUATIONS HERE; BASICALLY THE EQUATIONS
THAT WILL
C CALCULATE THE OUTPUTS BASED ON THE PARAMETERS AND THE INPUTS.
REFER TO
C CHAPTER 3 OF THE TRNSYS VOLUME 1 MANUAL FOR DETAILED
INFORMATION ON
C WRITING TRNSYS COMPONENTS.

Ph=(Pf+(Pc*(1-R))-(Pe*(1-R))-dP)
if (Ph .GT. 65) then
Ph=65

```

```

elseif (Ph .LT. 0) then
  Ph=0
endif
C-----
C SET THE STORAGE ARRAY AT THE END OF THIS ITERATION IF NECESSARY
C NITEMS=
C STORED(1)=
C CALL setStorageVars(STORED,NITEMS,INFO)
C-----
C-----
C REPORT ANY PROBLEMS THAT HAVE BEEN FOUND USING CALLS LIKE THIS:
C CALL MESSAGES(-1,'put your message here','MESSAGE',IUNIT,ITYPE)
C CALL MESSAGES(-1,'put your message here','WARNING',IUNIT,ITYPE)
C CALL MESSAGES(-1,'put your message here','SEVERE',IUNIT,ITYPE)
C CALL MESSAGES(-1,'put your message here','FATAL',IUNIT,ITYPE)
C-----
C-----
C SET THE OUTPUTS FROM THIS MODEL IN SEQUENTIAL ORDER AND GET OUT
C
C      Qh      OUT(1)=Qf-dQ
C      Ph      OUT(2)=Ph
C      Qe      OUT(3)=Qc-dQ
C-----
C EVERYTHING IS DONE - RETURN FROM THIS SUBROUTINE AND MOVE ON
  RETURN 1
  END
C-----

```



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4: ΜΟΝΤΕΛΟ MONTE CARLO





```

Sub MonteCarlo()
' MonteCarlo Macro
' Macro recorded 7/6/2008 by ESSAM
' Keyboard Shortcut: Ctrl+e
Dim imax As Integer
Dim ival As Integer
imax = Workbooks("costingMay28.xls").Worksheets("sheet3").Cells(1, "a")
umax = imax
Dim inte, npv, npve(), maxnpv, price
ReDim npve(imax)
For u = 1 To umax
For i = 1 To imax
    npv = Workbooks("costingMay28.xls").Worksheets("sheet3").Cells(3, "m").Value
    Workbooks("costingMay28.xls").Worksheets("sheet3").Cells(i + 1, "o").Value = npv
Next
    Workbooks("costingMay28.xls").Worksheets("sheet3").Cells(u + 1, "p").Formula = _
    "=average(l" + CStr(2) + ":o" + CStr(imax + 1) + ")"
    nn = Workbooks("costingMay28.xls").Worksheets("sheet3").Cells(u + 1, "p").Value
    Workbooks("costingMay28.xls").Worksheets("sheet3").Cells(u + 1, "p").Value = nn
Next
    Workbooks("costingMay28.xls").Worksheets("sheet3").Cells(2, "q").Formula = _
    "=max(p" + CStr(2) + ":p" + CStr(1 + imax) + ")"
    Workbooks("costingMay28.xls").Worksheets("sheet3").Cells(3, "q").Formula = _
    "=min(p" + CStr(2) + ":p" + CStr(1 + imax) + ")"
    Workbooks("costingMay28.xls").Worksheets("sheet3").Cells(2, "r").Value = "max"
    Workbooks("costingMay28.xls").Worksheets("sheet3").Cells(3, "r").Value = "min"
    maxi = Workbooks("costingMay28.xls").Worksheets("sheet3").Cells(2, "q").Value
    mini = Workbooks("costingMay28.xls").Worksheets("sheet3").Cells(3, "q").Value
    Workbooks("costingMay28.xls").Worksheets("sheet3").Cells(2, "s").Value = mini
    imaxx = imax / 2
    inte = (maxi - mini) / imaxx
    For j = 1 To imaxx - 1
        mini = mini + inte
        Workbooks("costingMay28.xls").Worksheets("sheet3").Cells(1 + j, "s").Value = mini + inte
    Next
    Workbooks("costingMay28.xls").Worksheets("sheet3").Cells(2, "n").Value = maxnpv
    Workbooks("costingMay28.xls").Worksheets("sheet3").Cells(2, "p").Resize(rowsize:=i - 1,
    columnsize:=1).Select
    Set selarea = Selection
    ActiveWorkbook.Names.Add Name:="freq", RefersToR1C1:=selarea
End Sub

```



## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- A. Colangelo, D. M., G. Spagna and V. k. Sharma (1999), Photovoltaic powered reverse osmosis sea-water desalination systems, *Applied Energy*, 64, 289-305.
- Abdul-Fattah, A. F. (1987), Use of low grade in driving small freezing units for desalination, *Desalination*, 61, 169.
- Ackermann, T., and L. Söder (2000), Wind energy technology and current status: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 315.
- Adiga, M. R., S. K. Adhikary, P. K. Narayanan, W. P. Harkare, S. D. Gomkale, and K. P. Govindan (1987), Performance analysis of photovoltaic electro dialysis desalination plant at Tanote in Thar desert, *Desalination*, 67, 59.
- Agha, K. R. (2009), The thermal characteristics and economic analysis of a solar pond coupled low temperature multi stage desalination plant, *Solar Energy*, 83, 501.
- Ahmed, M. I., M. Hrairi, and A. F. Ismail (2009), On the characteristics of multistage evacuated solar distillation, *Renewable Energy*, 34, 1471.
- Al-Mutaz, I. S. (2003), Coupling of a nuclear reactor to hybrid RO-MSF desalination plants, *Desalination*, 157, 259.
- Al Suleimani, Z., and N. R. Rao (2000), Wind-powered electric water-pumping system installed in a remote location, *Applied Energy*, 65, 339.
- Ali, E., K. Alhumaizi, and A. Ajbar (1999), Model reduction and robust control of multi-stage flash (MSF) desalination plants, *Desalination*, 121, 65.
- Aly, N. H., and M. A. Marwan (1995), Dynamic behavior of MSF desalination plants, *Desalination*, 101, 287.
- Ameri, M., S. S. Mohammadi, M. Hosseini, and M. Seifi (2009), Effect of design parameters on multi-effect desalinationsystem specifications, *Desalination*, 245, 266.
- Andujar, J. M. (1991), IDM - Project: Results of One Year of Operation, paper presented at *New Technologies for the Use of Renewable Energy Sources in Water Desalination*, Athens - Greece, September 26-28, pp. 56-80.
- Aybar, H. S. (2002), Analysis of a mechanical vapor compression desalination system, *Desalination*, 142, 181.
- Badran, A. A., I. A. Al-Hallaq, I. A. Eyal Salman, and M. Z. Odat (2005), A solar still augmented with a flat-plate collector, *Desalination*, 172, 227.

- Badran, O. O., and H. A. Al-Tahaine (2005), The effect of coupling a flat-plate collector on the solar still productivity, *Desalination*, 183, 137.
- Bahar, R., M. N. A. Hawlader, and L. S. Woei (2004), Performance evaluation of a mechanical vapor compression desalination system, *Desalination*, 166, 123.
- Banasiak, L. J., T. W. Kruttschnitt, and A. I. Schäfer (2007), Desalination using electro dialysis as a function of voltage and salt concentration, *Desalination*, 205, 38.
- Banat, F., and N. Jwaied (2008), Exergy analysis of desalination by solar-powered membrane distillation units, *Desalination*, 230, 27.
- 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.
- Bermudez-Contreras, A., M. Thomson, and D. G. Infield (2008), Renewable energy powered desalination in Baja California Sur, Mexico, *Desalination*, 220, 431.
- Bezir, N. Ç., O. Dönmez, R. Kayali, and N. Özek (2008), Numerical and experimental analysis of a salt gradient solar pond performance with or without reflective covered surface, *Applied Energy*, 85, 1102.
- Blanco Gálvez, J., L. García-Rodríguez, and I. Martín-Mateos (2009), Seawater desalination by an innovative solar-powered membrane distillation system: the MEDESOL project, *Desalination*, 246, 567.
- Bond, L. J., N. Aftab, B. R. Clayton, A. G. Dutton, A. D. Irving, and N. H. Lipman (1994), Condition monitoring techniques for composite wind turbine blades: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Brunswick, Maine (United States), 28 Jul.- 2 Aug. 1991), Vol. 11B, pp. 1647-1654. Edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti. Plenum Press (1992), *NDT & E International*, 27, 210.
- Bouguecha, S., and M. Dhahbi (2003), Fluidised bed crystalliser and air gap membrane distillation as a solution to geothermal water desalination, *Desalination*, 152, 237.
- Bourouni, K., J. C. Deronzier, and L. Tadrist (1999a), Experimentation and modelling of an innovative geothermal desalination unit, *Desalination*, 125, 147.
- Bourouni, K., R. Martin, and L. Tadrist (1999b), Analysis of heat transfer and evaporation in geothermal desalination units, *Desalination*, 122, 301.

- Brauns, E. (2008), Towards a worldwide sustainable and simultaneous large-scale production of renewable energy and potable water through salinity gradient power by combining reversed electrodialysis and solar power? *Desalination*, 219, 312.
- Cabassud, C., and D. Wirth (2003), Membrane distillation for water desalination: How to chose an appropriate membrane? *Desalination*, 157, 307.
- Carta, J. A., J. González, and V. Subiela (2003), Operational analysis of an innovative wind powered reverse osmosis system installed in the Canary Islands, *Solar Energy*, 75, 153.
- Cheng, C. Y., W. C. Cheng, and M. D. Yang (1987), The vacuum freezing multiple phase transformation process, *Desalination*, 67, 139.
- Coutelle, R., D. Kowalczyk, and U. Plantikow (1991), Seawater desalination by wind-powered mechanical vapour compression plants., paper presented at *Seminar on New Technologies for the Use of Renewable Energies in Water Desalination*, Athens - Greece, 26-28 September, pp. 49-64.
- Crerar, A. J., R. E. Low, and C. L. Pritchard (1987), Wave powered desalination, *Desalination*, 67, 127.
- Cruz, I., L. Arribas, A. Gonzalez, and R. Calero (1996), Hybrid Wind Diesel System for a village in the Canary Islands: Operation Results and Conclusions, paper presented at *European Union Wind Energy Conference*, Goteborg - Sweden, 20-24 May, pp. 398-401.
- Cuoco, D., and H. Liu (2006), An analysis of Value at Risk based capital requirements, *Journal of Financial Intermediation*, 15, 362-394.
- Dalili, N., A. Edrisy, and R. Carriveau (2009), A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 428.
- Damy, G., and J. Marvaldi (1987), Some investigations on the possibility of using ocean thermal gradient (OTG) for seawater desalination, *Desalination*, 67, 197.
- Danfoss (2006), *Danfoss high pressure pumps for RO systems*, <http://www.danfoss.com/Solutions/Reverse+Osmosis/ProductGroups/HighPressurePumps.htm>, (Access date: June 2006).
- Diawara, C.K., S.M. Lô, M.Rumeau, M.Pontie, and O.Sarr (2003), A phenomenological mass transfer approach in nanofiltration of halide ions for a selective defluorination of brackish drinking water, *Journal of Membrane Science*, 219, 103.

- DOW (2004), *FILMTEC Membranes Design Equations and Parameters*, <http://www.dow.com/>, (Access date: 2/5/2004).
- Dupont (1992), *Permasep Products Engineering Manual*, Wilmington.
- El-Dessouky, H. T. A. (1989), Humidification-dehumidification desalination process using waste heat from a gas turbine, *Desalination*, 71, 19.
- El-Nashar, A. M. (2009), Seasonal effect of dust deposition on a field of evacuated tube collectors on the performance of a solar desalination plant, *Desalination*, 239, 66.
- El-Nashar, A. M., and M. Samad (1996), A Solar Assisted Sea Water Multiple effect Distillation Plant - 10 years of Operating Performance, paper presented at *Mediterranean Conference on Renewable Energy*, Santorini - Greece, 10-12 June, pp. 62-72, ISBN 960-90557-0-2.
- EU (2007), *ADIRA Handbook: A guide to autonomous desalination system concepts*, ISBN 978-975-561-311-6, Istanbul - Turkey.
- Fath, H. E. S., S. M. Elsherbiny, A. A. Hassan, M. Rommel, M. Wieghaus, J. Koschikowski, and M. Vatansever (2008), PV and thermally driven small-scale, stand-alone solar desalination systems with very low maintenance needs, *Desalination*, 225, 58.
- Fedco (2009), *HPB turbo charger*, <http://www.fedco-usa.com/>, (Access date: March 2009).
- Fleming, P. D., and S. D. Probert (1982), Sail-type wind-turbines: A review and annotated bibliography, *Applied Energy*, 10, 273.
- Fleming, P. D., and S. D. Probert (1984a), The evolution of wind-turbines: An historical review, *Applied Energy*, 18, 163.
- Fleming, P. D., and S. D. Probert (1984b), Flexible sail wind-turbines: Review of pertinent theoretical analyses, *Applied Energy*, 18, 89.
- Fournier, J., J. L. Grange, and S. Vergara (1974), Water desalination by natural freezing, *Desalination*, 15, 167.
- Gang, L. (2005), A study of Value at Risk Models and Their Prediction Power, M. Phil thesis, The University of Hong Kong.
- Garcia-Rodriguez, L. (2003), Renewable energy applications in desalination: state of the art, *Solar Energy*, 75, 381-393.

- Gilley, J. R., D. L. Martin, and R. N. Clark (1985), Potential use of wind power for pumping irrigation water, *Energy in Agriculture*, 4, 133.
- Ginde, V. R., and C. Chieh (1972), An apparatus for desalination with ion exchange resins, *Desalination*, 10, 309.
- Gong, Y., L.-M. Dai, X.-L. Wang, and L.-X. Yu (2006), Effects of transport properties of ion-exchange membranes on desalination of 1,3-propanediol fermentation broth by electro dialysis, *Desalination*, 191, 193.
- Gonzalez, A. (1993), Wind energy Desalination project in Fuerteventura., paper presented at *Water treatment with renewable energy.*, CIEMAT - Madrid, 2- 4 June, pp.
- Grundfos (2009), *Grundfos BMEX systems*, <http://www.grundfos.com/web/grfosweb.nsf/Webopslag/bmex>, (Access date: March 2009).
- Hameed, Z., Y. S. Hong, Y. M. Cho, S. H. Ahn, and C. K. Song (2009), Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1.
- Helal, A. M., and S. A. Al-Malek (2006), Design of a solar-assisted mechanical vapor compression (MVC) desalination unit for remote areas in the UAE, *Desalination*, 197, 273.
- 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.
- Hou, S. (2008), Two-stage solar multi-effect humidification dehumidification desalination process plotted from pinch analysis, *Desalination*, 222, 572.
- Hou, S., and H. Zhang (2008), A hybrid solar desalination process of the multi-effect humidification dehumidification and basin-type unit, *Desalination*, 220, 552.
- Hoyt, R. E., S. P. Lawrence, and W. S. Sommer (2007), Copmputing Value at Risk: A simulation Assignment to Illustrate The Value of Enterprise Risk Managment, *Risk Management and Insurance Review*, 10, 299-307.
- Idris, A., A. F. Ismail, S. J. Shilton, R. Roslina, and M. Musa (2002), The deduction of fine structural details of reverse osmosis hollow fiber membranes using surface force-pore flow model, *Separation and Purification Technology*, 29, 217.
- Ishimaru, N. (1994), Solar photovoltaic desalination of brackish water in remote areas by electro dialysis, *Desalination*, 98, 485.



- Jacob, C. (2007), Seawater desalination: Boron removal by ion exchange technology, *Desalination*, 205, 47.
- Kaldellis, J. K., K. Kavadias, and E. Christinakis (2001), Evaluation of the wind-hydro energy solution for remote islands, *Energy Conversion and Management*, 42, 1105.
- Kalogirou, S. A. (2005), Seawater desalination using renewable energy sources, *Progress in Energy and Combustion Science*, 31, 242-281.
- Kamali, R. K., and S. Mohebinia (2008), Experience of design and optimization of multi-effects desalination systems in Iran, *Desalination*, 222, 639.
- Katchalsky, A., and O. Kedem (1962), Thermodynamics of Flow Processes in Biological Systems, *Biophysical Journal*, 2, 53.
- Kedem, O., and A. Katchalsky (1958), Thermodynamic analysis of the permeability of biological membranes to non-electrolytes, *Biochimica et Biophysica Acta*, 27, 229.
- Kershman, S. A., J. Rheinländer, and H. Gabler (2003), Seawater reverse osmosis powered from renewable energy sources - hybrid wind/photovoltaic/grid power supply for small-scale desalination in Libya, *Desalination*, 153, 17.
- Kershman, S. A., J. Rheinländer, T. Neumann, and O. Goebel (2005), Hybrid wind/PV and conventional power for desalination in Libya--GECOL's facility for medium and small scale research at Ras Ejder, *Desalination*, 183, 1.
- Koschikowski, J., M. Wiegand, and M. Rommel (2003), Solar thermal-driven desalination plants based on membrane distillation, *Desalination*, 156, 295.
- Kumar, B. S., S. Kumar, and R. Jayaprakash (2008), Performance analysis of a "V" type solar still using a charcoal absorber and a boosting mirror, *Desalination*, 229, 217.
- Kuroda, O., S. Takahashi, S. Kubota, K. Kikuchi, Y. Eguchi, Y. Ikenaga, N. Sohma, K. Nishinoiri, S. Wakamatsu, and S. Itoh (1987a), An electro dialysis sea water desalination system powered by photovoltaic cells, *Desalination*, 67, 33.
- Kuroda, O., S. Takahashi, K. Wakamatsu, S. Itoh, S. Kubota, K. Kikuchi, Y. Eguchi, Y. Ikenaga, N. Sohma, and K. Nishinoiri (1987b), An electro dialysis sea water desalination system powered by photovoltaic cells, *Desalination*, 65, 161.
- Lee, H.-J., M.-K. Hong, S.-D. Han, S.-H. Cho, and S.-H. Moon (2009), Fouling of an anion exchange membrane in the electro dialysis desalination process in the presence of organic foulants, *Desalination*, 238, 60.

- Lee, H.-J., F. Sarfert, H. Strathmann, and S.-H. Moon (2002), Designing of an electro dialysis desalination plant, *Desalination*, 142, 267.
- Lenzen, M., and J. Munksgaard (2002), Energy and CO2 life-cycle analyses of wind turbines--review and applications, *Renewable Energy*, 26, 339.
- Leung, W. K. (1998), Applicability of Value at Risk Methodology in Managing Market Risk for HK stock Market Investors, Master thesis, The University of Hong Kong.
- 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.
- Lloyd, A. I. (1977), An integral design for desalination plant using the secondary refrigerant freeze process, *Desalination*, 21, 137.
- Low, S. C., and P. J. H. Tay (1991), Vacuum desalination using waste heat from a steam turbine, *Desalination*, 81, 321.
- MacHarg, J. P. (2001), Exchanger Tests Verify 2.0 kWh/m<sup>3</sup> 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.
- Madhlopa, A., and C. Johnstone (2009), Numerical study of a passive solar still with separate condenser, *Renewable Energy*, 34, 1668.
- Mamlook, R., and O. Badran (2007), Fuzzy sets implementation for the evaluation of factors affecting solar still production, *Desalination*, 203, 394.
- Marl, E. G., R. P. G. Colomer, and C. A. Blaise-Ombrecht (2007), Performance analysis of a solar still integrated in a greenhouse, *Desalination*, 203, 435.
- Mathioulakis, E., V. Belessiotis, and E. Delyannis (2007), Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art, *Desalination*, 203, 346.
- Merten, U. (1966a), Desalination by pressure osmosis, *Desalination*, 1, 297.
- Merten, U. (1966b), *Desalination by Reverse Osmosis*, 289 pp., Cambridge, M.I.T. Press, Massachusetts.
- Miranda, M., and D. Infield (2002), A wind-powered seawater reverse osmosis system without batteries, *Desalination*, 153, 9-16.
- 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.
- Mohsen, M. S., and B. A. Akash (1998), Potentials of wind energy development for water pumping in Jordan, *Renewable Energy*, 14, 441.
- Neustadter, H. E., and D. A. Spera (1984), Review of the DOE/NASA wind turbine engineering information system, *Solar Energy*, 32, 591.
- Nikonenko, V. V., A. G. Istoshin, M. K. Urtenov, V. I. Zabolotsky, C. Larchet, and J. Benzaria (1999), Analysis of electro dialysis water desalination costs by convective-diffusion model, *Desalination*, 126, 207.
- 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.
- Omer, A. M. (2001), Wind energy in Sudan: Water pumping in rural areas, *Refocus*, 2, 34.
- Ophir, A. (1982), Desalination plant using low grade geothermal heat, *Desalination*, 40, 125.
- Ortiz, J. M., E. Expósito, F. Gallud, V. García-García, V. Montiel, and A. Aldaz (2006), Photovoltaic electro dialysis system for brackish water desalination: Modeling of global process, *Journal of Membrane Science*, 274, 138.
- Ortiz, J. M., E. Expósito, F. Gallud, V. García-García, V. Montiel, and A. Aldaz (2007), Electro dialysis of brackish water powered by photovoltaic energy without batteries: direct connection behaviour, *Desalination*, 208, 89.
- Ortiz, J. M., E. Expósito, F. Gallud, V. García-García, V. Montiel, and A. Aldaz (2008), Desalination of underground brackish waters using an electro dialysis system powered directly by photovoltaic energy, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92, 1677.

- Permar, C. (1995), *Liquid treatment apparatus for providing a flow of pressurized liquid. United States Patent 5,462,414*, (Access date: 26/5/2009).
- Pilat, B. (2001), Practice of water desalination by electro dialysis, *Desalination*, 139, 385.
- Pinkerton, H. E. (1979), *Fluid handling system. United States Patent, 4,178,240*, (Access date: 26/5/2009).
- Plantikow, U. (1999), Wind-powered MVC seawater desalination - operational results, *Desalination*, 122, 291 - 299.
- Pope, J. E. (1997), *Rules of Thumb for Mechanical Engineers*, Gulf Publishing, ISBN 0-884-415-790-3, Houston, Texas.
- Rahman, H., M. N. A. Hawlader, and A. Malek (2003), An experiment with a single-effect submerged vertical tube evaporator in multi-effect desalination, *Desalination*, 156, 91.
- Ramos, J. S., and H. M. Ramos (2009), Sustainable application of renewable sources in water pumping systems: Optimized energy system configuration, *Energy Policy*, 37, 633.
- Rautenbach, R., and B. Arzt (1983), Waste heat utilization of large diesel engines by Thermocompression and low temperature multiple effect evaporation, *Desalination*, 44, 121.
- Rey, M., and F. Lauro (1981), Ocean thermal energy and desalination, *Desalination*, 39, 159.
- Rice, W., and D. S. C. Chau (1997), Freeze desalination using hydraulic refrigerant compressors, *Desalination*, 109, 157.
- Sadrzadeh, M., A. Kaviani, and T. Mohammadi (2007), Mathematical modeling of desalination by electro dialysis, *Desalination*, 206, 538.
- Sadrzadeh, M., and T. Mohammadi (2008), Sea water desalination using electro dialysis, *Desalination*, 221, 440.
- Sardi, L. (1996), RO Desalinators Powered by PV Systems for Small/Medium Italian Islands, paper presented at *Mediterranean Conference on Renewable Energy Sources for Water Production*, Santorini - Greece, pp. 36-44, ISBN 960-90557-0-2.
- Saxena, A. K., S. Sugandhi, and M. Husain (2009), Significant depth of ground water table for thermal performance of salt gradient solar pond, *Renewable Energy*, 34, 790.

- Schroeder, P. J. (1980), Freezing processes--The standard of the future--An update, *Desalination*, 33, 299.
- Sharmila, N., P. Jalihal, A. K. Swamy, and M. Ravindran (2004), Wave powered desalination system, *Energy*, 29, 1659.
- Shih, H., and T. Shih (2007), Utilization of waste heat in the desalination process, *Desalination*, 204, 464.
- Sommariva, C., R. Borsani, M. I. Butt, and A. H. Sultan (1997), Reduction of power requirements for MSF desalination plants: The example of Al Taweelah B, *Desalination*, 108, 37.
- Spectrawatermakers (2004), *Spectra Water makers Clark pump ERD*, <http://www.spectrawatermakers.com/>, (Access date: May 2004).
- Spiegel, M. R. (1977), *Πιθανότητες και Στατιστική*, 384 pp., McGraw-Hill, Nev York, ISBN 0-07-060220-4, Αθήνα.
- Spiegler, K. S., and O. Kedem (1966), Thermodynamics of hyperfiltration (reverse osmosis): criteria for efficient membranes, *Desalination*, 1, 311.
- Sullivan, T. L. (1982), A review of resonance response in large, horizontal-axis wind turbines, *Solar Energy*, 29, 377.
- Tesetsekos, G., and P. Varangis (2000), Lessons in Structuring Derivatives Exchanges, *The World Bank Research Observer*, 15, 85-98.
- Thomson, M. (2003), Reverse-Osmosis Desalination of Seawater Powered by Photovoltaics Without Batteries, A Doctoral Thesis thesis, 242 pp, Loughborough, Loughborough.
- Thomson, M., and M. Miranda (2000), Theory testing and modelling 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.
- Toelkes, W. (1987), The Ebeye desalination project -- total utilization of diesel waste heat, *Desalination*, 66, 59.
- Trieb, F., H. Müller-Steinhagen, J. Kern, J. Scharfe, M. Kabariti, and A. Al Taher (2009), Technologies for large scale seawater desalination using concentrated solar radiation, *Desalination*, 235, 33.

- Tsunoda, Y., and M. Kato (1967), Compact apparatus for sea water desalination by electro dialysis using ion exchange membranes, *Desalination*, 3, 66.
- Tzen, E., K. Perrakis, and P. Baltas (1998), Design of a stand alone PV - desalination system for rural areas, *Desalination*, 119, 327.
- Tzen, E., and M. Sigalas (2004), Clean water: Development of an autonomous PV wind hybrid desalination system, *Refocus*, 5, 30.
- Tzen, E., D. Theofiloyianakos, and Z. Kologios (2008), Autonomous reverse osmosis units driven by RE sources experiences and lessons learned, *Desalination*, 221, 29-36.
- Velmurugan, V., and K. Srithar (2008), Prospects and scopes of solar pond: A detailed review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 2253.
- Vesa, J., B. Penate, and F. Casellano (2001), Electro dialysis desalination designed for wind energy (on-grid test). *Desalination*, 141, 53-61.
- Veza, J. M., A. G. Gotor, and J. P. Castillo (1992), Desalination technology in the Canary Islands, 1990, *Desalination*, 85, 147.
- Voivontas, D., K. Misirlis, E. Manoli, G. Arampatzis, and D. Assimacopoulos (2001), A tool for the design of desalination plants powered by renewable energies, *Desalination*, 133, 175.
- Voropoulos, K., E. Mathioulakis, and V. Belessiotis (2001), Experimental investigation of a solar still coupled with solar collectors, *Desalination*, 138, 103.
- Wilf, M. (2007), *Membrane Desalination Technology*, Balaban Desalination Publications, ISBN 0-86689-065-3, La Aquila - Italy.
- Wilson, L. P. S. (1983), *Reverse osmosis liquid purification apparatus. United States Patent 4,367,140*, (Access date: 26/5/2009).
- Wong, C. M. (1970), Geothermal energy and desalination: Partners in progress, *Geothermics*, 2, 892.
- Wu, S. (2006), Analysis of water production costs of a nuclear desalination plant with a nuclear heating reactor coupled with MED processes, *Desalination*, 190, 287.
- Zamen, M., M. Amidpour, and S. M. Soufari (2009), Cost optimization of a solar humidification-dehumidification desalination unit using mathematical programming, *Desalination*, 239, 92.

- ΑΚΡΙΤΙΔΗΣ, Β. (1985), *Αντλίες - τύποι, επιλογή, λειτουργία και εγκατάσταση*, 334 pp., Εκδόσεις ΓΙΑΧΟΥΔΗ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ.
- Αλεξάκης, Α. (1993), *Αφαλάτωση*, 175 pp., Εκδόσεις Μιχάλη Σιδέρη, ISBN 960-7012-36-4, Αθήνα.
- 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.
- Βασιλακόπουλο, Σ. (1976), *Ηλεκτροτεχνία, τόμος δεύτερος, Ηλεκτρικές μηχανές*, 286 pp., Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα.
- Δεληγιάννη, Ε., and Β. Μπελεσιώτης (1995), *ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΣΥΣΗΜΑΤΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ, Αρχές Διεργασιών Αφαλάτωσης*, 475 pp., Αθήνα.
- Μαθιουλάκης, Μ. (2004), *Μέτρηση, Ποιότητα Μέτρησης και Αβεβαιότητα*, 245 pp., Ελληνική Ένωση Εργαστηρίων - HELLASLAB, ISBN 960-88226-0-2, Αθήνα.
- Νικητάκος, Ν. (2008), *Ανάπτυξη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο Θαλάσσιο Περιβάλλον.*, <http://www.seetha.gr/seetha/item.asp?ReportID=567>, (Access date: March 2009).
- Τσατσαρέλης, Κ. Α. (1997), *ΓΕΩΡΓΙΚΟΙ ΕΛΚΥΣΤΗΡΕΣ*, 447 pp., Εκδόσεις ΓΙΑΧΟΥΔΗ, ISBN 960-7425-13-8, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ.