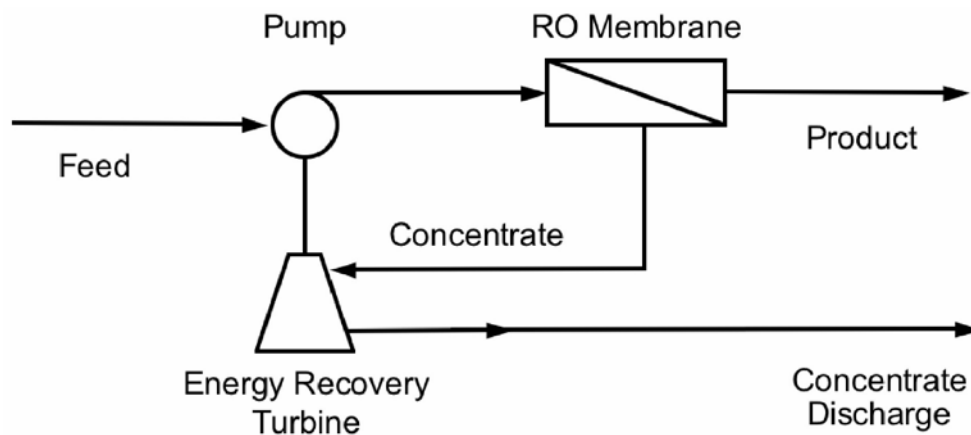




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΠΜΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ ΜΕ ΤΗ
ΧΡΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ**



ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΑΡΒΑΝΙΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΡΑΤΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ - ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΥΡΩΤΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ - ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2011

Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2010-2011 στα πλαίσια του μαθήματος 'Αυτοματισμός στην παραγωγή', προς εκπλήρωση των υποχρεώσεών μου στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών 'Συστήματα Αυτοματισμού' της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.

Το αποτέλεσμα της εργασίας επιτεύχθη με τη σημαντική βοήθεια του κ. Γεωργίου Μαυρωτά - Επίκουρου Καθηγητή της σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, τον οποίο οφείλω να ευχαριστήσω βαθύτατα για την συνεργασία μας, τόσο σε προπτυχιακό, όσο και μεταπτυχιακό επίπεδο.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος και τον κ. Νικόλαο Μαράτο - Καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, για την δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω την παρούσα εργασία μέσω του μαθήματος 'Αυτοματισμός στην παραγωγή' στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος 'Συστήματα Αυτοματισμού'.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμα τον κ. Βασίλειο Μπελεσιώτη - Διευθυντή του εργαστηρίου ηλιακών και άλλων ενεργειακών συστημάτων του ΕΚΕΦΕ 'Δημόκριτος', για το βιβλίο του σχετικά με την αφαλάτωση που μου έδωσε σε παλαιότερη συνάντησή μας, καθώς αποτέλεσε το έναυσμα για να ασχοληθώ με το θέμα αυτό.

Κωνσταντίνος Αρβανίτης

Αθήνα, Ιούνιος 2011

Περίληψη

Στη σημερινή εποχή, η πρόσβαση των ανθρώπων σε νερό κατάλληλο για πόση ή άλλη χρήση (πχ. γεωργική κλπ) είναι δυσχερής, με προοπτική επιδείνωσης του φαινομένου. Η αλόγιστη χρήση των υδατικών αποθεμάτων, η ρύπανσή τους αλλά και η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση λόγω της ραγδαίας πληθυσμιακής αύξησης, είναι ορισμένες από τις αιτίες που έχουν καταστήσει το νερό ως αγαθό σε έλλειψη.

Ειδικότερα, στην Ελλάδα, αν και υπάρχει αφθονία ανανεώσιμων υδατικών πόρων, παρουσιάζεται έλλειψη νερού λόγω της γεωγραφικής ανισοκατανομής του υδατικού δυναμικού (συγκέντρωση στα δυτικά και βόρεια της χώρας, λειψυδρία στα νησιά) και της ανορθολογικής διαχείρισής του.

Μια από τις βασικές μεθόδους αντιμετώπισης του προβλήματος, αποτελεί η αφαλάτωση θαλασσινού νερού. Οι μέθοδοι αφαλάτωσης που χρησιμοποιούνται σήμερα κατηγοριοποιούνται σε θερμικές μεθόδους και μεθόδους με χρήση μεμβρανών. Χαρακτηριστικότερος εκπρόσωπος των τελευταίων αποτελεί η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης.

Η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης αξιοποιεί την αντίστροφή του φυσικού φαινομένου της όσμωσης, για τον διαχωρισμό διαλυμάτων με διαφορετική συγκέντρωση σε άλατα. Στη σημερινή εποχή υπάρχουν πολλές μονάδες αφαλάτωσης που λειτουργούν με τον τρόπο αυτό και συγκεκριμένα αποτελούν πάνω από το 50% των μονάδων παγκοσμίως.

Η διεργασία της αφαλάτωσης θαλασσινού νερού μέσω αντίστροφης όσμωσης περιλαμβάνει 7 κύρια στάδια: την τροφοδοσία του θαλασσινού νερού, την προκατεργασία του νερού τροφοδότησης, την μεταφορά του προκατεργασμένου νερού στις μεμβράνες μέσω αντλιών υψηλής πίεσης, την αφαλάτωση του νερού στα στοιχεία μεμβρανών, την ανάκτηση ενέργειας από το απορριπτόμενο ρεύμα της άλμης, την τελική επεξεργασία του αφαλατωμένου νερού και την απόρριψη του υπολείμματος.

Το σημαντικότερο μέρος της διεργασίας αποτελούν τα στοιχεία μεμβρανών, δηλαδή οι διαμορφώσεις των μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης μέσα στα δοχεία πίεσης. Υπάρχουν διάφορες διαθέσιμες διαμορφώσεις, όμως στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η διαμόρφωση κοίλων ινών (*hollow fibers*).

Για την μαθηματική περιγραφή της διαμόρφωσης αυτής των στοιχείων αφαλάτωσης της προτεινόμενης μονάδας, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο των *Al-Bastaki και Abbas*, το οποίο θεωρείται αρκετά ακριβές γιατί λαμβάνει υπ' όψιν πολλές παραμέτρους που επηρεάζουν τη διεργασία (πόλωση συγκέντρωσης κλπ.)

Για την κατασκευή του μοντέλου της διεργασίας αφαλάτωσης με στοιχεία κοίλων ινών, έγινε χρήση του μαθηματικού προγραμματισμού και συγκεκριμένα της γλώσσας *GAMS*. Το μοντέλο της διεργασίας και της συνολικής μονάδας που δημιουργήθηκε, επιλύθηκε με τον solver *CONOPT*, ως προς το ελάχιστο κόστος αφαλατωμένου νερού σε διάφορες εκδοχές τιμών των βασικών μεταβλητών του προβλήματος.

Τα αποτελέσματα της αρχικής επίλυσης, αλλά και της μελέτης περιπτώσεων επιβεβαιώνουν τις αρχικές εκτιμήσεις για την αξία της αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με αντίστροφη όσμωση, καθώς φαίνεται καθαρά ότι αποτελεί μια τεχνικά και οικονομικά βιώσιμη λύση. Αυτό γίνεται εντονότερα εμφανές στις περιπτώσεις των άνυδρων νησιών, όπου το κόστος μεταφοράς του νερού σε αυτά παραμένει υψηλό.

Abstract

Nowadays, the access to water for the modern societies is considered to be more and more difficult. The water reserves' abuse and pollution, as long as the increasing demand due to population increase, are some of the main reasons that have established water as a good in scarcity.

Particularly in Greece, despite the fact that there are plenty of renewable water resources, it is clear that there is water scarcity in many areas, especially in islands. This is due to the irrational use of underground water and to the non uniform distribution of water resources throughout the country.

One of the tools, that seem to have the potential to help in the struggle for ensuring our water efficiency, is seawater desalination. Desalination methods, that are being used today, can be categorized in two principal groups: thermal methods and membrane methods. The most important candidate for solving global water problems, comes from the later group and it is called reverse osmosis.

Reverse osmosis is based on the inversion of the natural osmosis phenomenon, for the separation of solutions with different salt concentrations. Today, it is estimated that more than 50% of the active desalination units use this method.

The process of seawater desalination through reverse osmosis includes 7 basic steps: the seawater intake, the feed water pretreatment system, the high pressure pumps, the membrane modules, the energy recovery system for the rejecting brine stream, the post-treatment of desalted water and the brine disposal.

The most important parts of the whole procedure are, undoubtedly, the membrane modules, where it takes place the desalination. These modules consist of the membranes, in various formations, and the pressure vessels. There are currently some commercially available membrane formations, but in the present thesis, hollow fiber membranes were selected for the proposed unit.

This membrane formation has been modeled by *Al-Bastaki and Abbas*, among others, and their model is considered to be accurate because it takes into consideration many of the basic parameters that affect desalination process (concentration polarization etc).

The mathematical model, which was built for the purpose of the present thesis, was based on *Al-Bastaki and Abbas* model. For the construction of the model, General Algebraic Modeling System - *GAMS* was used as a modeling tool. The nonlinear programming (NLP) problem, which was formulated through this procedure, was solved with *CONOPT* solver, in order to obtain the minimum desalted water cost for various values of the basic parameters.

The results from the initial problem formulation, as long as the results from the various case studies, point that seawater reverse osmosis desalination can be a technically feasible and economically viable solution for the water scarcity problem. This becomes more clear in the case of the arid Greek islands, where the water transportation cost remains very high.

Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να βρεθεί το ελάχιστο μοναδιαίο κόστος αφαλάτωμένου νερού ($\$ \text{ ή } \text{€} / \text{m}^3$), που παράγεται μέσω της μεθόδου αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση (*reverse osmosis*). Για να γίνει εφικτό αυτό, χρησιμοποιήθηκε η μαθηματική μοντελοποίηση της διεργασίας και της συνολικής μονάδας, στη γλώσσα μοντελοποίησης *GAMS*. Στη συνέχεια, το μαθηματικό μοντέλο που δημιουργήθηκε, επιλύθηκε με τον solver *CONOPT*, με ζητούμενο την ελάχιστη τιμή του κόστους αφαλάτωσης (αντικειμενική συνάρτηση), βάσει ορισμένων περιορισμών.

Το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε στη γλώσσα *GAMS*, αποτελεί εφαρμογή του μαθηματικού προγραμματισμού, και συγκεκριμένα του κλάδου μη γραμμικού προγραμματισμού, καθώς οι εξισώσεις που περιγράφουν τη διεργασία είναι κυρίως μη γραμμικές. Η επίλυση του μη γραμμικού μοντέλου και η εύρεση των βέλτιστων τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης και των μεταβλητών, έγινε μέσω του solver *CONOPT*, ενός προγράμματος που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο της γενικευμένης μειωμένης κλίσης (*generalized reduced gradient - GRG*) για την προσέγγιση της λύσης.

Η χρήση του μαθηματικού προγραμματισμού στην περίπτωση της αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση είναι συχνή, ειδικά τα τελευταία χρόνια, στη διεθνή βιβλιογραφία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα paper των *Yan-yue Lu et al [20]*, *Guria et al* και *Marcovecchio et al [24]*. Ειδικά το τελευταίο, αποτελεί και την πηγή έμπνευσης της παρούσας εργασίας. Η βασική διαφορά του paper σε σχέση με την εργασία είναι ότι εδώ, δεν επιχειρείται γραμμική προσέγγιση του μοντέλου και εύρεση ολικού (*global*) ελαχίστου, αλλά γίνεται χρήση μη γραμμικού μοντέλου και αναζητείται ένα τοπικό (*local*) ελάχιστο σε μία όμως συγκεκριμένη περιοχή λύσεων.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται μια περιγραφή του προβλήματος λειψυδρίας σε παγκόσμιο αλλά και τοπικό επίπεδο, ενώ προτείνεται και η αφαλάτωση θαλασσινού νερού ως λύση στο πρόβλημα αυτό. Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται εκτενής αναφορά στην αντίστροφη όσμωση, ως μέθοδο αφαλάτωσης. Στο τρίτο κεφάλαιο εισάγονται οι έννοιες της βελτιστοποίησης και του μαθηματικού προγραμματισμού και περιγράφονται τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται. Στο τέταρτο κεφάλαιο, περιγράφεται το μοντέλο της διεργασίας και του συνόλου της μονάδας που χρησιμοποιείται, καθώς επίσης εξάγεται και η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης του αρχικού προβλήματος και η μελέτη περιπτώσεων που ακολούθησε, ενώ στο έκτο κεφάλαιο, γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που ελήφθησαν και εξαγωγή συμπερασμάτων.

Τα αποτελέσματα από την επίλυση του μοντέλου, αλλά και από τη μελέτη περιπτώσεων που ακολούθησε, καταδεικνύουν την μεγάλη χρησιμότητα και προοπτική της μεθόδου της αφαλάτωσης νερού με αντίστροφη όσμωση. Γίνεται φανερό ότι η μέθοδος αυτή, μπορεί να δώσει λύση στο πρόβλημα λειψυδρίας, και ειδικότερα στις περιπτώσεις περιοχών που έχουν πρόσβαση σε θαλασσινό νερό, ως πηγή τροφοδοσίας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

| | |
|--|----|
| 1.1 Το πρόβλημα του νερού | 1 |
| 1.2 Η σημερινή κατάσταση παγκοσμίως και τα αίτια | 2 |
| 1.3 Το πρόβλημα στον Ελλαδικό χώρο | 4 |
| 1.4 Μέθοδοι αντιμετώπισης της έλλειψης φρέσκου νερού | 8 |
| 1.5 Η αφαλάτωση ως μέθοδος ανάκτησης πόσιμου νερού | 8 |
| 1.6 Μέθοδοι αφαλάτωσης | 10 |
| 1.6.1 Θερμικές μέθοδοι | 12 |
| 1.6.2 Μέθοδοι με μεμβράνες | 16 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΟΣΜΩΣΗ ΩΣ ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

| | |
|--|----|
| 2.1 Αντίστροφη όσμωση – γενικά στοιχεία | 18 |
| 2.2 Περιγραφή της διεργασίας αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση | 19 |
| 2.2.1 Τροφοδοσία θαλασσινού νερού | 20 |
| 2.2.2 Προκατεργασία νερού τροφοδότησης | 21 |
| 2.2.3 Μεταφορά προκατεργασμένου νερού μέσω αντλιών υψηλής πίεσης | 23 |
| 2.2.4 Αφαλάτωση του νερού σε μονάδα αντίστροφης όσμωσης | 23 |
| 2.2.4.1 Μεμβράνες διαχωρισμού | 24 |
| 2.2.4.2 Διαμόρφωση μεμβρανών στοιχείων αφαλάτωσης | 26 |
| 2.2.4.3 Διαμόρφωση μονάδας αφαλάτωσης | 31 |
| 2.2.5 Ανάκτηση ενέργειας μέσω απόρριψης της άλμης | 32 |
| 2.2.6 Τελική κατεργασία αφαλατωμένου νερού | 35 |
| 2.2.7 Απόρριψη της άλμης | 36 |
| 2.3 Εφαρμογές της αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με αντίστροφη όσμωση | 38 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

| | |
|---|----|
| 3.1 Αρχές βελτιστοποίησης και μαθηματικού προγραμματισμού | 41 |
| 3.2 Στοιχεία μαθηματικού προγραμματισμού | 43 |
| 3.3 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης προβλημάτων μη γραμμικού προγραμματισμού | 44 |
| 3.4 Ο αλγόριθμος γενικευμένης μειωμένης κλίσης (GRG) | 46 |
| 3.5 Ο solver CONOPT | 48 |
| 3.6 Η γλώσσα GAMS | 49 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΜΟΝΑΔΑΣ

| | |
|---|----|
| 4.1 Μεταφορά μέσω μεμβρανών στην αντίστροφη όσμωση | 51 |
| 4.1.1 Μοντέλα μεταφοράς | 51 |
| 4.1.2 Το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης | 53 |
| 4.2 Αναλυτικό μοντέλο μεταφοράς μέσω μεμβρανών κοίλων ινών | 54 |
| 4.3 Παραδοχές στη μοντελοποίηση της αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση | 55 |
| 4.4 Περιγραφή και μοντελοποίηση του προβλήματος | 55 |
| 4.4.1 Μεταβλητές απόφασης και δεδομένα | 56 |
| 4.4.2 Περιορισμοί | 58 |
| 4.4.3 Αντικειμενική συνάρτηση | 62 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ

| | |
|---|----|
| 5.1 Αποτελέσματα αρχικής περίπτωσης | 63 |
| 5.2 Μελέτη περιπτώσεων | 66 |
| 5.2.1 Η περίπτωση της μεταβλητής C_f | 66 |
| 5.2.2 Η περίπτωση της μεταβλητής P_f | 68 |
| 5.2.3 Η περίπτωση της μεταβλητής $Prodc$ | 69 |
| 5.2.4 Η περίπτωση της μεταβλητής Q_{FEED} | 70 |
| 5.2.5 Η περίπτωση της μεταβλητής C_p | 71 |
| 5.2.6 Η περίπτωση της ελεύθερης επιλογής τιμών των βασικών μεταβλητών | 72 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

| | |
|---|----|
| 6.1 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αρχικής επίλυσης | 73 |
| 6.2 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μελέτης περιπτώσεων | 74 |
| 6.3 Αξιολόγηση της μεθοδολογίας επίλυσης | 76 |
| 6.3.1 Αξιολόγηση της γλώσσας GAMS ως εργαλείο μοντελοποίησης | 76 |
| 6.3.2 Αξιολόγηση του solver CONOPT και του μη γραμμικού προγραμματισμού | 77 |
| 6.4 Αξιολόγηση της μεθόδου αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση | 78 |

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

| | |
|-------------------------|----|
| Βιβλιογραφικές αναφορές | 79 |
|-------------------------|----|

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

| | |
|-----------------------|----|
| Στοιχεία παραρτήματος | 82 |
|-----------------------|----|

1.1 Το πρόβλημα του νερού

Το νερό αποτελεί αναμφισβήτητη πηγή ζωής για τον πλανήτη και κινητήρια δύναμη του ανθρώπινου πολιτισμού. Το νερό και ο πολιτισμός αποτέλεσαν πάντοτε δύο αδιαχώριστες έννοιες, όπως μπορεί να γίνει φανερό αν ανατρέξει κανείς στην ιστορία της ανθρωπότητας, από την προϊστορία μέχρι σήμερα. Οι ποταμοί, οι θάλασσες, οι λίμνες, οι ωκεανοί ακόμα και οι οάσεις υπήρξαν πόλοι για ομάδες ανθρώπων που εγκαταστάθηκαν κοντά στις ακτές τους. Η αναδρομή στην ιστορία του πολιτισμού μας πείθει ότι δεν είναι τυχαίο το γεγονός της μεγάλης πολιτιστικής και οικονομικής ανάπτυξης των πολιτισμών που αναπτύχθηκαν κατά μήκος των μεγάλων υδάτινων ρευμάτων (πχ Αιγύπτιοι, Έλληνες, Μεσοποτάμιοι κτλ.)

Όσο πολυτιμο, όμως, παρουσιάζεται το νερό, τόσο δύσκολη φαίνεται πλέον πως είναι και η πρόσβαση των ανθρώπων σε αυτό, τουλάχιστον στην πόσιμη μορφή του. Κι αυτό διότι, από τα παγκόσμια αποθέματα υδάτων, υπολογίζεται το 97% περίπου αποτελεί το νερό των ωκεανών, το οποίο λόγω της αλμυρότητάς του είναι ακατάλληλο για χρήση από τον άνθρωπο, χωρίς επεξεργασία. Το υπόλοιπο 3% είναι φρέσκο (γλυκό) νερό, το οποίο δυνητικά είναι κατάλληλο για χρήση.

| Type | Total dissolved solids (TDS) | Note |
|-------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Freshwater | Up to 1,500 | Variable chemical composition |
| Brackish water | 1,500–10,000 | Variable chemical composition |
| Salt water | > 10,000 | Variable chemical composition |
| Seawater | 10,000–45,000 | Fixed chemical composition |
| Standard seawater | 35,000 | Fixed chemical composition |

Πίνακας 1.1: Ταξινόμηση του νερού βάση των περιεχόμενων αλάτων σε ppm

Πηγή: Cipollina A., Micale G., Rizzuti L., *Seawater desalination - conventional and renewable energy processes, Green energy and technology volumes, p. 3, Springer, 2009*

| Συστατικά | Περιεκτικότητα εις mg/l | |
|---------------------------|-------------------------|-------------------|
| | Ανώτατο δεκτό | Ανώτατο επιτρεπτό |
| Υλικά διαλυμένα άλατα TDS | 500 | 1500 |
| Χλωριούχα Cl | 200 | 600 |
| Θεϊκά SO_4^{2+} | 200 | 400 |
| Ασβέστιο Ca^{2+} | 75 | 100 |
| Μαγνήσιο Mg^{2+} | 30 | 150 |
| Φθοριούχα F^- | 0.7 | 1.7 |
| Νιτρικά NO_3^- | <50 | 100 |
| Χαλκός Cu^{2+} | 0.05 | 1.5 |
| Σίδηρος Fe^{3+} | 0.10 | 1.0 |
| Χλωριούχο νάτριο NaCl | 250 | - |
| Υδρογόνο σε μονάδες pH | 7.0 εως 8.5 | 6.5 εως 9.2 |

Πίνακας 1.2: Προδιαγραφές για το πόσιμο νερό του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (W.H.O.)

Πηγή: Δεληγιάννη Ε., Μπελεσιώτης Β., *Μέθοδοι και συστήματα αφαλάτωσης - Αρχές διεργασιών αφαλάτωσης, σελ. 11, 1995*

Όμως, το μεγαλύτερο μέρος του φρέσκου νερού (68,7%) βρίσκεται με τη μορφή παγετώνων στους πόλους και τις κορυφές των οροσειρών, ενώ ένα ποσοστό περίπου γύρω στο 30,1% αποτελεί τα υπόγεια ύδατα. Συνεπώς, το ποσοστό που βρίσκεται σε επιφανειακές προσβάσιμες εκτάσεις (λίμνες, ποτάμια κτλ.) αποτελεί περίπου το 1% της συνολικής ποσότητας ύδατος που υπάρχει. [3,7,15]

| Μορφή Νερού | Όγκος νερού σε κυβικά χιλιόμετρα | Ποσοστό γλυκού νερού | Ποσοστό συνολικού νερού |
|---|----------------------------------|----------------------|-------------------------|
| Ωκεανοί, Θάλασσες & Κόλποι | 1.338.000.000 | -- | 96,5 |
| Παγόβουνα, Παγετώνες & Μόνιμο χιόνι | 24.064.000 | 68,7 | 1,74 |
| Υπόγειο Νερό | 23.400.000 | -- | 1,7 |
| Γλυκό | 10.530.000 | 30,1 | 0,76 |
| Αλμυρό | 12.870.000 | -- | 0,94 |
| Εδαφική Υγρασία | 16.500 | 0,05 | 0,001 |
| Εδαφικός πάγος & Μόνιμο παγωμένο έδαφος | 300.000 | 0,86 | 0,022 |
| Λίμνες | 176.400 | -- | 0,013 |
| Γλυκές | 91.000 | 0,26 | 0,007 |
| Αλμυρές | 85.400 | -- | 0,006 |
| Ατμόσφαιρα | 12.900 | 0,04 | 0,001 |
| Έλη | 11.470 | 0,03 | 0,0008 |
| Ποταμοί | 2.120 | 0,006 | 0,0002 |
| Βιολογικό Νερό | 1.120 | 0,003 | 0,0001 |
| Σύνολο | 1.386.000.000 | - | 100 |

Πίνακας 1.3: Εκτίμηση παγκόσμιας κατανομής υδατικών πόρων

Πηγή: <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclegreekhi.html>

1.2 Η σημερινή κατάσταση παγκοσμίως και τα αίτια

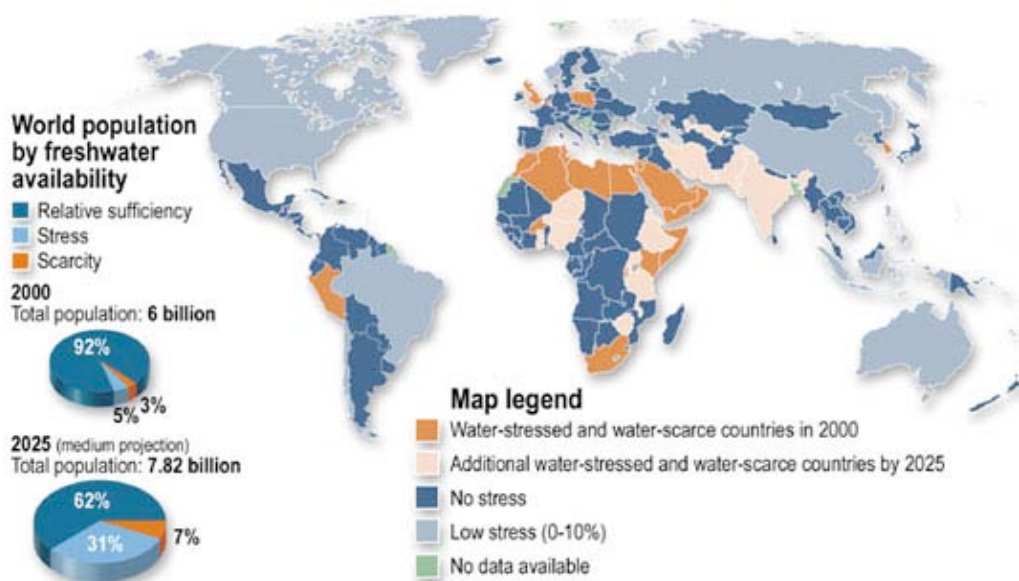
Στην σημερινή εποχή, οι συνθήκες για την ανθρωπότητα είναι τελείως διαφορετικές σε σχέση με το παρελθόν. Τα στοιχεία από τις μετρήσεις των αποθεμάτων φρέσκου νερού παγκοσμίως αποδεικνύουν ότι τα τελευταία μειώνονται με αυξανόμενο ρυθμό. Το γεγονός αυτό προκαλεί ακόμα και εντάσεις μεταξύ κρατών για τη πρόσβαση σε πόσιμο νερό, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την αντίδραση της Συρίας και του Ιράκ στα σχέδια της Τουρκίας για κατασκευή φραγμάτων στην περιοχή της μεταξύ των ποταμών Τίγρη και Ευφράτη, μοναδικών πηγών φρέσκου νερού της ευρύτερης περιοχής. Αλλά και στις περιπτώσεις που εμπύπτουν στην επικράτεια ενός μόνο κράτους, εμφανίζονται πολύ ανησυχητικά μηνύματα, όπως στο Μεξικό, το Ισραήλ, την Κίνα, την Ινδία, την Αίγυπτο κτλ, όπου η έλλειψη πόσιμου νερού είναι ήδη ορατή.

Οι επιπτώσεις από την έλλειψη φρέσκου νερού μπορούν γίνουν εύκολα αντιληπτές:

- *Ασθένειες και θάνατοι*, λόγω της ανάγκης καθημερινής χρήσης νερού για κάλυψη βιολογικών αναγκών.
- *Διαμάχες* μεταξύ περιοχών ή κρατών για τον έλεγχο των υδάτινων αποθεμάτων.
- *Φαινόμενα μετανάστευσης και φτώχειας*
- *Μείωση της βιοποικιλότητας*, λόγω εξαφάνισης μέρους της χλωρίδας και πανίδας του πλανήτη.

Τα αίτια της σημερινής κατάστασης, όπως είναι εύκολα αντιληπτό, είναι σχεδόν αποκλειστικά ανθρωπογενή:

- *Η ραγδαία πληθυσμιακή αύξηση*, όπου υπολογίζεται έως το 2050 ο πληθυσμός του πλανήτη θα φτάσει τα 9 δις. Η αύξηση αυτή, πέρα από την αυτονόητη αύξηση στη ζήτηση νερού για οικιακή χρήση, θα επιφέρει και μια εξίσου σημαντική αύξηση στην κατανάλωση νερού για γεωργική και βιομηχανική χρήση.
- *Η αστυφιλία*, όπου το ποσοστό του πληθυσμού που κατοικεί σε πόλεις έχει αυξηθεί από 14% το 1900, στο 29% το 1950 και προβλέπεται να φτάσει στο 60 % το 2030. Το φαινόμενο αυτό επηρεάζει τα αποθέματα νερού μέσω: της εκτροπής τεραστίων όγκων επιφανειακών υδάτων αλλά και της υπερεκμετάλλευσης των υδροφόρων στρωμάτων.
- *Η ρύπανση και η μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα και των επιφανειακών υδάτων*, από τα μη επεξεργασμένα λύματα των πόλεων, από τα βιομηχανικά απόβλητα αλλά και από την αλόγιστη χρήση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων.
- *Η αλόγιστη χρήση των αποθεμάτων φρέσκου νερού*, στην κτηνοτροφία, στη γεωργία και το εμπόριο, όπου συχνά το μεγαλύτερο ποσοστό νερού χρησιμοποιείται μη αποδοτικά. Εδώ επίσης θα πρέπει να προστεθεί και η περίπτωση των υδροηλεκτρικών εργοστασίων παραγωγής ενέργειας, όπου για την κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών, τα φράγματα των εργοστασίων εμποδίζουν την πρόσβαση στο νερό των γύρω περιοχών.
- *Το φαινόμενο του θερμοκηπίου*, όπου η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας στις ορεινές περιοχές αλλάζει την αναλογία χιονοπτώσεων και βροχοπτώσεων και η αλλαγή αυτή έχει ως αποτέλεσμα περισσότερες πλημμύρες και μεγαλύτερη απορροή κατά τη διάρκεια της περιόδου βροχών, ενώ λιγότερο νερό παραμένει αποθηκευμένο με τη μορφή χιονιού και πάγου για χρήση σε περίοδο ξηρασίας. [3,7]



Εικόνα 1.1: Κατανομή πληθυσμού βάση διαθεσιμότητας σε φρέσκο νερό

Πηγή: Environment Canada (<http://www.ec.gc.ca>)

1.3 Το πρόβλημα στον Ελλαδικό χώρο

Στην Ελλάδα, παρά την αφθονία ανανεώσιμων υδατικών πόρων (782 m³ πόσιμου νερού ανά κάτοικο ετησίως έναντι 548 m³ της Γαλλίας, 460 m³ της Γερμανίας, 284 m³ της Ιρλανδίας και 50 m³ της Μάλτας) εμφανίζονται σημαντικά προβλήματα, λόγω της γεωγραφικής ανισοκατανομής του υδατικού δυναμικού (συγκέντρωση στα δυτικά και βόρεια της χώρας, λειψυδρία στα νησιά) και της ανορθολογικής διαχείρισής του.

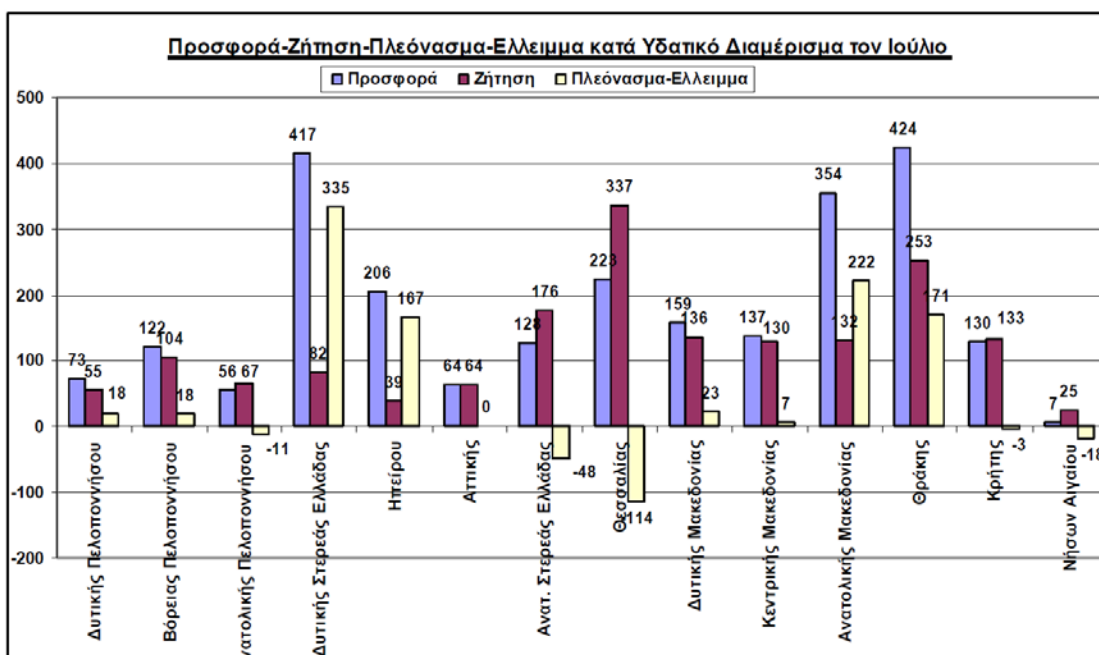
Το 83,8% των συνολικών υδατικών πόρων χρησιμοποιείται στη χώρα μας για άρδευση (έναντι του 24% ως μέσο όρο στην Ε.Ε.), ενώ το ποσοστό αυτό είναι πολύ υψηλότερο στις περιοχές που αντιμετωπίζουν προβλήματα εξάντλησης/υποβάθμισης των υπογείων υδάτων (Θεσσαλία, Ανατολική Πελοπόννησος, Ανατολική Στερεά).

Αρκετά υδατικά διαμερίσματα της χώρας είναι ελλειμματικά κατά τους θερινούς μήνες, λόγω των αυξημένων αναγκών του γεωργικού και του τουριστικού τομέα. Το πρόβλημα εντοπίζεται κυρίως στα νησιά του Αιγαίου και τη Θεσσαλία. [2]

| Κ.Α. | Υδατικά διαμερίσματα | Άρδευση | Κτηνοτροφία | Ύδρευση | Βιομηχανία | Λοιπές | Σύνολο |
|------|-------------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|------------|---------------|
| 1 | Δυτικής Πελοποννήσου | 201 | 5 | 23 | 3 | 20 | 252 |
| 2 | Βόρειας Πελοποννήσου | 401,5 | 6,6 | 41,7 | 3 | | 452,8 |
| 3 | Ανατολικής Πελοποννήσου | 324,9 | 4,7 | 22,1 | | | 351,7 |
| 4 | Δυτικής Στερεάς Ελλάδας | 366,5 | 9 | 22,4 | | | 397,9 |
| 5 | Ηπείρου | 153,5 | 10,3 | 33,9 | 4,3 | | 202 |
| 6 | Αττικής | 99 | 2,5 | 420 | 17,5 | | 539 |
| 7 | Ανατ. Στερεάς Ελλάδας | 773,7 | 9,9 | 41,6 | 12,6 | | 837,8 |
| 8 | Θεσσαλίας | 1550 | 13 | 69 | | | 1632 |
| 9 | Δυτικής Μακεδονίας | 609,4 | 7,9 | 43,7 | 30 | 80 | 771 |
| 10 | Κεντρικής Μακεδονίας | 527,6 | 8 | 99,8 | 80 | | 715,4 |
| 11 | Ανατολικής Μακεδονίας | 627 | 5,8 | 32 | | | 664,8 |
| 12 | Θράκης | 825,2 | 7,1 | 27,9 | 11 | | 871,2 |
| 13 | Κρήτης | 320 | 10,2 | 42,3 | | | 372,5 |
| 14 | Νήσων Αιγαίου | 80,2 | 6,8 | 37,2 | | | 124,2 |
| | Σύνολο χώρας | 6859,5 | 106,8 | 956,6 | 161,4 | 100 | 8184,3 |

Πίνακας 1.4: Ετήσια ζήτηση νερού σε m³ στην Ελλάδα ανά χρήστη και διαμέρισμα

Πηγή: Κλαδική Μελέτη Αφαλάτωσης Νερού - Μονάδα οικονομικής ανάλυσης αγορών Τράπεζας Πειραιώς



Γράφημα 1.1: Προσφορά/Ζήτηση και Πλεόνασμα/Ελλειμμα κατά υδατικό διαμέρισμα τον μήνα Ιούλιο

Πηγή: Κλαδική Μελέτη Αφαλάτωσης Νερού - Μονάδα οικονομικής ανάλυσης αγορών Τράπεζας Πειραιώς

| Νήσος | Υφιστάμενη κατάσταση | | Προβλεπόμενη κατάσταση 2020 | |
|--------------------------------------|---|-----------------------|---|-----------------------|
| | Συνολικές απαιτήσεις σε χιλιάδες m ³ | Συνολικό έλλειμμα (%) | Συνολικές απαιτήσεις σε χιλιάδες m ³ | Συνολικό έλλειμμα (%) |
| Αστυπάλαια | 388 | 14,1 | 425 | 21,5 |
| Κάλυμνος-Ψέριμος-Τέλενδος-Καλόλιμνος | 2.003 | 1,2 | 2.292 | 6,2 |
| Λειψοί | 164 | 53,2 | 184 | 50,3 |
| Λέρος-Φαρμακονήσι | 1.030 | 4,5 | 1.220 | 9,5 |
| Πάτμος-Άρκοι | 498 | 13,4 | 561 | 13 |
| Κάσος | 207 | 0 | 230 | 14,7 |
| Κάρπαθος-Σαρία | 1.327 | 0 | 1.586 | 0,6 |
| Κως | 13.162 | 4,2 | 15.061 | 12,5 |
| Νίσυρος-Γυαλί | 151 | 20,3 | 190 | 18 |
| Μεγίστη-Ρω | 63 | 11 | 84 | 11 |
| Ρόδος | 32.057 | 3,4 | 38.697 | 2,7 |
| Σύμη | 306 | 8,9 | 391 | 9,6 |
| Χάλκη | 73 | 30,1 | 94 | 17,7 |
| Τήλος | 144 | 7,6 | 162 | 13,9 |
| Αγαθονήσι | 17 | 2,4 | 23 | 41,8 |
| Άνδρος | 5.571 | 1,2 | 5.817 | 2,2 |
| Άμοργός | 330 | 12,1 | 409 | 7,9 |
| Θήρα | 2.338 | 16,5 | 3.699 | 41,2 |
| Ιος | 409 | 0,3 | 556 | 0 |
| Κύθνος | 400 | 1 | 428 | 1,6 |
| Κέα | 1.502 | 5,9 | 1.652 | 15,2 |
| Σέριφος | 344 | 4,9 | 556 | 15,3 |

| | | | | |
|-----------------|----------------|---------------|----------------|---------------|
| Μήλος | 1.255 | 10,5 | 1.435 | 1,7 |
| Σίφνος | 614 | 16,8 | 753 | 7,1 |
| Νάξος | 12.457 | 45,4 | 13.759 | 45,1 |
| Πάρος | 3.461 | 1,6 | 3.820 | 13,7 |
| Σύρος | 3.751 | 37,6 | 4.199 | 41,4 |
| Μύκονος-Δήλος | 3.037 | 24,3 | 3.454 | 43,4 |
| Τήνος | 3.321 | 9,7 | 3.617 | 8,5 |
| Ανάφη | 156 | 64,4 | 162 | 38,9 |
| Δονούσα | 23 | 1,3 | 34 | 9,4 |
| Ηρακλεία | 55 | 5,9 | 67 | 64,3 |
| Κουφονήσια | 48 | 17,7 | 68 | 9,2 |
| Σχοινούσα | 74 | 44,1 | 87 | 42,7 |
| Κίμωλος | 83 | 1,1 | 91 | 0,7 |
| Σίκινος | 38 | 8,7 | 46 | 16,7 |
| Φολέγανδρος | 95 | 51,1 | 148 | 33,4 |
| Αντίπαρος | 207 | 0,9 | 269 | 0,8 |
| Αγ. Ευστράτιος | 58 | 0 | 70 | 19,7 |
| Λέσβος | 44.398 | 6,9 | 46.617 | 10,1 |
| Λήμνος | 6.290 | 5,5 | 6.602 | 12,4 |
| Ικαρία | 2.928 | 0 | 3.055 | 2,1 |
| Σάμος | 14.176 | 22,2 | 14.362 | 11,7 |
| Φούρνοι-Θύμαινα | 189 | 0,3 | 241 | 19,1 |
| Οινούσες | 117 | 0 | 165 | 0 |
| Χίος | 11.390 | 11 | 13.596 | 6,8 |
| Ψαρά | 67 | 0 | 80 | 7,8 |
| Σύνολο | 165.842 | 11,50% | 184.965 | 13,20% |

Πίνακας 1.5: Συνολικές ανάγκες και έλλειμμα νερού στα νησιά του Αιγαίου

Πηγή: Μελέτη ανάπτυξης εργαλείων διαχείρισης οδατικών πόρων των νησιών του Αιγαίου - Κοινοπραξία Αιγαίου

Η υπερβολική χρήση για άρδευση, άριστης ποιότητας πόσιμου νερού προερχόμενου από γεωτρήσεις, αποτελεί κατασπατάληση πολύτιμων και δύσκολα ανανεώσιμων πόρων. Σύμφωνα με εκτιμήσεις λειτουργούν στη χώρα μας περίπου 300.000 γεωτρήσεις (35-40% των οποίων παράνομες), αριθμός υπερβολικά μεγαλύτερος για τις δυνατότητες των υπεδαφικών υδροφορέων κατά: [2]

- +31% για το σύνολο της χώρας
- +320% για την Θεσσαλία
- +260% για την Αττική
- +200% για την Πελοπόννησο και τα νησιά του Αιγαίου
- +30% για την Δυτική Μακεδονία
- +20% για την Κεντρική Μακεδονία

Η ανεξέλεγκτη αυτή πρακτική έχει σαν συνέπεια την μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και κυρίως την υφαλμύρωση τεράστιων παραθαλάσσιων εκτάσεων σε επίπεδα επικίνδυνα όχι μόνο για πόση, αλλά και για γεωργική χρήση. Εκτιμάται ότι υφαλμύρωση υπερβαίνει τα 2.000.000 στρέμματα γεωργικής γης, με οξυμμένα προβλήματα σε πολλές παράκτιες περιοχές του Αιγαίου.



Εικόνα 1.2: Ζώνες υφαλμύρωσης στην Ελλάδα

Πηγή: Σύνδεσμος Γεωλόγων Μελετητών Ελλάδας

Εκτός από την υφαλμύρωση, σημαντικά προβλήματα δημιουργεί και η ρύπανση των υπόγειων υδάτων με νιτρικά, αλλά και ο ευτροφισμός των επιφανειακών υδάτων. Εκτιμάται ότι περίπου 20 περιοχές της χώρας αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα ρύπανσης λόγω νιτρικών ενώσεων, μεταξύ αυτών η Αργολίδα, η Θεσσαλία, η ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, το Κιλκίς, η Πέλλα, οι Σέρρες και η πεδιάδα Άρτας - Πρέβεζας. Το φαινόμενο του ευτροφισμού, εκτιμάται ότι εμφανίζεται στο 70% των υδατικών αποθεμάτων των λιμνών της χώρας.

Η κατάσταση των υπογείων υδάτων στις περιοχές που αναφέρθηκαν παραπάνω εμφανίζεται ως εξαιρετικά σοβαρή και ίσως μη αναστρέψιμη, καθώς η φυσική απορρύπανση των υπογείων υδάτων των βεβαρυσμένων περιοχών θα απαιτούσε τουλάχιστον μια 20ετία με παύση των γεωτρήσεων και φυσικό εμπλουτισμό των υδροφορέων. [2]

1.4 Μέθοδοι αντιμετώπισης της έλλειψης φρέσκου νερού

Για την διατήρηση των αποθεμάτων νερού σε τοπική και παγκόσμια κλίμακα είναι απαραίτητο να εφαρμοσθούν σύγχρονες στρατηγικές διαχείρισης, που περιλαμβάνουν:

- ◆ Καθαρισμό και επαναχρησιμοποίηση αστικών λυμάτων
- ◆ Βελτίωση της απόδοσης των τεχνολογιών άρδευσης
- ◆ Εξοικονόμηση νερού στις βιομηχανικές εφαρμογές
- ◆ Περιορισμό της σπατάλης σε οικιακό επίπεδο
- ◆ Μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κ.α.

Παράλληλα όμως με τις προσπάθειες στο πλαίσιο της διατήρησης των αποθεμάτων, είναι πολύ σημαντικό να επικεντρωθεί το ενδιαφέρον και σε ένα άλλο επίπεδο, αυτό της ενίσχυσης των αποθεμάτων φρέσκου νερού. Μια τεχνολογικά, αλλά και οικονομικά, εφικτή και βιώσιμη λύση στο πλαίσιο αυτό, αποτελεί η *αφαλάτωση* θαλασσινού (αλλά και υφάλμυρου) νερού. [3,7]

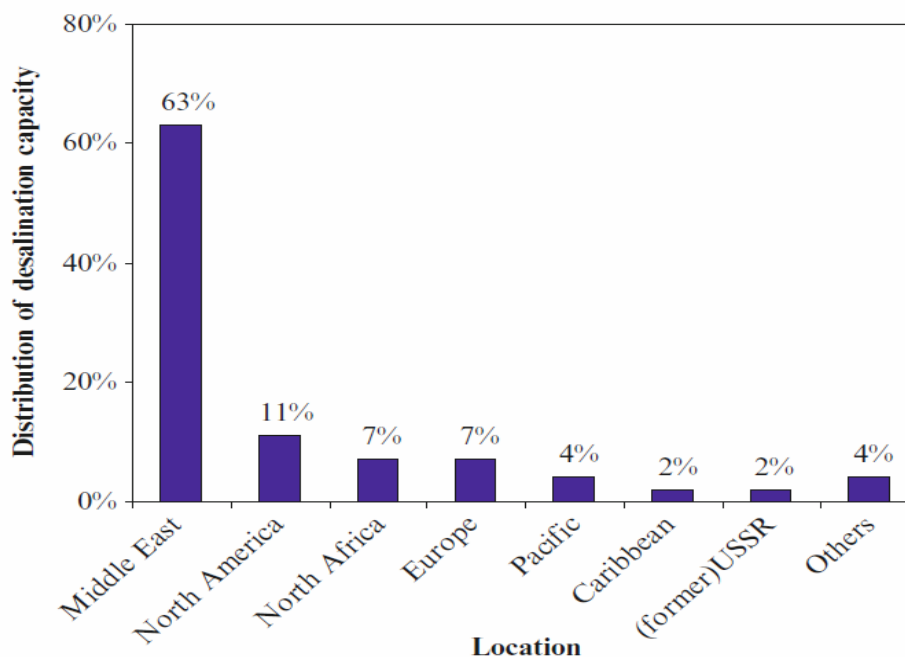
1.5 Η αφαλάτωση ως μέθοδος ανάκτησης πόσιμου νερού

Με τον όρο αφαλάτωση χαρακτηρίζουμε οποιαδήποτε διεργασία διαχωρισμού των αλάτων και του νερού από υδατικά διαλύματα. Είναι δυνατόν να αφαιρεθεί είτε το νερό από τα άλατα, είτε τα άλατα από το νερό. Επομένως, η αφαλάτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια μέθοδος ανάκτησης πόσιμου νερού από θαλασσινό νερό, υφάλμυρα ποτάμια και λίμνες. Βρίσκει κυρίως εφαρμογή σε περιοχές δίπλα στην θάλασσα, αλλά φτωχές σε πόσιμο νερό, όπου η επιλογή της μεταφοράς νερού είναι οικονομικά και τεχνικά ασύμφορη.

Η διαδρομή της αφαλάτωσης μέσα στην ιστορία μπορεί να συνοψισθεί στα εξής σημαντικά σημεία:

- Η ιδέα της αφαλάτωσης ξεκινά από τους αρχαίους Έλληνες ναυτικούς οι οποίοι εξάτμιζαν το θαλασσινό νερό γύρω στον 4ο αιώνα π.χ.
- Την ίδια περίοδο, ο Αριστοτέλης μελετά την δυνατότητα αφαλάτωσης αλμυρού νερού
- Κατά τον Μεσαίωνα, ο Giovanni Battista della Porta, επαναφέρει το ζήτημα της παραγωγής πόσιμου νερού από θαλασσινό, στο έργο του 'Magiae Naturalis'.
- Πολύ αργότερα, με την ανάπτυξη της ατμοπλοΐας, παρουσιάστηκε μεγάλη ανάγκη ποσοτήτων καθαρού ύδατος για την κίνηση των ατμομηχανών, έτσι ώστε να μην προκαλείται ταχύτατη διάβρωση και επομένως, κατέστη επιτακτική η ανάγκη αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού.
- Το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για αφαλάτωση νερού δόθηκε στην Αγγλία το 1869. Τον ίδιο χρόνο οι Άγγλοι εγκατέστησαν την πρώτη μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού στο Άντεν για τις ανάγκες του στόλου τους.
- Το πρώτο μεγάλο εργοστάσιο αφαλάτωσης θαλασσινού νερού εγκαταστάθηκε στις Ολλανδικές Αντίλλες το 1930.
- Το 1960 ξεκίνησαν στο πανεπιστήμιο UCLA της Καλιφόρνια τα πρώτα πειράματα στην αντίστροφη όσμωση, με την κατασκευή των πρώτων μεμβρανών από τους ερευνητές, Sydney Loeb και Shrinivasa Sourirajan.
- Το 1965 κατασκευάστηκε η πρώτη πειραματική μονάδα αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού με την μέθοδο της Αντίστροφης Όσμωσης.
- Κατά την δεκαετία του 1970 ξεκίνησε η λειτουργία μεγάλων βιομηχανικών μονάδων αφαλάτωσης στη Ρωσία, ΗΠΑ, Μεξικό, και κυρίως στη Σαουδική Αραβία, το Κουβέιτ, το Ισραήλ κλπ.

Στη σημερινή εποχή, λειτουργούν περίπου 14.500 μονάδες αφαλάτωσης παγκοσμίως. Το 11% αυτών των μονάδων εγκαταστάθηκαν τα τελευταία χρόνια (πριν το 2000). Το 63% αυτών βρίσκονται στην Μέση Ανατολή και το 11% στις βόρειες ΗΠΑ. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι είναι η πολυβάθμια εκτόνωση (multiple stage flashing, MSF) και η αντίστροφη όσμωση (reverse osmosis, RO), η οποία παράγει και το 53% του παγκόσμιου προϊόντος. [2,3,4,26]



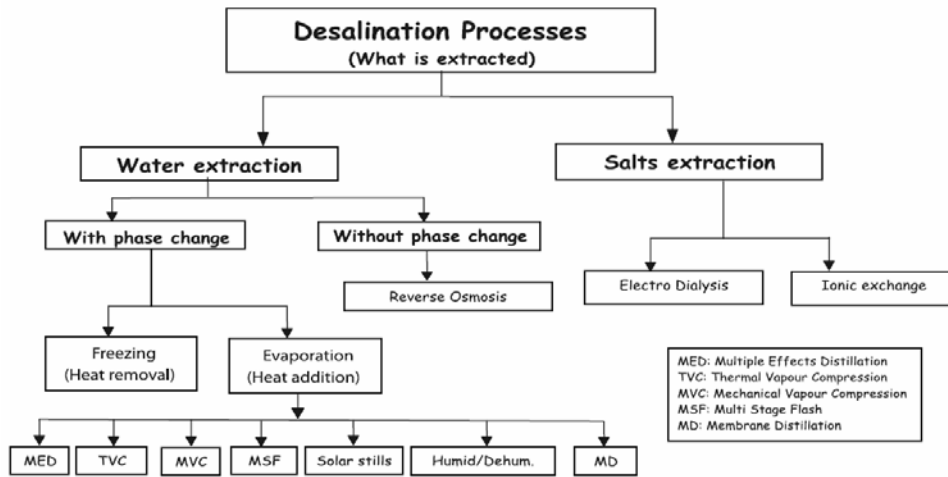
Γράφημα 1.2: Γεωγραφική κατανομή μονάδων αφαλάτωσης παγκοσμίως

Πηγή: Wang L., Chen J., Hung J., Shammas N., Membrane and desalination technologies, Handbook of environmental engineering, Volume 13, p. 527, Humana Press (Springer), 2011

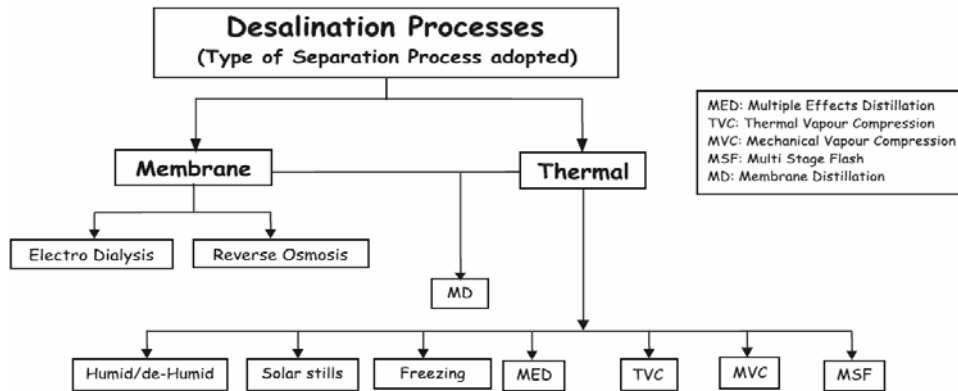
1.6 Μέθοδοι αφαλάτωσης

Οι μέθοδοι αφαλάτωσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάσει των εξής κριτηρίων:

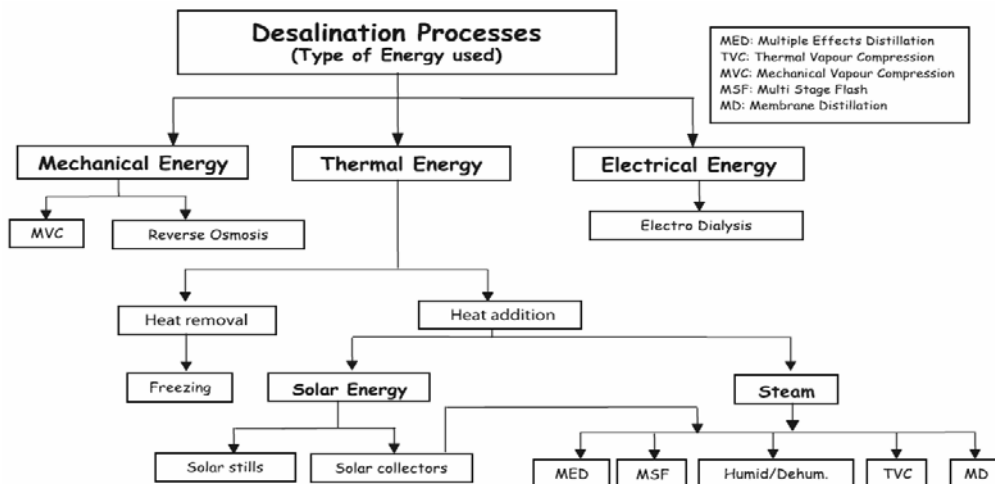
- Του τμήματος που αφαιρείται από το υδατικό διάλυμα
 - Αφαίρεση νερού
 - Αφαίρεση αλάτων
- Του τύπου της διεργασίας διαχωρισμού
 - Μέθοδοι μεμβρανών
 - Θερμικές μέθοδοι
- Του τύπου ενέργειας που χρησιμοποιείται
 - Μηχανική ενέργεια
 - Θερμική ενέργεια
 - Ηλεκτρική ενέργεια [13]



Εικόνα 1.3: Διεργασίες αφαλάτωσης βάση του αφαιρούμενου υλικού από το υδατικό διάλυμα



Εικόνα 1.4: Διεργασίες αφαλάτωσης βάση του τύπου της διεργασίας διαχωρισμού



Εικόνα 1.5: Διεργασίες αφαλάτωσης βάση του τύπου ενέργειας που χρησιμοποιείται

Πηγή: Cipollina A., Micale G., Rizzuti L., Seawater desalination - conventional and renewable energy processes, Green energy and technology volumes, p. 7-8, Springer, 2009

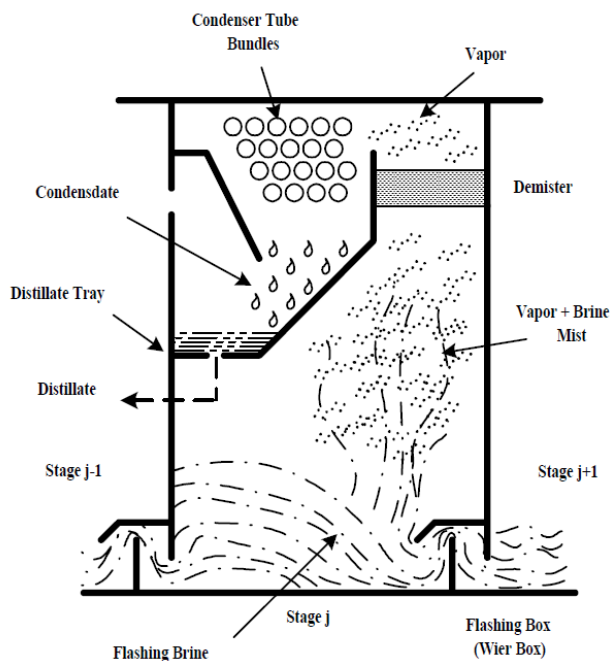
Η πιο δημοφιλής, ίσως, κατηγοριοποίηση στην διεθνή βιβλιογραφία είναι βάση του τύπου διεργασίας διαχωρισμού. Ακολουθώντας λοιπόν αυτόν τον τρόπο κατάταξης, οι κυριότερες μέθοδοι αφαλάτωσης που έχουν ευρεία εφαρμογή σήμερα είναι:

1.6.1 Θερμικές μέθοδοι

➤ Πολυβάθμια εκρηκτική εξάτμιση (Multi Stage Flash Distillation – MSF)

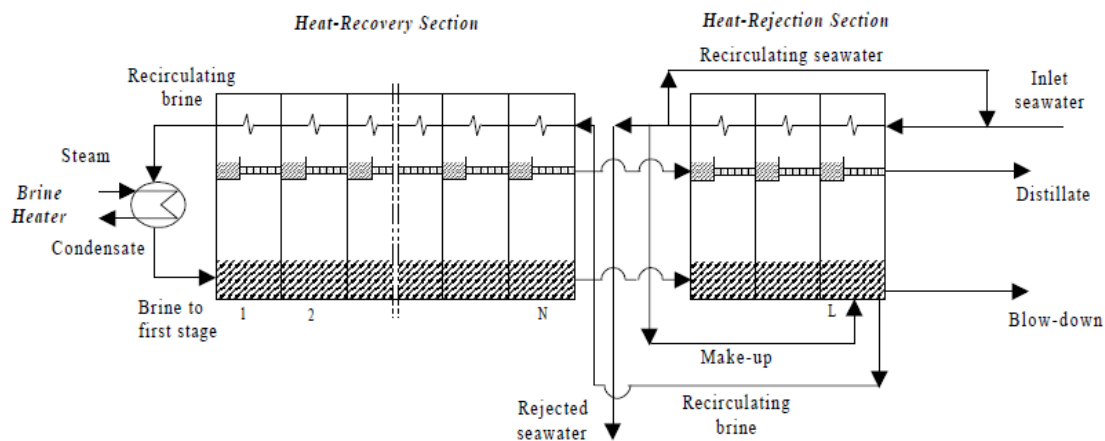
Στην πολυβάθμια εκρηκτική εξάτμιση (MSF), μία ποσότητα αλμυρού νερού θερμαίνεται υπό μια ορισμένη πίεση, σε θερμοκρασία ελάχιστα χαμηλότερη από αυτή του σημείου βρασμού του και στην συνέχεια εισάγεται σε ένα θάλαμο ο οποίος βρίσκεται σε χαμηλότερη πίεση από αυτή του διαλύματος, όπου προκαλείται απότομος (εκρηκτικός) βρασμός του διαλύματος. Σε όλη την μάζα του υγρού σχηματίζονται στιγμιαία φυσαλίδες και το νερό εξατμίζεται μέχρι του σημείου όπου επέρχεται ισορροπία του διαλύματος με τους σχηματιζόμενους ατμούς (υπό συγκεκριμένη πίεση). Ο ατμός έρχεται σε επαφή με τους σωλήνες που μεταφέρουν το ψυχρότερο αλμυρό νερό και υγροποιείται. Στη συνέχεια συλλέγεται ως καθαρό νερό.

Ο εκρηκτικός βρασμός με τον σχηματισμό ατμών έχει σαν αποτέλεσμα την ψύξη του διαλύματος. Η ψύξη αυτή είναι σημαντική π.χ. για την εξάτμιση περίπου του 7% μίας ποσότητας θαλασσινού νερού αρχικής θερμοκρασίας 100 °C, η θερμοκρασία του φθάνει μετά την εξάτμιση περίπου τους 60 °C. Για να είναι δυνατή μία νέα εκρηκτική εξάτμιση στην επόμενη βαθμίδα πρέπει η πίεση στο θάλαμο να είναι χαμηλότερη από αυτή που αντιστοιχεί στο σημείο βρασμού του διαλύματος στην προηγούμενη βαθμίδα. [3,9]



Εικόνα 1.6: Βαθμίδα εκτόνωσης της μεθόδου MSF

Πηγή: Al - Shayji K. A., *Modeling, simulation and optimization of large-scale commercial desalination units*, Doctoral Thesis, p.30, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 1998



Εικόνα 1.7: Σχηματική αναπαράσταση μονάδας MSF με ανακυκλοφορία άλμης

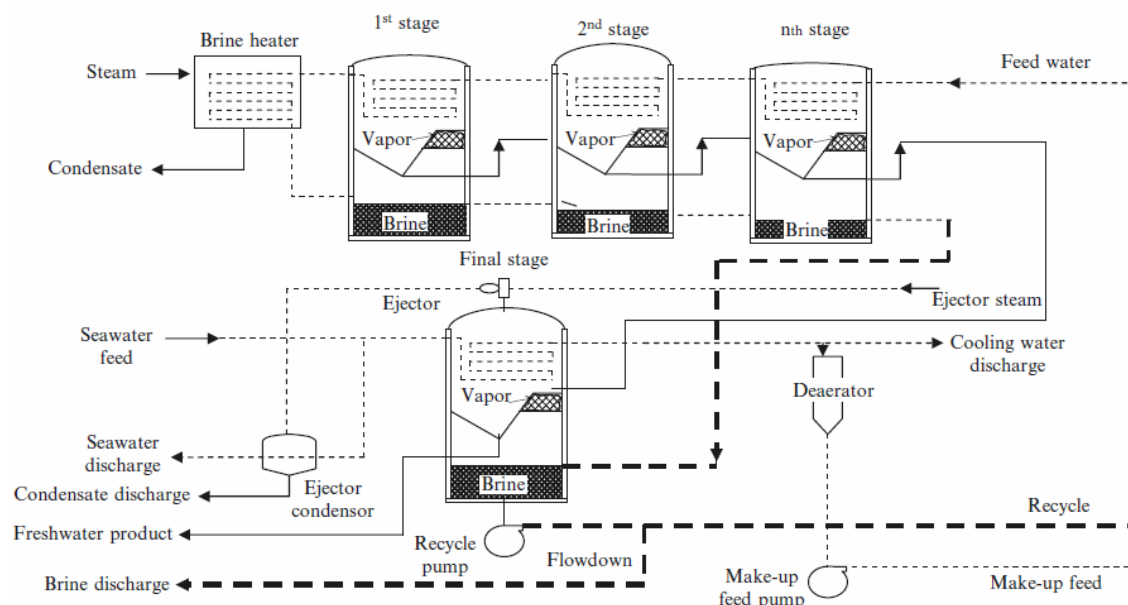
Πηγή: Al - Shayji K. A., *Modeling, simulation and optimization of large-scale commercial desalination units*, Doctoral Thesis, p.29, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 1998

➤ Πολυβάθμια εξάτμιση (Multiple Effect Distillation - MED)

Στην πολυβάθμια εξάτμιση ο ατμός περνάει μέσα από σωλήνες, ενώ το ψυχρό αλμυρό νερό ψεκάζεται πάνω τους, δημιουργώντας ένα πολύ λεπτό στρώμα νερού, το οποίο εξατμίζεται άμεσα. Έτσι, μέρος του ατμού συμπυκνώνεται και συλλέγεται σαν καθαρό νερό, ενώ συνεχίζουν στην επόμενη βαθμίδα ο υπόλοιπος ατμός μαζί με το υπόλοιπο αλμυρό νερό που απέμεινε από την ατμοποίηση.

Σε κάθε θάλαμο υπάρχει αντλία κενού που υποβοηθά την εξάτμιση, με βαθμιαία μειούμενη πίεση σε κάθε βαθμίδα, που ισούται με την πίεση κορεσμού στην αντίστοιχη θερμοκρασία του κάθε θαλάμου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να είναι δυνατή η λειτουργία τόσο σε υψηλή, όσο και σε χαμηλή θερμοκρασία. Συχνά, η μέγιστη θερμοκρασία βρασμού μπορεί να είναι μέχρι και 55 °C, έτσι ώστε να αποφεύγεται η διάβρωση και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί χαμηλού επιπέδου απορριπτόμενη θερμότητα από άλλες θερμικές διεργασίες.

Στη μέθοδο αυτή συχνά χρησιμοποιούνται και συμπιεστές (μηχανικοί ή θερμικοί), ενώ οι παραλλαγές της προκύπτουν απ' την οριζόντια ή κάθετη διάταξη των σωλήνων ατμού και τη φορά του ατμού σε σχέση με την άλμη (ομορροή ή αντιρροή). [3,4]



Εικόνα 1.8: Σχηματική αναπαράσταση μονάδας MED οριζόντιας διάταξης

Πηγή: Wang L., Chen J., Hung J., Shammas N., Membrane and desalination technologies, Handbook of environmental engineering, Volume 13, p. 535, Humana Press (Springer), 2011

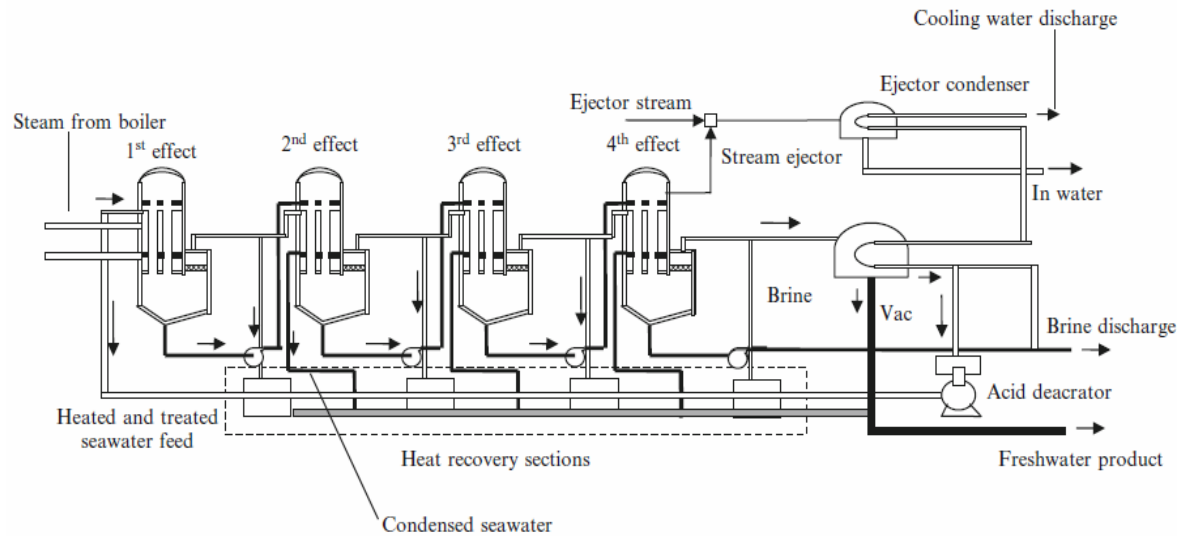
➤ Εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών (Vapor Compression – VC)

Είναι μια μέθοδος εξάτμισης, που αξιοποιεί μια ιδιότητα του νερού (ύπαρξη διαφορετικών σημείων βρασμού ανάλογα με την πίεση). Έχει δύο συνιστώσες:

- την μηχανική επανασυμπίεση ατμών (Mechanical Vapor Compression – MVC)
- την θερμική επανασυμπίεση ατμών (Thermal Vapor Compression – TVC)

Στην πρώτη περίπτωση, η διαδικασία περιλαμβάνει τη μηχανική συμπίεση του ατμού και την αξιοποίηση της λανθάνουσας θερμότητας της εξάτμισης μέσω του συμπιεστή-εναλλάκτη θερμότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με την μηχανική συμπίεση των ατμών σε υψηλότερη πίεση, και την επαναθέρμανση των ατμών σε κατάλληλη πίεση και θερμοκρασία, ώστε η ενέργεια που προστίθεται στο σύστημα να αντισταθμίζει τις απώλειες πίεσης και να κρατά το διάλυμα στο σημείο βρασμού.

Θερμότητα από εξωτερική πηγή παρέχεται στο σύστημα, μόνο κατά την έναρξη της λειτουργίας της εγκατάστασης και για το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να φτάσει το διάλυμα τροφοδότησης στο σημείο βρασμού. Με τη διακοπή παροχής ενέργειας το σύστημα διατηρείται σε λειτουργία μόνο από την προσφερόμενη ενέργεια του συμπιεστή και από πιθανή συμπλήρωση των απωλειών θερμότητας. Η υπόλοιπη εξωτερική ενέργεια που απαιτείται για την εγκατάσταση, είναι αυτή για την κίνηση των αντλιών κυκλοφορίας των διαλυμάτων. Στη δεύτερη περίπτωση, η διαδικασία είναι η ίδια εκτός από τη συμπίεση των ατμών, η οποία γίνεται θερμικά, με εκτόξευση ατμού. [2,3]

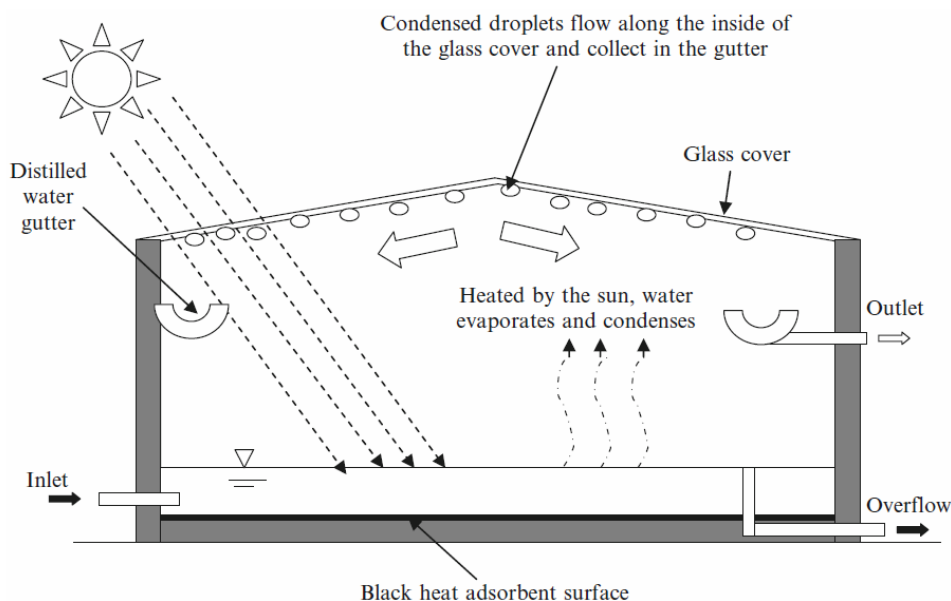


Εικόνα 1.9: Σχηματική αναπαράσταση μονάδας VC 4 βαθμίδων

Πηγή: Wang L., Chen J., Hung J., Shammas N., Membrane and desalination technologies, Handbook of environmental engineering, Volume 13, p. 536, Humana Press (Springer), 2011

➤ Ηλιακή απόσταξη (Solar Stills)

Η μέθοδος που χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια στην αφαλάτωση, βασίζεται στην αρχή του θερμοκηπίου. Οι εγκαταστάσεις αυτές έχουν ελάχιστο ή μηδενικό κόστος λειτουργίας εφόσον δεν χρησιμοποιούν κανενός είδους καύσιμο, και ως εκ τούτου δεν ρυπαίνουν καθόλου το περιβάλλον: οι ακτίνες του ήλιου διέρχονται μέσα από μια διαφανή οροφή και θερμαίνουν το αλμυρό νερό που βρίσκεται στον πυθμένα. Αυτό εξατμίζεται και ανεβαίνει στην οροφή που είναι κεκλιμένη, οπότε συμπυκνώνεται πάλι και συλλέγεται ως προϊόν από κατάλληλη διάταξη. Η μέγιστη θερμοκρασία ενός τέτοιου θερμοκηπίου φτάνει περίπου τους 45 - 55 °C το καλοκαίρι. [4,13]



Εικόνα 1.10: Σχηματική αναπαράσταση μονάδας ηλιακής απόσταξης

Πηγή: Wang L., Chen J., Hung J., Shammam N., *Membrane and desalination technologies, Handbook of environmental engineering, Volume 13, p. 538, Humana Press (Springer), 2011*

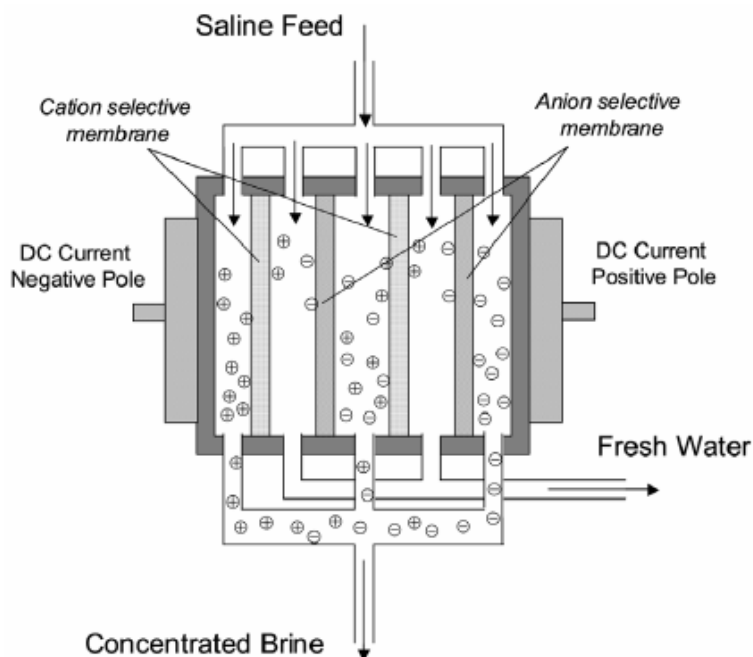
1.6.2 Μέθοδοι με μεμβράνες

➤ Ηλεκτροδιάλυση (Electro Dialysis - ED)

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

Επειδή με τη μέθοδο αυτή, τα άλατα μεταφέρονται μέσω της μεμβράνης εναλλαγής ιόντων προς μια μόνο κατεύθυνση, υπάρχει ως συνέπεια ο σχηματισμός ενός υμένα επικαθίσεων στην επιφάνεια της μεμβράνης. Συνεπώς, λόγω συσσώρευσης, αυξάνεται η συγκέντρωση του ρεύματος και μειώνεται η μεταφορά των ιόντων, έως ότου η συγκέντρωση του ρεύματος φθάσει την οριακή τιμή, όπου σταματάει η αφαλάτωση και αρχίζει η διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο. Το κελί ηλεκτροδιάλυσης πλέον μετατρέπεται σε κελί ηλεκτρόλυσης.

Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού, εφαρμόζεται η τεχνική της ανάστροφης ηλεκτροδιάλυσης (Electro Dialysis Reversal – EDR), όπου το συνεχές ρεύμα αλλάζει πολικότητα 3-4 φορές την ώρα, απαλλάσσοντας τη μεμβράνη από τις επικαθίσεις. [3]



Εικόνα 1.11: Σχηματική αναπαράσταση διεργασίας ηλεκτροδιάλυσης

Πηγή: Μουτάφης Π., Κάλυψη ζήτησης ενέργειας και νερού με αιολική ενέργεια και αφαλάτωση στη νήσο Σίκινο, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π. - Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, 2008

➤ Αντίστροφη Όσμωση (Reverse Osmosis - RO)

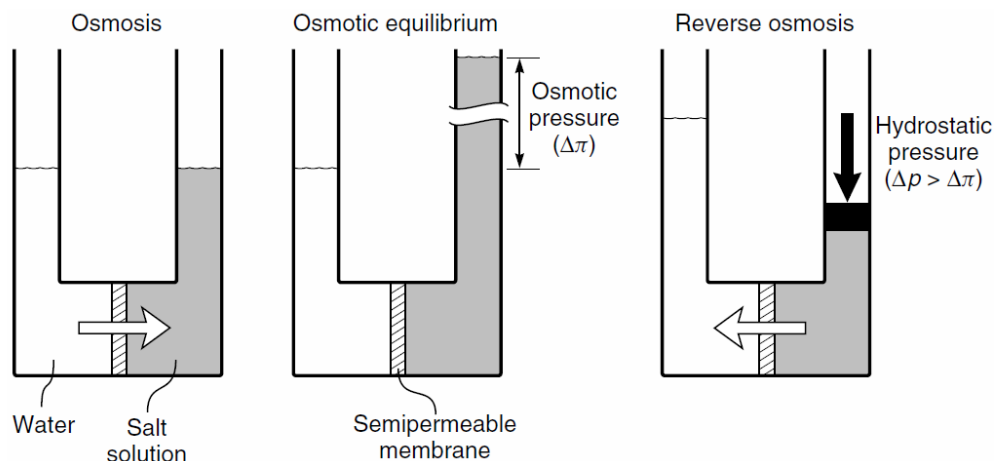
Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου στηρίζεται στην αντιστροφή του φυσικού φαινομένου της όσμωσης. Φυσιολογικά, όταν δυο υγρά με διαφορετική συγκέντρωση σε άλατα τοποθετηθούν σε δοχείο και χωριστούν με μια ημιπερατή μεμβράνη, τότε το υγρό με την χαμηλότερη συγκέντρωση μετακινείται προς το υγρό με την υψηλότερη συγκέντρωση. Η οσμωτική ροή από το αραιότερο προς το πυκνότερο υγρό συνεχίζεται, μέχρι να επιτευχθεί μια κατάσταση ισορροπίας, η οποία χαρακτηρίζεται από την υψηλότερη στάθμη του αλατούχου διαλύματος και η διαφορά της στάθμης των διαλυμάτων αντιστοιχεί στην οσμωτική πίεση. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται όσμωση.

Αν όμως ασκηθεί πίεση στο αλατούχο διάλυμα, υψηλότερη της οσμωτικής, τότε η ροή αντιστρέφεται και έχουμε έξοδο καθαρού νερού από το αλατούχο διάλυμα προς το διαλύτη. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αντίστροφη όσμωση.

Η αφαλάτωση μέσω αντίστροφης όσμωσης αποτελεί ίσως την πιο ελπιδοφόρα μέθοδο ανάκτησης πόσιμου νερού από θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό και θα αναλυθεί διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο. [2,3]

2.1 Αντίστροφη όσμωση - γενικά στοιχεία

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η διεργασία της αντίστροφης όσμωσης είναι συνέπεια της εφαρμογής μιας εξωτερικής πίεσης, μεγαλύτερης της οσμωτικής, σε ένα πυκνό διάλυμα το οποίο διαχωρίζεται από ένα αραιότερο διάλυμα με μία ημιπερατή μεμβράνη.



Εικόνα 2.1: Σχηματική επεξήγηση αντίστροφης όσμωσης

Πηγή: Baker R., *Membrane technology and applications*, 2nd edition, p.30, Wiley, 2004

Στο δοχείο που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, σύμφωνα με τα παραπάνω, παρατηρείται διάχυση νερού από τον θάλαμο μικρότερης συγκέντρωσης στο θάλαμο μεγαλύτερης συγκέντρωσης, μέσω της μεμβράνης, λόγω της διαφοράς χημικού δυναμικού στις δύο πλευρές της.

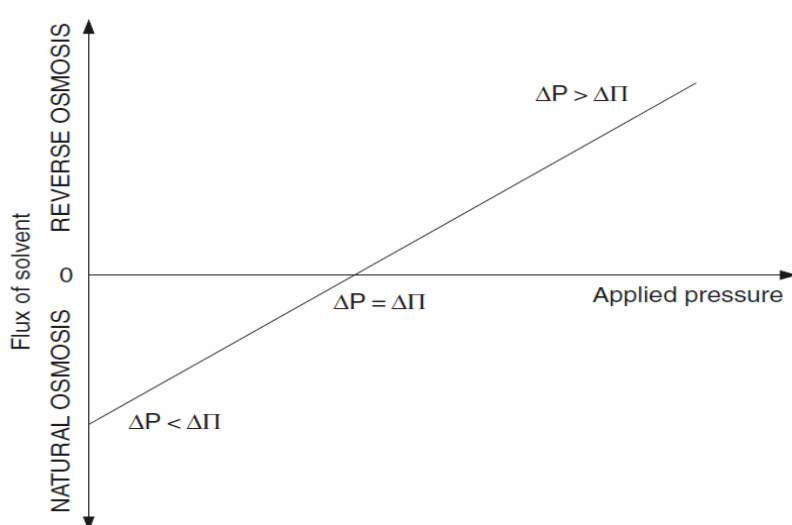
Η κινητικότητα των μορίων του νερού στη διεπιφάνεια νερού - μεμβράνης είναι μεγαλύτερη από αυτή των αλάτων, με αποτέλεσμα τα άλατα να απορρίπτονται από την μεμβράνη και να παραμένουν στο θάλαμο με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση. Το καθαρό νερό που διαχέεται μέσα από την μεμβράνη ελαττώνει την πίεση και αυξάνει την συγκέντρωση των αλάτων του καθαρού νερού, ενώ συγχρόνως αραιώνει το πυκνότερο διάλυμα (αλμυρό νερό) και αυξάνει την πίεση στο αντίστοιχο θάλαμο. Η αύξηση αυτή εμφανίζεται ως υδροστατική διαφορά της στάθμης των δύο διαλυμάτων. Η αύξηση αυτή της υδροστατικής πίεσης έχει ως συνέπεια την βαθμιαία ελάττωση της ροής του νερού. Σε κάποιο σημείο της διεργασίας, η αύξηση της υδροστατικής πίεσης αντισταθμίζει τη ροή και αποκαθίσταται μια κινητική ισορροπία, όπου το νερό ρέει και προς τις δύο κατευθύνσεις με τον ίδιο ρυθμό. Στο σημείο ισορροπίας, η υδροστατική διαφορά πίεσης ονομάζεται οσμωτική πίεση ($\Delta\pi$) και το φαινόμενο συνολικά καλείται όσμωση.

Εάν εφαρμοστεί μια εξωτερική πίεση ($\Delta\rho$) στην επιφάνεια του αλμυρού νερού, μεγαλύτερη της οσμωτικής, το φαινόμενο της όσμωσης αντιστρέφεται και τα μόρια του νερού διαχέονται από το θάλαμο υψηλής συγκέντρωσης προς το θάλαμο χαμηλής συγκέντρωσης. Η ταχύτητα ροής του νερού είναι ανάλογη με την κινούμενη δύναμη της αντίστροφης, δηλαδή τη διαφορά $\Delta\rho - \Delta\pi$. [3]

Η αριθμητική τιμή της οσμωτικής πίεσης είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης του νερού σε άλατα και της θερμοκρασίας του, και είναι ανεξάρτητη από τη μεμβράνη. Περιγράφεται μαθηματικά από την παρακάτω εξίσωση, που καθιέρωσε ο Van't Hoff:

$$\Pi = RT \sum_i v_i c_i$$

- $R =$ παγκόσμια σταθερά αερίων ($8,3144 \frac{J}{mol \cdot K}$)
- $T =$ θερμοκρασία σε Kelvin
- $v_i =$ συντελεστής Van't Hoff του i ιόντος
- $c_i =$ συγκέντρωση του i ιόντος [13]



Γράφημα 2.1: Ροή ενός διαλύτη δια μέσω ημιπερατής μεμβράνης ως συνάρτηση της ασκούμενης πίεσης

Πηγή: Cipollina A., Micale G., Rizzuti L., *Seawater desalination - conventional and renewable energy processes, Green energy and technology volumes*, p. 55, Springer, 2009

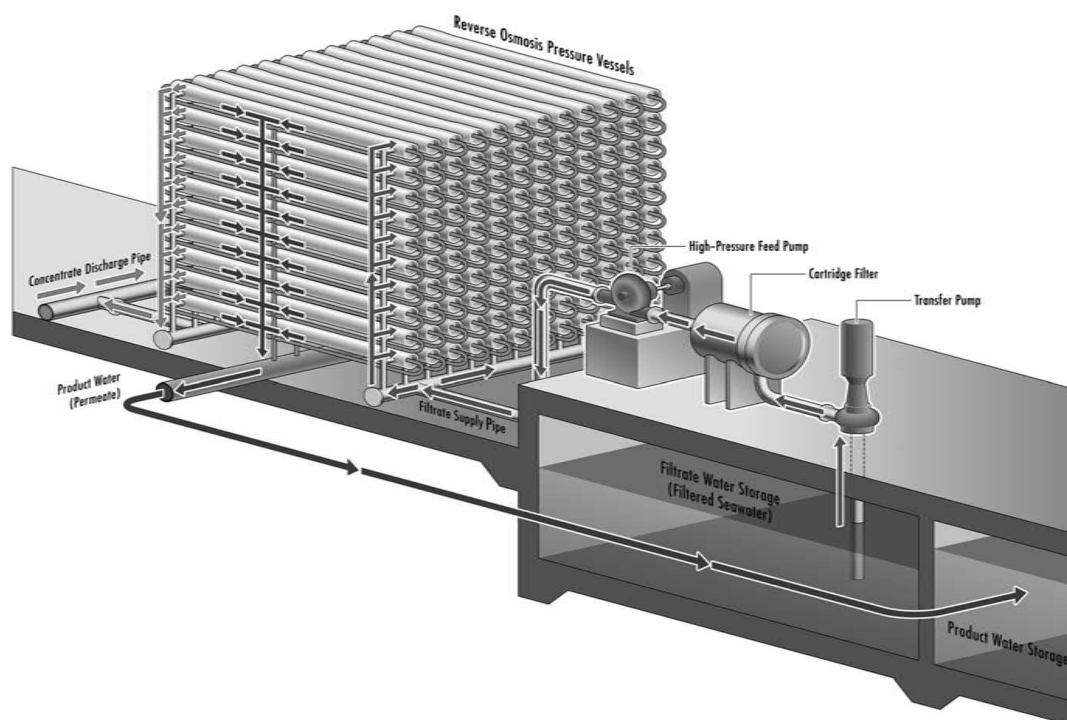
Για παράδειγμα, θαλασσινό νερό αλμυρότητας 35.000 ppm έχει οσμωτική πίεση 27,5 bar, ενώ στα 43.000 ppm η πίεση ανέρχεται στα 33,3 bar, σε θερμοκρασία 25 °C. [37]

2.2 Περιγραφή της διεργασίας αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση

Η αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση, όπως έχει αναφερθεί, μπορεί να εφαρμοστεί είτε σε θαλασσινό, είτε σε υφάλμυρο νερό με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η περίπτωση του θαλασσινού νερού ως πρώτη ύλη, αποτελεί εξαιρετικής σημασίας περίπτωση, διότι όπως είναι γνωστό, τα μεγαλύτερο μέρος των υδατικών αποθεμάτων του πλανήτη βρίσκεται σε μορφή αλμυρού νερού στις θάλασσες. Η αξιοποίηση αυτού λοιπόν, του δυναμικού αποτελεί άμεσο στόχο για να λυθούν τα προβλήματα λειψυδρίας, σε περιοχές που βρέχονται από θάλασσα και δεν έχουν πρόσβαση σε γλυκό νερό ή είναι ασύμφορη η μεταφορά του εκεί.

Οι μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με αντίστροφη όσμωση ακολουθούν μια πορεία λειτουργίας, η οποία μπορεί να χωριστεί σύμφωνα με τη σειρά των σταδίων που την αποτελούν. Συνοπτικά λοιπόν έχουμε: [19]

- Τροφοδοσία θαλασσινού νερού
- Προκατεργασία νερού τροφοδότησης
- Συμπίεση προκατεργασμένου νερού τροφοδότησης σε αντλία υψηλής πίεσης
- Αφαλάτωση του νερού σε μονάδα αντίστροφης όσμωσης
- Ανάκτηση ενέργειας μέσω απόρριψης της άλμης
- Τελική κατεργασία του αφαλατωμένου νερού
- Απόρριψη του υπολείμματος (άλμης)



Εικόνα 2.2: Τρισδιάστατη απεικόνιση διάταξης μονάδας αφαλάτωσης RO

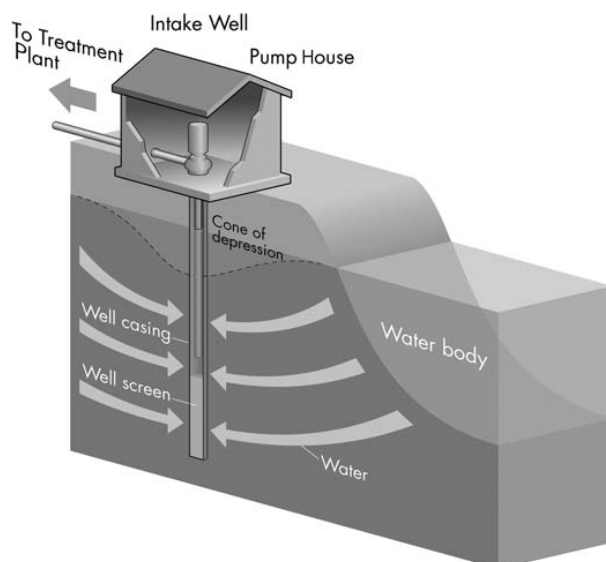
Πηγή: Li N., Fane A., Winston W.H., Matsuura T., *Advanced membrane technology and applications*, p. 65, Wiley, 2008

2.2.1 Τροφοδοσία θαλασσινού νερού

Οι εγκαταστάσεις άντλησης του θαλασσινού νερού αποτελούν το πρώτο βασικό σημείο της εγκατάστασης, διότι πρέπει να εξασφαλίζεται η συνεχής και επαρκής τροφοδοσία θαλασσινού νερού στη μονάδα. Υπάρχουν δύο διαμορφώσεις στις εγκαταστάσεις τροφοδοσίας:

- Η επιφανειακή άντληση
- Η υπόγεια άντληση από πηγάδι (φρέαρ)

Η επιλογή γίνεται ανάλογα με τη δυναμικότητα της μονάδας και τη θέση της ως προς τη θάλασσα. [19]



Εικόνα 2.3: Υπόγεια άντληση θαλασσινού νερού από παραλιακό πηγάδι

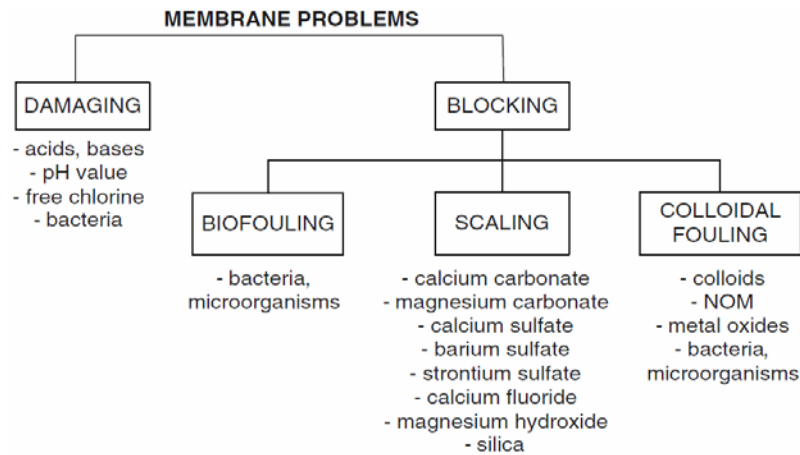
Πηγή: Li N., Fane A., Winston W.H., Matsuura T., *Advanced membrane technology and applications*, p. 52, Wiley, 2008

2.2.2 Προκατεργασία νερού τροφοδότησης

Το θαλασσινό νερό που χρησιμοποιείται στην αφαλάτωση, περιέχει πλήθος συστατικών, που πρέπει να απομακρυνθούν πλήρως ή να μειωθεί δραστικά ο αριθμός τους, ώστε να καταστεί δυνατή η διεργασία της αντίστροφης όσμωσης.

Πέραν των αλάτων, περιέχονται διάφορα αιωρούμενα συστατικά, κολλοειδείς ουσίες και μικροοργανισμοί, όπου η παρουσία τους ρυπαίνει και αποσθρώνει τις μεμβράνες, ελαττώνοντας έτσι την απόδοση της εγκατάστασης και το χρόνο ζωής των μεμβρανών. Ειδικότερα παρουσιάζονται προβλήματα όπως:

- ◆ Επιθέματα (scaling) στην επιφάνεια των μεμβρανών από υπέρβαση του ορίου διαλυτότητας ή λόγω σχηματισμού αδιάλυτων αλάτων εξαιτίας τοπικών αντιδράσεων.
- ◆ Επικάθιση στην επιφάνεια της μεμβράνης κολλοειδών συστατικών
- ◆ Προσρόφηση από τις πολυμερείς ομάδες της μεμβράνης, διαφόρων μακρομορίων που περιέχονται στο νερό και σχηματισμός λεπτού στρώματος ζελατινοειδούς μορφής
- ◆ Απόφραξη των καναλιών κυκλοφορίας της άλμης, από τα λεπτά αιωρούμενα σωματίδια.

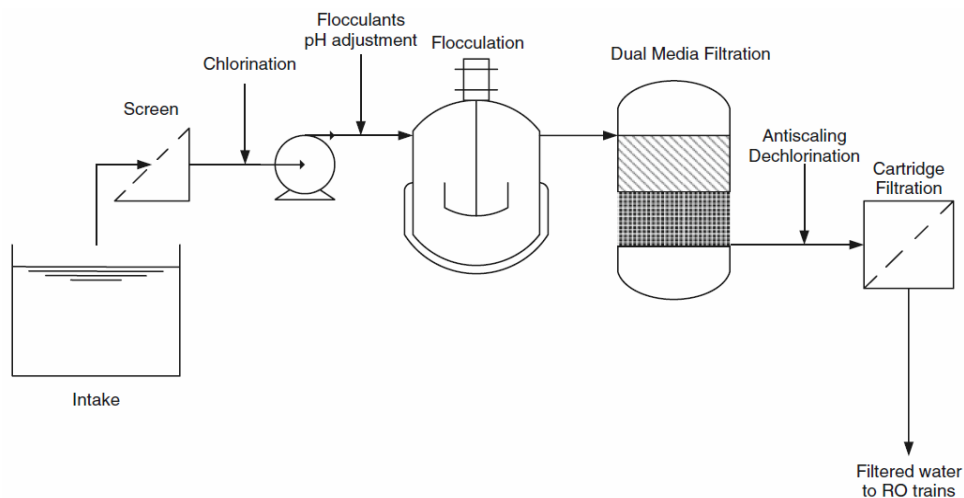


Εικόνα 2.4: Κατηγοριοποίηση προβλημάτων των μεμβρανών λόγω νερού τροφοδότησης

Πηγή: Cipollina A., Micale G., Rizzuti L., *Seawater desalination - conventional and renewable energy processes, Green energy and technology volumes*, p. 61, Springer, 2009

Συνεπώς, είναι απαραίτητο το στάδιο της προκατεργασίας του νερού τροφοδότησης, ώστε να αποφευχθούν τα προαναφερθέντα προβλήματα. [3] Μια συνήθης αντιμετώπιση του προβλήματος περιέχει τα παρακάτω στάδια:

- Διαχωρισμός σωματιδίων μεγάλου μεγέθους ($> 10\text{mm}$) με στατικά κόσκινα/σχάρες (screens)
- Προσθήκη χλωρίου (chlorination), κροκιδωτικών μέσων (flocculation agents), και οξέως για τη ρύθμιση του pH (acid addition)
- Πήξη/κροκιδωση (coagulation/flocculation)
- Φιλτράρισμα μέσω φίλτρων άμμου και φίλτρων διπλού μέσου άμμου - ανθρακίτη (slow sand filters/dual media sand - anthracite filters)
- Αποχλωρίωση / καθαρισμός επικαθίσεων (dechlorination/antiscalants)
- Φιλτράρισμα σωματιδίων μεγέθους 5-10 μm μέσω φίλτρων τύπου cartridge (cartridge filters) [13]



Εικόνα 2.5: Διάγραμμα ροής προκατεργασίας θαλασσινού νερού

Πηγή: Cipollina A., Micale G., Rizzuti L., *Seawater desalination - conventional and renewable energy processes, Green energy and technology volumes*, p. 67, Springer, 2009

2.2.3 Μεταφορά προκατεργασμένου νερού μέσω αντλιών υψηλής πίεσης

Μετά την ολοκλήρωση της προκατεργασίας, το νερό τροφοδότησης περνά από τις αντλίες υψηλής πίεσης, όπου αυξάνεται η πίεσή του στο βαθμό που απαιτείται από τη διεργασία. Η πίεση μετά το στάδιο αυτό κυμαίνεται συνήθως στα 55 – 85 bar, όμως η τιμή αυτή καθορίζεται από την περιεκτικότητα σε άλατα του νερού τροφοδότησης και τη διαμόρφωση της μονάδας αφαλάτωσης. [19]



Εικόνα 2.6: Αντλία υψηλής πίεσης κατάλληλη για αντίστροφη όσμωση

Πηγή: www.ksb.com

2.2.4 Αφαλάτωση του νερού σε μονάδα αντίστροφης όσμωσης

Τα στοιχεία μεμβρανών (modules) αποτελούν την καρδιά της μονάδας αφαλάτωσης, διότι εκεί επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός νερού και αλάτων. Τα βασικά δομικά στοιχεία ενός στοιχείου μεμβρανών είναι:

- Οι μεμβράνες διαχωρισμού
- Το δοχείο πίεσης (pressure vessel) με τον βοηθητικό εξοπλισμό

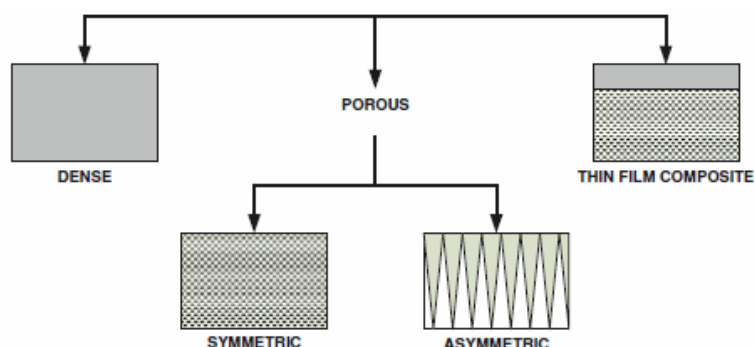
Ο σχεδιασμός των στοιχείων είναι κατάλληλος, ώστε το υψηλής πίεσης προκατεργασμένο νερό τροφοδοσίας να μεταφέρεται στην επιφάνεια της μεμβράνης, όπου εκεί γίνεται ο διαχωρισμός, και στη συνέχεια να συλλέγεται το αφαλατωμένο νερό (permeate) ξεχωριστά από το απορριπτόμενο ρεύμα της άλμης (retentate/concentrate). [35]

Το σημαντικότερο μέρος ενός στοιχείου, όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, αποτελούν οι μεμβράνες διαχωρισμού. Υπάρχει μια σχετικά μεγάλη ποικιλία σε είδη μεμβρανών σήμερα, όμως οι κυριότερες μεμβράνες που χρησιμοποιούνται στην αντίστροφη όσμωση περιορίζονται σε 2-3 κατηγορίες. Παρακάτω περιγράφεται η τεχνολογία, τα στοιχεία των μεμβρανών και οι διαμορφώσεις τους που χρησιμοποιούνται σε εμπορικές εφαρμογές.

2.2.4.1 Μεμβράνες διαχωρισμού

Οι μεμβράνες διαχωρισμού αποτελούν ουσιαστικά μια λεπτή πολυμερική διεπιφάνεια επαφής, που καθορίζει τη διέλευση των χημικών ειδών με τα οποία βρίσκεται σε επαφή. Μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως προς μορφολογία τους σε: [11,13]

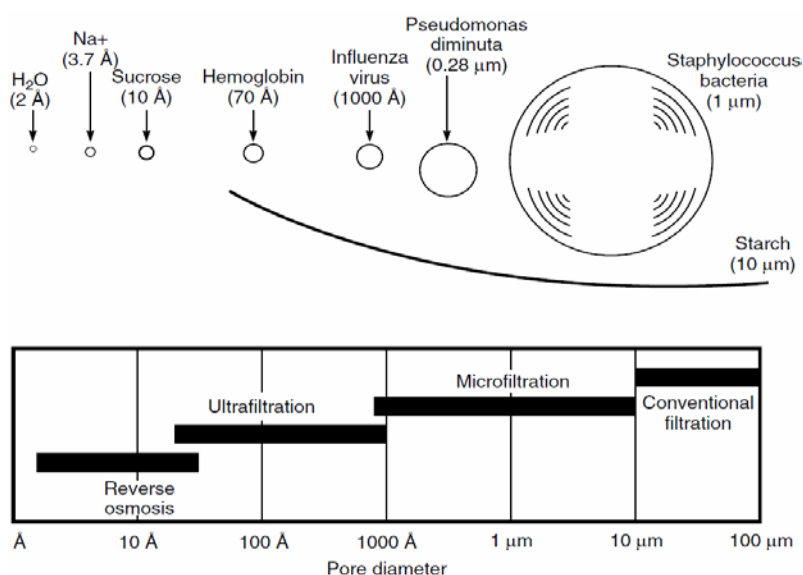
- Πυκνής δομής
- Πορώδους δομής, με δύο υποκατηγορίες:
 - ο Συμμετρικές
 - ο Ασύμμετρες (ανισοτροπικές)
- Σύνθετες λεπτού υμενίου



Εικόνα 2.7: Μορφολογική κατηγοριοποίηση μεμβρανών

Πηγή: Cipollina A., Micale G., Rizzuti L., *Seawater desalination - conventional and renewable energy processes, Green energy and technology volumes*, p. 43, Springer, 2009

Στην περίπτωση των μεμβρανών πορώδους μορφής, μια περαιτέρω κατηγοριοποίηση ως προς το μέγεθος των πόρων είναι αυτή που εμφανίζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.8: Κατηγοριοποίηση μεμβρανών βάση διαμέτρου των πόρων

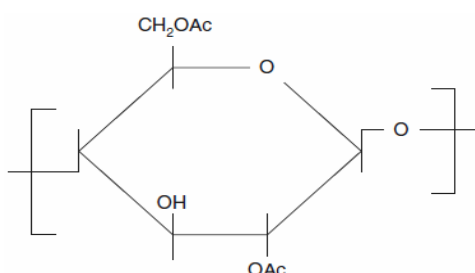
Πηγή: Baker R., *Membrane technology and applications*, 2nd edition, p.7, Wiley, 2004

Στην περίπτωση της αντίστροφης όσμωσης οι μεμβράνες, που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι κυρίως 3 τύπων:

1. Μεμβράνες οξεικής κυτταρίνης (cellulose acetate membranes - CA)

Οι μεμβράνες οξεικής κυτταρίνης είναι οι πρώτες που χρησιμοποιήθηκαν για αντίστροφη όσμωση σε βιομηχανικό επίπεδο το 1960. Από τότε, έχουν αντικατασταθεί σε μεγάλο ποσοστό από διαφορετικού υλικού μεμβράνες, καθώς παρουσιάζουν ευπάθεια στη χημική και βιολογική διάβρωση και χρησιμοποιούνται σε στενά όρια pH. Έχουν όμως το πλεονέκτημα της αντοχής στο χλώριο, του χαμηλού κόστους και της μακροχρόνιας παρουσίας στην αγορά.

Είναι ασύμμετρες πορώδεις μεμβράνες που αποτελούνται κατά βάση από οξεική κυτταρίνη και συναντώνται συνήθως στη μορφή της τριοξεικής κυτταρίνης (tri-acetate cellulose). [3,19]



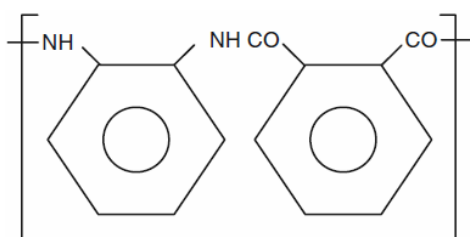
Εικόνα 2.9: Δομή οξεικής κυτταρίνης

Πηγή: Cipollina A., Micale G., Rizzuti L., *Seawater desalination - conventional and renewable energy processes, Green energy and technology volumes*, p. 47, Springer, 2009

2. Μεμβράνες αρωματικών πολυαμιδίων (aromatic polyamide membranes - PA)

Οι μεμβράνες αρωματικών πολυαμιδίων σχεδιάστηκαν για να ξεπεράσουν τα προβλήματα των αντίστοιχων της οξεικής κυτταρίνης. Βρήκαν τεράστια απήχηση τις προηγούμενες δεκαετίες, λόγω κυρίως της εταιρίας DuPont, η οποία χρησιμοποίησε τις μεμβράνες αυτές σε διάταξη κοίλων ινών, με την ονομασία Permasep B-9 και B-10. Από το 2001 οι μεμβράνες αυτές αποσύρθηκαν από την DuPont και πλέον χρησιμοποιούνται σε σύνθετες μορφές (composite polyamide) από άλλες εταιρίες.

Είναι ασύμμετρες μεμβράνες και χρησιμοποιούνται συνήθως σε διατάξεις ενός σταδίου, με τροφοδοσία θαλασσινού νερού. [19]



Εικόνα 2.10: Δομή αρωματικών πολυαμιδίων

Πηγή: Cipollina A., Micale G., Rizzuti L., *Seawater desalination - conventional and renewable energy processes, Green energy and technology volumes*, p. 47, Springer, 2009

3. Σύνθετες μεμβράνες λεπτού υμενίου (thin film composite membranes - TFC)

Οι σύνθετες μεμβράνες λεπτού υμενίου ξεκίνησαν να παρασκευάζονται τη δεκαετία του 1970, λόγω κυρίως της αδυναμίας των πολυμερικών συστατικών των άλλων τύπων, να σχηματίσουν ασύμμετρες μεμβράνες με επιθυμητά πάχη. Έτσι, άρχισαν να παρασκευάζονται μεμβράνες με πορώδες υπόστρωμα (πχ. οξεική κυτταρίνη), στην επιφάνεια του οποίου αποτίθεται με ψεκασμό ή εμβάπτιση λεπτό υμένιο.

Σήμερα, οι σύνθετες μεμβράνες έχουν πολύ ευρεία χρήση στην αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση και αποτελούν τον τομέα, όπου διεξάγεται και η μεγαλύτερη έρευνα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σύνθετης μεμβράνης αποτελεί η μεμβράνη αρωματικών πολυαμιδίων διασταυρούμενων αλυσίδων (cross-linked aromatic polyamide composite membrane). [3,19]

| Parameter | Thin-Film Composite Membranes | Cellulose Acetate Membranes |
|-------------------------------|--|--|
| Salt rejection, % | Higher (>99.6%) | Lower (Up to 99.5%) |
| Net driving pressure, bars | Lower (10–15 bars) | Higher (15–30 bars) |
| Surface charge | Anionic (limits use of cationic pretreatment coagulants) | Neutral (no limitations on pretreatment coagulants) |
| Chlorine tolerance | Poor (Up to 1000 ppm-h) feed dechlorination needed | Good; continuous feed of 1–2 ppm of chlorine is acceptable |
| Cleaning frequency | High (weeks to months) | Lower (months to years) |
| Pretreatment requirements | High (SDI < 4) | Lower (SDI < 5) |
| Organics removal | High | Relatively lower |
| Biogrowth on membrane surface | May cause performance problems | Limited—not a cause of performance problems |
| pH tolerance | High (1–13) | Limited (4–6) |

Πίνακας 2.1: Συγκριτικός πίνακας μεμβρανών για χρήση σε αφαλάτωση

Πηγή: Li N., Fane A., Winston W.H., Matsuura T., *Advanced membrane technology and applications*, p. 66, Wiley, 2008

2.2.4.2 Διαμόρφωση μεμβρανών των στοιχείων αφαλάτωσης

Τα στοιχεία μεμβρανών χωρίζονται σε τέσσερις κύριους τύπους, ανάλογα με τη μορφή που λαμβάνει το σύστημα μεμβράνη – δοχείο πίεσης:

I. Στοιχεία κοίλων ινών (hollow fiber modules)

Τα στοιχεία αυτά αποτελούνται από χιλιάδες κοίλες ίνες ασύμμετρων μεμβρανών, με μέγεθος όσο περίπου μία ανθρώπινη τρίχα, τοποθετημένα κατά το διαμήκη άξονα του κυλινδρικού δοχείου πίεσης στο οποίο περιέχονται. Συγκεκριμένα, οι κοίλες ίνες έχουν διαστάσεις εσωτερικής διαμέτρου 0,1 – 50 μm και εξωτερικής διαμέτρου 0,5 – 100 μm και σχηματίζουν ένα κυλινδρικό θύσανο διαμέτρου 5 – 10 cm, ο οποίος βρίσκεται μέσα στο δοχείο πίεσης.

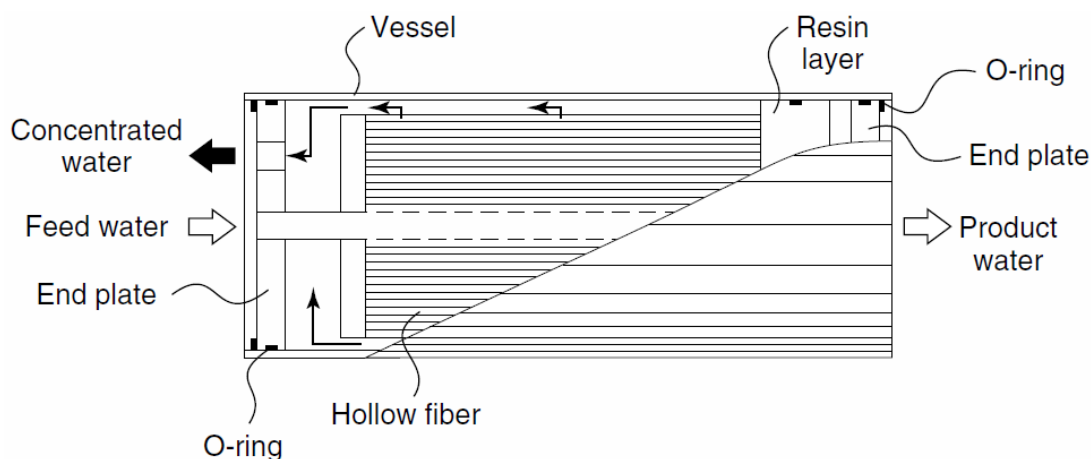
Η μεταφορά του νερού γίνεται ακτινικά, μέσω σωλήνα τροφοδοσίας στο εσωτερικό του δοχείου, από την εξωτερική πλευρά της μεμβράνης προς την εσωτερική κοιλότητα των ινών. Έτσι, το αφαλατωμένο νερό, μεταφέρεται μέσω των κοίλων ινών προς το άκρο του δοχείου πίεσης, απ' όπου και εξέρχεται, ενώ το απορριπτόμενο ρεύμα (άλμη) εξέρχεται από διαφορετικό σημείο του δοχείου, χωρίς να έρχεται σε επαφή με το αφαλατωμένο νερό.

Τα στοιχεία αυτά διαθέτουν τη μεγαλύτερη επιφάνεια μεμβράνης ανά στοιχείο, παρουσιάζουν όμως τη μικρότερη ροή, αλλά και ευαισθησία σε ρύπανση και επικαθίσεις. Σημαντικοί εκπρόσωποι της κατηγορίας αυτής, αποτέλεσαν τα στοιχεία της DuPont B-10, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά κόρον τις περασμένες δεκαετίες. [3,11,13,29]



Εικόνα 2.11: Εγκάρσια τομή κοίλης ίνας – στοιχείου κοίλων ινών

Πηγή: Li N., Fane A., Winston W.H., Matsuura T., *Advanced membrane technology and applications*, p. 137, Wiley, 2008



Εικόνα 2.12: Σχηματική απεικόνιση στοιχείου κοίλων ινών σε διαμήκη τομή

Πηγή: Baker R., *Membrane technology and applications*, 2nd edition, p.148, Wiley, 2004

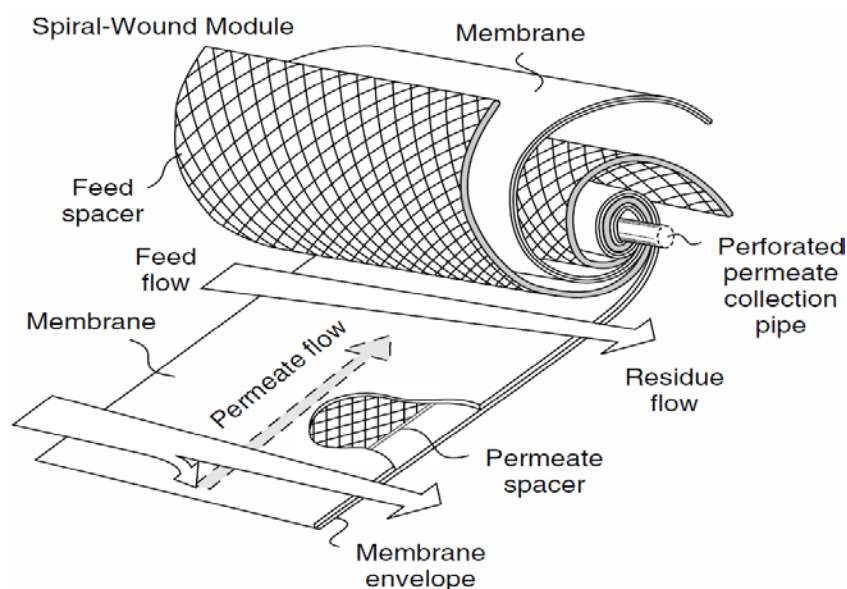
II. Στοιχεία σπειροειδούς περιέλιξης (spiral wound modules)

Τα στοιχεία σπειροειδούς περιέλιξης αποτελούνται από πολλές επίπεδες μεμβράνες, οι οποίες ανά δύο συγκολλούνται από τρεις πλευρές σχηματίζοντας ένα είδος φακέλου. Μεταξύ των μεμβρανών τοποθετείται ένα στήριγμα από πορώδες υλικό, το οποίο συγκρατεί τις μεμβράνες ξεχωριστά εμποδίζοντας τες να ενωθούν εξαιτίας της επικρατούσας πίεσης. Οι δύο άκρες των μεμβρανών του ανοικτού τμήματος προσκολλώνται σε ένα σωλήνα με οπές, από όπου απομακρύνεται το αφαλατωμένο νερό.

Συνήθως τοποθετούνται ως και 26 φάκελοι μεμβρανών στον κεντρικό σωλήνα. Οι φάκελοι χωρίζονται μεταξύ τους από πλαστικό πλέγμα, το οποίο ονομάζεται 'χώρισμα του καναλιού της άλμης'. Το σύστημα φακέλων - χωρισμάτων τυλίγεται γύρω από τον κεντρικό σωλήνα τροφοδοσίας, μέσα στο κυλινδρικό δοχείο πίεσης, σχηματίζοντας έτσι την σπειροειδή περιέλιξη.

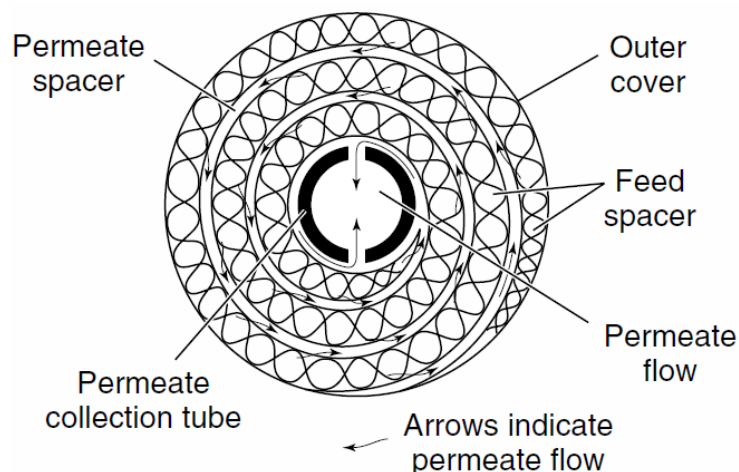
Η ροή του νερού τροφοδοσίας είναι αξονική και παράλληλη με το απορριπτόμενο υγρό (άλμη), ενώ το αφαλατωμένο νερό ρέει ακτινικά ως προς το δοχείο πίεσης και κατά μήκος των μεμβρανών. Κάθε δοχείο πίεσης περιέχει συνήθως 4-6 στοιχεία μεμβρανών, έχει μήκος περίπου 1m (40 inches) και διάμετρο περίπου 10 cm (4 inches) [3,11,29,35]

Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στις σύγχρονες εγκαταστάσεις αφαλάτωσης, καθώς το χαμηλό τους κόστος σε συνδυασμό με τη ευκολία στον καθαρισμό που παρέχουν, τα καθιστούν πολύ ελκυστικά.



Εικόνα 2.13: Σχηματική απεικόνιση στοιχείου σπειροειδούς περιέλιξης

Πηγή: Baker R., Membrane technology and applications, 2nd edition, p.144, Wiley, 2004



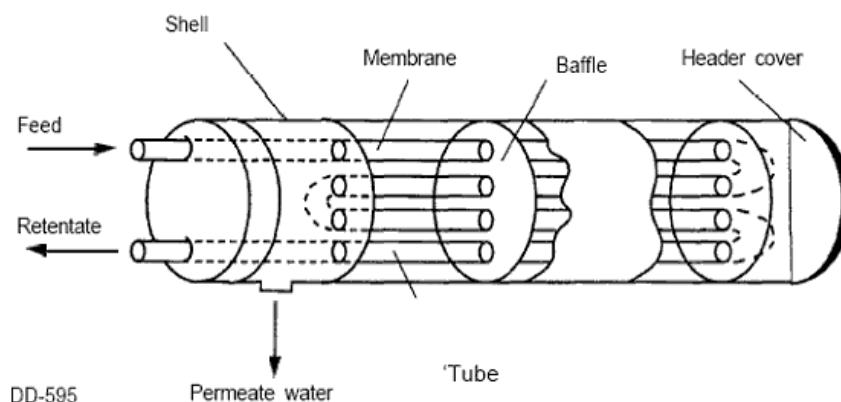
Εικόνα 2.14: Εγκάρσια τομή στοιχείου σπειροειδούς περιέλιξης

Πηγή: Baker R., *Membrane technology and applications*, 2nd edition, p.144, Wiley, 2004

III. Σωληνωτά στοιχεία (tubular modules)

Τα σωληνωτά στοιχεία μοιάζουν, ως προς τη διάταξη, με τα στοιχεία κοίλων ινών. Οι μεμβράνες σχηματοποιούνται σε σωλήνες διαμέτρου 0,7 - 2,5 cm και τοποθετούνται κατά μήκος του κυλινδρικού δοχείου πίεσης. Το νερό τροφοδότησης ρέει κατά μήκος των σωληνωτών μεμβρανών και το αφαλατωμένο νερό ρέει ακτινικά ως προς τη ροή τροφοδοσίας. Η απορριπτόμενη άλμη εξέρχεται από το άκρο του στοιχείου, με κατεύθυνση ομόροπη ή αντίροπη σε σχέση με την τροφοδοσία.

Τα στοιχεία αυτά δεν χρησιμοποιούνται σήμερα σχεδόν καθόλου στις μονάδες αντίστροφης όσμωσης, αλλά βρίσκουν εφαρμογή σε περιπτώσεις υπερδιήθησης και μικροδιήθησης (πχ. συμπύκνωση φρουτοχυμών), όπου το όφελος που προκύπτει από την αντίσταση των στοιχείων στη ρύπανση, ξεπερνά το υψηλό τους κόστος. [3,11]



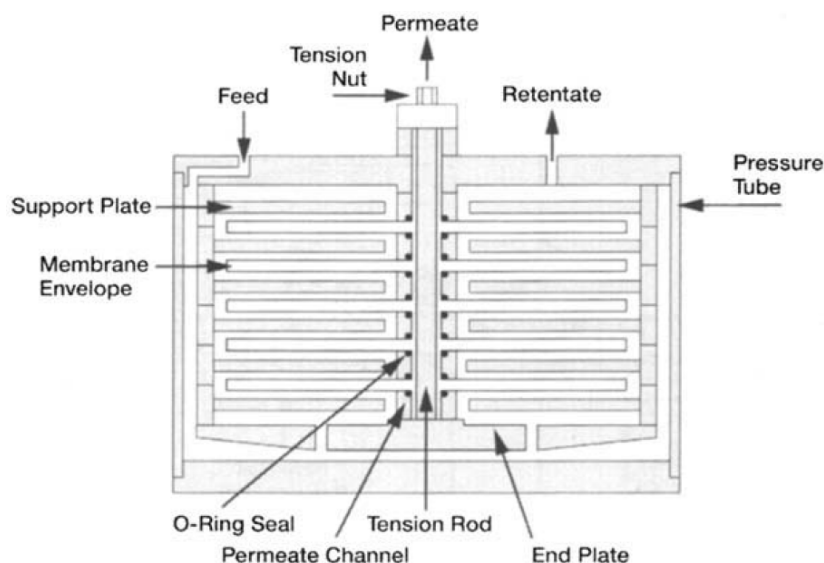
Εικόνα 2.15: Σχηματική απεικόνιση σωληνωτού στοιχείου

Πηγή: Baker R., *Membrane technology and applications*, 2nd edition, p.143, Wiley, 2004

IV. Στοιχεία με δίσκους και πλαίσια (plate-and-frame modules)

Τα στοιχεία μεμβρανών με δίσκους και πλαίσια αποτελούνται από επίπεδες μεμβράνες, οι οποίες τοποθετούνται ανάμεσα σε δίσκους. Οι δίσκοι τοποθετούνται αλληλάλληλα σε κατακόρυφη διάταξη και χωρίζονται μεταξύ τους από πλαίσια, που φέρουν κανάλια για την κυκλοφορία του νερού. Το όλο σύστημα τοποθετείται σε ένα κατακόρυφο δοχείο (σωλήνα) πίεσης.

Τα στοιχεία αυτά επιτυγχάνουν πολύ υψηλές πιέσεις λειτουργίας (ως 120 bar) και υψηλό βαθμό συμπύκνωσης, σε σχέση με τα άλλα στοιχεία, όμως το κόστος τους είναι ιδιαίτερα υψηλό και ως εκ τούτου, δεν χρησιμοποιούνται στην αφαλάτωση νερού, αλλά σε άλλες διεργασίες χημικής μηχανικής. [3,35]



Εικόνα 2.16: Σχηματική απεικόνιση στοιχείου με δίσκους και πλαίσια

Πηγή: Kucera J., *Reverse osmosis - industrial applications and processes*, p. 59, Scrivener Publishing (Wiley), 2010

| Membrane material | Module type | Company |
|--------------------------------|-----------------|--------------------------------------|
| Asymmetric aramid | Spiral-wound | Du Pont (USA) |
| Asymmetric cellulose acetate | Spiral-wound | Toray (Japan) |
| | Spiral-wound | Desalination system (USA) |
| | Plate and frame | DDS (Denmark) |
| | Tubular | Paterson Candy (UK) |
| Asymmetric poly(acrylonitrile) | Spiral-wound | Sumitomo (Japan) |
| | Hollow fiber | Toyobo (Japan) |
| Cellulose acetate | Hollow fiber | Osmonics (USA) |
| | Spiral-wound | Hydranautics/Nitto Denko (USA/Japan) |
| | Spiral-wound | Du Pont (USA) |
| Composite aramid | Spiral-wound | Du Pont (USA) |
| Composite cellulose acetate | Spiral-wound | Toray (Japan) |
| Composite PEC | Spiral-wound | Fluid system/UOP |
| | Spiral-wound | Desalination system (USA) |
| Composite polyamide | Plate and frame | DDS (Denmark) |
| | Tubular | Paterson Candy (UK) |
| | Spiral-wound | Hydranautics/Nitto Denko (USA/Japan) |

Πίνακας 2.2: Εμπορικά διαθέσιμα στοιχεία αφαλάτωσης (2011)

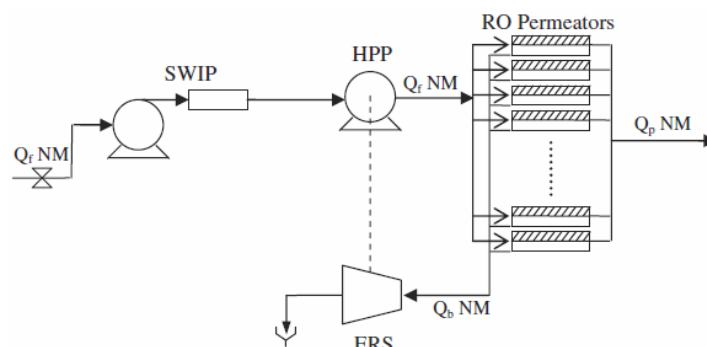
Πηγή: Wang L., Chen J., Hung J., Shammas N., *Membrane and desalination technologies, Handbook of environmental engineering, Volume 13*, p. 571, Humana Press (Springer), 2011

2.2.4.3 Διαμόρφωση μονάδας αφαλάτωσης

Τα στοιχεία μεμβράνης, εκτός της περίπτωσης των στοιχείων με δίσκους και πλαίσια, τοποθετούνται παράλληλα, σε σειρά ή σε συνδυασμό, ώστε να δημιουργηθεί μια διαμόρφωση κατάλληλη για τη αποτελεσματικότητα της διεργασίας. Η διαμόρφωση επιλέγεται ανάλογα με τις συνθήκες του νερού τροφοδοσίας και κυρίως ανάλογα με τις απαιτήσεις για το αφαλατωμένο νερό σε άλατα, βόριο, χλώριο κλπ. Οι πιο συνήθεις διαμορφώσεις που συναντώνται στην πράξη είναι:

i. Διαμόρφωση μονού σταδίου

Στην περίπτωση αυτή τα στοιχεία (modules) τοποθετούνται παράλληλα με κοινή είσοδο και έξοδο. Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα ανακυκλοφορίας της άλμης για μεγαλύτερη ανάκτηση. Είναι πολύ δημοφιλής διαμόρφωση, καθώς χρησιμοποιείται από πολλές μικρές και μεσαίες μονάδες παγκοσμίως. Η ανάκτηση που επιτυγχάνουν (αφαλατωμένο νερό / συνολική τροφοδοσία) κυμαίνεται μεταξύ 15 - 40%. Η μέγιστη δυνατή ποιότητα νερού που παράγουν είναι ως 200 ppm άλατα (TDS), 100 ppm χλώριο και 0,5 ppm βόριο, που είναι μέσα στα αποδεκτά όρια για χρήση από τον άνθρωπο.

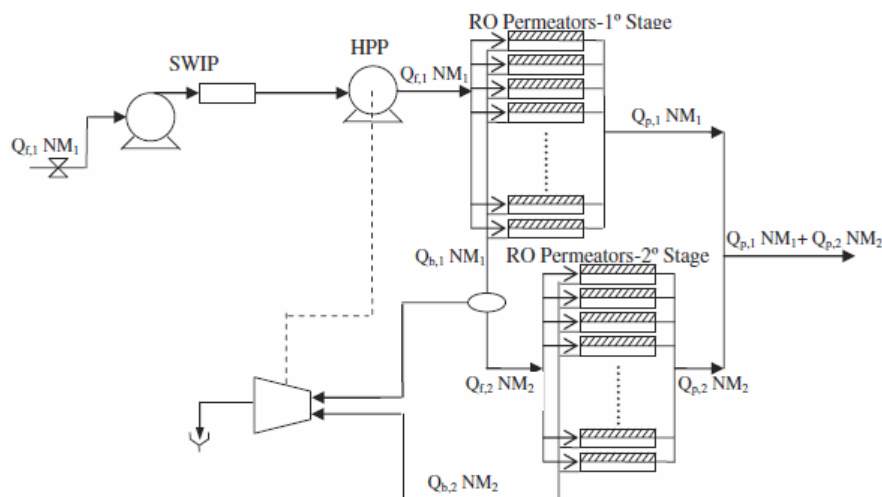


Εικόνα 2.17: Διαμόρφωση μονού σταδίου

Πηγή: Marcovecchio M., Aguirre P., Scenna N., Global optimal design of RO networks for SW desalination: modeling and algorithm, *Desalination* 184 (1-3), p. 260, Elsevier, 2005

ii. Διαμόρφωση πολλαπλών σταδίων

Στην περίπτωση αυτή τα στοιχεία (modules) τοποθετούνται σε σειρά ανά στάδια. Δηλαδή, η είσοδος του επόμενου σταδίου είναι είτε το αφαλατωμένο νερό του προηγούμενου, είτε η απορριπτόμενη άλμη. Συνήθως, χρησιμοποιούνται δύο στάδια και σε λίγες περιπτώσεις τρία και περισσότερα. Η διαμόρφωση αυτή επιλέγεται όταν υπάρχει ανάγκη για νερό υψηλής καθαρότητας ή μεγάλη ανάκτηση προϊόντος. Λόγω της ύπαρξης περισσότερων του ενός σταδίων, η ανάκτηση που επιτυγχάνεται κυμαίνεται μεταξύ 60 - 85%, ανάλογα με τον αριθμό των σταδίων. Το μειονέκτημα αυτών των διαμορφώσεων είναι το υψηλότερο κόστος και η μεγάλη πολυπλοκότητα των εγκαταστάσεων σε σχέση με την περίπτωση μονού σταδίου. [19]



Εικόνα 2.18: Διαμόρφωση δύο σταδίων

Πηγή: Marcovecchio M., Aguirre P., Scenna N., Global optimal design of RO networks for SW desalination: modeling and algorithm, Desalination 184 (1-3), p. 260, Elsevier, 2005

2.2.5 Ανάκτηση ενέργειας μέσω απόρριψης της άλμης

Η αφαλάτωση θαλασσινού νερού αποτελεί μια διεργασία υψηλής έντασης ενέργειας. Η κατανάλωση ενέργειας από την αντλία υψηλής πίεσης για τη μεταφορά του προκατεργασμένου νερού, συνεισφέρει σχεδόν κατά 80% στο συνολικό ποσό ενέργειας που απαιτείται, και εν τέλει στο ενεργειακό κόστος της μονάδας. Συνεπώς, είναι φανερή η ανάγκη για λήψη μέτρων ενεργειακής εξοικονόμησης.

Οι μεθοδολογίες εξοικονόμησης ενέργειας στρέφονται κυρίως στην ανάκτηση ενέργειας από το απορριπτόμενο ρεύμα της άλμης. Στην περίπτωση αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με μέσο όρο μετατροπής 15-40%, η πίεση λειτουργίας κυμαίνεται συνήθως στα 55 – 70 bar, οπότε και η πίεση της εξερχόμενης άλμης κυμαίνεται μεταξύ 50 – 65 bar. Το δυναμικό αυτό, λοιπόν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει τις ενεργειακές ανάγκες της εγκατάστασης, κυρίως μέσω υποβοήθησης της αντλίας υψηλής πίεσης. [13,19,35]

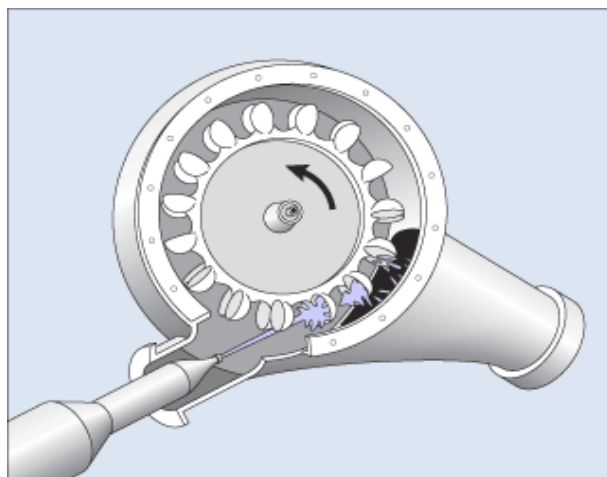
Τα συστήματα ανάκτησης ενέργειας (energy recovery systems – ERS) κατηγοριοποιούνται, ως προς την διάταξη εξοικονόμησης που χρησιμοποιείται, σε :

- Συστήματα ανάκτησης υδραυλικής ενέργειας (hydraulic energy recovery systems)
 - ♦ Υδροστρόβιλοι Pelton (Pelton wheel turbines)
 - ♦ Φυγοκεντρικές αντλίες αντίστροφης λειτουργίας (reverse running centrifugal pumps)
- Συστήματα άμεσης ανάκτησης ενέργειας / ισοβαρή συστήματα ανάκτησης (direct energy recovery systems / isobaric systems)
 - ♦ Εναλλάκτες πίεσης (έργου) (pressure/work exchangers)

a. Υδροστρόβιλοι Pelton (Pelton wheel turbines)

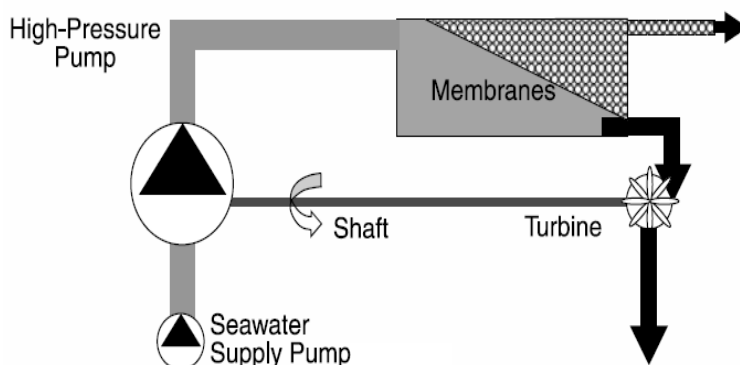
Οι υδροστρόβιλοι Pelton αποτελούν ένα δοκιμασμένο σύστημα ανάκτησης ενέργειας, με πάνω από 30 χρόνια επιτυχούς εφαρμογής. Η λειτουργία του βασίζεται στον τροχό Pelton (Pelton wheel), όπου οδηγείται το ρεύμα της άλμης και κινεί τον άξονα που είναι προσαρμοσμένος στη διάταξη. Ο άξονας αυτός είναι άμεσα συνδεδεμένος με τον κινητήρα της αντλίας υψηλής πίεσης, ώστε να μειώνει το φορτίο της αντλίας και να εξοικονομεί ενέργεια.

Το βασικό μειονέκτημα της διάταξης αυτής είναι οι διπλές απώλειες που υπάρχουν κατά τη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική (περιστροφική) και εκ νέου σε υδραυλική. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η απόδοση της διάταξης να κυμαίνεται γύρω στο 80%. [19]



Εικόνα 2.19: Απεικόνιση λειτουργίας υδροστρόβιλου Pelton

Πηγή: www.isoenergy.co.uk



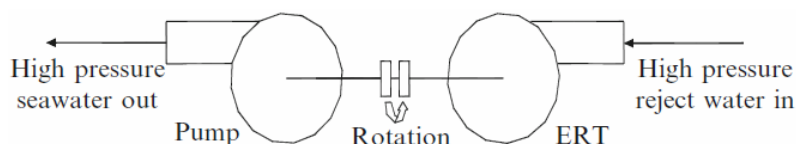
Εικόνα 2.20: Απεικόνιση ανάκτησης ενέργειας μέσω υδροστρόβιλου Pelton

Πηγή: Li N., Fane A., Winston W.H., Matsuura T., *Advanced membrane technology and applications*, p. 89, Wiley, 2008

b. Φυγοκεντρικές αντλίες αντίστροφης λειτουργίας (reverse running centrifugal pumps)

Οι φυγοκεντρικές αντλίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως στρόβιλοι ανάκτησης υδραυλικής ενέργειας (hydraulic energy recovery turbines), εάν αντιστραφεί η ροή εισόδου και η περιστροφή της φτερωτής. Λειτουργούν κατά τον ίδιο τρόπο με τους υδροστρόβιλους Pelton, μεταφέρουν δηλαδή μέσω άξονα στην αντλία υψηλής πίεσης την ενέργεια που ανακτούν. Αποτελούν δημοφιλή συστήματα με ευρεία χρήση σε παλιότερες μονάδες αφαλάτωσης.

Παρουσιάζουν το ίδιο μειονέκτημα με τους υδροστρόβιλους Pelton, δηλαδή τη μειωμένη απόδοση λόγω διπλής μετατροπής της ενέργειας. Η απόδοση της διάταξης κυμαίνεται γύρω στο 75 - 80% για τις σύγχρονες εφαρμογές. [17,35]



Εικόνα 2.21: Απεικόνιση ανάκτησης ενέργειας μέσω φυγοκεντρικής αντλίας αντίστροφης λειτουργίας

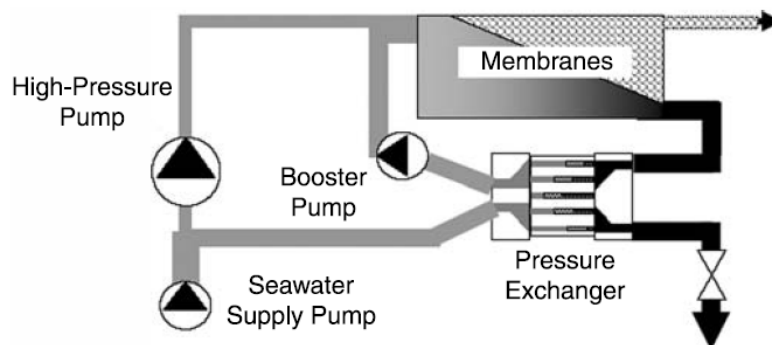
Πηγή: Wang L., Chen J., Hung J., Shammam N., Membrane and desalination technologies, Handbook of environmental engineering, Volume 13, p. 578, Humana Press (Springer), 2011

c. Εναλλάκτες πίεσης (έργου) (pressure/work exchangers)

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990 άρχισε να χρησιμοποιείται ένα νέο σύστημα για ανάκτηση ενέργειας σε μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού αντίστροφης όσμωσης. Το σύστημα αυτό ονομάζεται εναλλάκτης πίεσης και λειτουργεί ως αντλία θετικής εκτοπίσεως. Η σημαντική του διαφορά από τα προηγούμενα συστήματα είναι ότι δεν είναι συνδεδεμένο με την αντλία υψηλής πίεσης, αλλά λειτουργεί παράλληλα με αυτή. Έτσι, επιτυγχάνει βαθμό απόδοσης κοντά στο 95%.

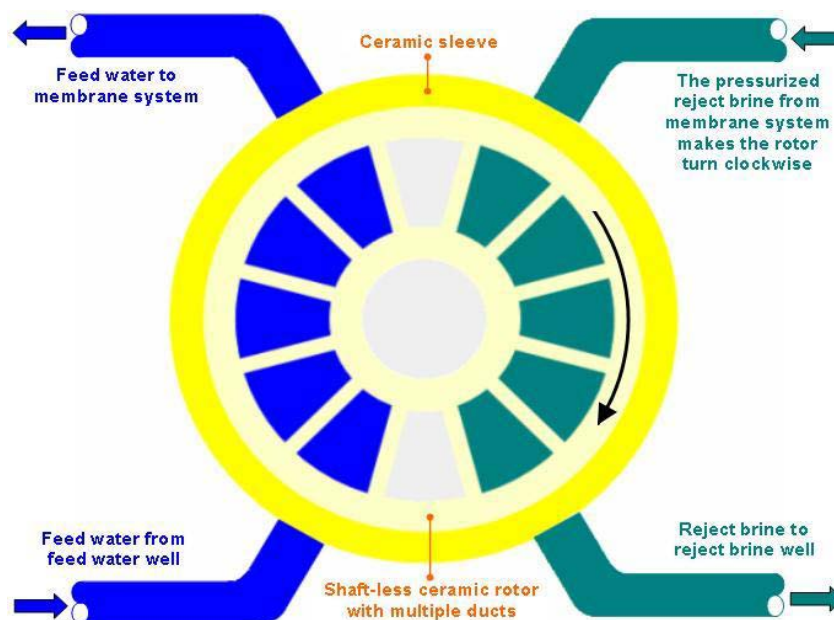
Η διάταξη αποτελείται από ένα πλαστικό δοχείο πίεσης, στο οποίο βρίσκεται ένα κεραμικός σωλήνας και μέσα του, ένας κεραμικός ρότορας, ο οποίος περιστρέφεται πάνω σε ένα λεπτό υμένιο νερού. Με την είσοδο στη διάταξη της άλμης υψηλής πίεσης, ο ρότορας περιστρέφεται και εκτοπίζει το θαλασσινό νερό υπό υψηλή πίεση και απορρίπτει την άλμη σε χαμηλότερη πίεση. Το θαλασσινό νερό υψηλής πίεσης διοχετεύεται σε μια βοηθητική αντλία, η οποία το μεταφέρει στην εγκατάσταση.

Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ανάκτηση ενέργειας, και επίσης μειώνεται η απαιτούμενη δυναμικότητα της αντλίας υψηλής πίεσης. Τα μειονεκτήματα που έχουν αυτές οι διατάξεις είναι το υψηλό αρχικό κόστος και την αύξηση κατά 1 - 2% της αλμυρότητας του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας, λόγω ανάμειξης του με το ρεύμα της άλμης. [19]



Εικόνα 2.22: Απεικόνιση ανάκτησης ενέργειας μέσω εναλλάκτη πίεσης

Πηγή: Li N., Fane A., Winston W.H., Matsuura T., *Advanced membrane technology and applications*, p. 93, Wiley, 2008



Εικόνα 2.23: Εγκάρσια τομή συστήματος εναλλάκτη πίεσης

Πηγή: www.hohusa.net

2.2.6 Τελική κατεργασία του αφαλατωμένου νερού

Η ποιότητα του αφαλατωμένου νερού που εξέρχεται από τις μεμβράνες εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα του νερού τροφοδότησης και την διάταξη της μονάδας. Μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού μονού σταδίου επεξεργασίας (single stage seawater desalination units) επιτυγχάνουν τη μείωση των αλάτων υπό την έννοια των ολικών διαλυμένων στερεών (total dissolved solids - TDS) στα όρια των 500 ppm, αλλά και τη μείωση της συγκέντρωσης βορίου στο 1 ppm.

Η τιμή αυτή της συγκέντρωσης βορίου στο διάλυμα είναι αποδεκτή σύμφωνα με τις οδηγίες της Ε.Ε. για την ποιότητα του νερού. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας δίνει ως όριο το 0,5 ppm, ειδικά για περιπτώσεις χρήσης του νερού σε καλλιέργειες ευαίσθητων φυτών σε βόριο. Συνεπώς, αν και γενικά η ποιότητα του εξερχόμενου αφαλατωμένου νερού ως προς βόριο είναι αποδεκτή, μπορεί να πραγματοποιηθεί περαιτέρω μείωση του βορίου μέσω:

- αύξησης των σταδίων επεξεργασίας του θαλασσινού νερού
- επεξεργασίας του αφαλατωμένου νερού από:
 - ο Μembrάνες ηλεκτροδιάλυσης
 - ο Ρητίνες ιοντοεναλλαγής

Πέρα από βόριο, το αφαλατωμένο νερό παρουσιάζει συνήθως και άλλο ένα πρόβλημα: την έλλειψη μεταλλικών στοιχείων (Ca, Mg). Και στην περίπτωση αυτή το αποτέλεσμα είναι αποδεκτό για χρήση από τους ανθρώπους και τα ζώα, όμως δημιουργούνται δευτερεύοντα προβλήματα, όπως η διάβρωση των σωληνώσεων μεταφοράς του αφαλατωμένου νερού εξαιτίας της χαμηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο.

Κρίνεται συνεπώς αναγκαία η χημική σταθεροποίηση του αφαλατωμένου νερού με άλατα ασβεστίου, ώστε να αποφεύγεται το φαινόμενο του 'κόκκινου νερού', όπου εμφανίζονται προϊόντα διάβρωσης των σωληνώσεων στο νερό και το χρωματίζουν. Σε ορισμένες περιπτώσεις πραγματοποιείται και εμπλουτισμός του νερού με μαγνήσιο, κυρίως για γεωργική χρήση σε ειδικές καλλιέργειες. [19]

2.2.7 Απόρριψη του υπολείμματος (άλμης)

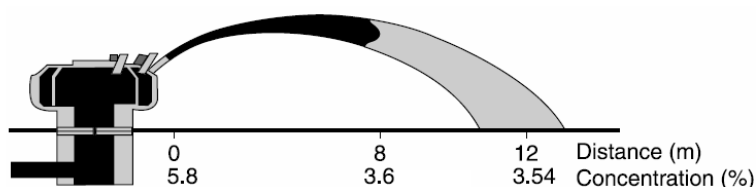
Το τελικό στάδιο της διεργασίας αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση αποτελεί η απόρριψη του υπολείμματος, δηλαδή της άλμης. Το στάδιο αυτό, αν και εκ πρώτης όψεως φαίνεται απλό, παρουσιάζει δύο σημαντικά προβλήματα που έχουν να κάνουν με το χώρο απόρριψης:

- Την πολύ υψηλή συγκέντρωση σε άλατα, και κατ' επέκταση οσμωτική πίεση, της άλμης
- Την παρουσία στο ρεύμα απόρριψης χημικών που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενα στάδια για τον καθαρισμό του νερού και των μεμβρανών.

Η συγκέντρωση της άλμης σε άλατα μπορεί να είναι από 50 - 100% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του θαλασσινού νερού τροφοδότησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή οσμωτική πίεση του διαλύματος (περίπου 50 bar), τιμή πολύ μεγαλύτερη αυτής του θαλασσινού νερού. Συνεπώς, η απόρριψη ενός τέτοιου ρεύματος κατευθείαν στη θάλασσα μπορεί να βλάψει τα τοπικά οικοσυστήματα, διότι τα είδη που τα αποτελούν είναι προσαρμοσμένα στις συνήθεις συνθήκες οσμωτικής πίεσης.

Το πρόβλημα αυτό λύνεται κυρίως μέσω:

- ♦ *Αραιώσης της άλμης με θαλασσινό νερό και απόρριψη του μίγματος αυτού, στην περίπτωση ύπαρξης απορριπτόμενου ρεύματος θαλασσινού νερού από άλλη διεργασία (πχ. εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας δίπλα σε μονάδα αφαλάτωσης). Έτσι, το τελικό απορριπτόμενο μίγμα έχει συγκέντρωση σε άλατα μεγαλύτερη κατά 10 - 15% σε σχέση με το θαλασσινό νερό, που είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια.*
- ♦ *Απευθείας εκτόξευσης του υπολείμματος στην επιφάνεια της θάλασσας με χρήση κατάλληλης διάταξης. Όταν δεν είναι δυνατή η αραιώση της άλμης, τότε μια λύση είναι η απ' ευθείας απόρριψή της στη θάλασσα. Όμως, η απόρριψη αυτή δεν πρέπει να γίνεται στον πυθμένα, καθώς η κίνηση των υδάτων εκεί είναι πολύ αργή και δεν γίνεται σωστή ανάμειξη, με αποτέλεσμα την δημιουργία περιοχών με υψηλή συγκέντρωση σε άλατα. Η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η επιφανειακή απόρριψη της άλμης μέσω εκτόξευσης, όπου επιτυγχάνεται καλύτερη ανάμειξη και ομογενοποίηση.*



Εικόνα 2.24: Συσκευή επιφανειακής απόρριψης άλμης

Πηγή: Li N., Fane A., Winston W.H., Matsuura T., *Advanced membrane technology and applications*, p. 81, Wiley, 2008

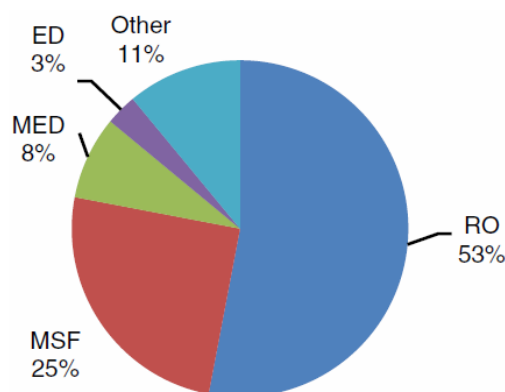
- ♦ *Διοχέτευσης της άλμης σε αλυκές (salt evaporation ponds), με σκοπό την ανάκτηση των αλάτων μέσω εξάτμισης του νερού, είτε σε ηλιακές λίμνες (solar ponds), με σκοπό την παραγωγή ενέργειας.*

Η παρουσία στο ρεύμα απόρριψης, χημικών που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενα στάδια για τον καθαρισμό του νερού και των μεμβρανών, αποτελεί το δεύτερο σημαντικό παράγοντα που πρέπει να αντιμετωπιστεί για την ασφαλή απόρριψη της άλμης στη θάλασσα. Τα χημικά που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι υψηλής καθαρότητας και με χαμηλό περιεχόμενο σε φώσφορο. Επίσης, πρέπει τα χρησιμοποιημένα χημικά καθαρισμού των μεμβρανών να αδρανοποιούνται πριν απορριφθούν, ώστε να ελαχιστοποιείται η επιβάρυνση των θαλάσσιων οικοσυστημάτων. [19]

2.3 Εφαρμογές της αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με αντίστροφη όσμωση

Τις τελευταίες δεκαετίες η παγκόσμια δυναμικότητα αφαλάτωσης παρουσιάζει σημαντική ανάπτυξη (8% μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης την περίοδο 1980-2009) που οφείλεται κυρίως στην ωρίμανση των τεχνολογιών αντίστροφης όσμωσης και στην αύξηση των αναγκών σε πόσιμο νερό. Η εγκατεστημένη δυναμικότητα υπολογίζεται σήμερα πάνω από 60 εκατομμύρια m³/ημέρα, ενώ άλλα 9,1 εκατομμύρια m³/ημέρα βρίσκονται σε φάση κατασκευής. Οι εγκαταστάσεις αφαλάτωσης που βρίσκονται σήμερα σε λειτουργία παγκοσμίως, υπερβαίνουν τις 14.500.

Οι εγκαταστάσεις αντίστροφης όσμωσης παράγουν το μεγαλύτερο μέρος του αφαλατωμένου νερού που παράγεται παγκοσμίως, με διαφορά από τις αντίστοιχες πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF) ή πολυβάθμιας εξάτμισης (MED).



Γράφημα 2.3: Κατανομή μονάδων αφαλάτωσης ως προς το είδος της διεργασίας σε παγκόσμια κλίμακα

Πηγή: Mezher T., Fath H., Abbas Z., Khaled A., *Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies*, *Desalination* 266 (1-3), p. 264, Elsevier, 2011

| Plant Name/Location | Capacity (m ³ /day) | In Operation Since |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------|
| Ashkelon/Israel | 325,000 | 2005 |
| Tuas/Singapore | 136,000 | 2005 |
| Cartagena–Mauricia/Spain | 65,000 | 2004 |
| Fujairah/UAE | 170,000 | 2003 |
| Tampa Bay/United States | 95,000 | 2003 |
| Alikante/Spain | 50,000 | 2003 |
| Carboneras– Almeria/Spain | 120,000 | 2003 |
| Point Lisas/Trinidad | 110,000 | 2002 |
| Larnaca/Cyprus | 54,000 | 2001 |
| Al Jubail III/Saudi Arabia | 91,000 | 2000 |
| Muricia/Spain | 65,000 | 1999 |
| Bay of Palma/Palma de Mallorca | 63,000 | 1998 |
| Dhekelia/Cyprus | 40,000 | 1997 |
| Marbella–Mallaga/Spain | 55,000 | 1997 |
| Okinawa/Japan | 40,000 | 1996 |

Πίνακας 2.3: Κυριότερες μονάδες SWRO που κατασκευάστηκαν μεταξύ 1996 – 2005 παγκοσμίως

Πηγή: Li N., Fane A., Winston W.H., Matsuura T., *Advanced membrane technology and applications*, p. 48, Wiley, 2008

Η αφαλάτωση θαλασσινού νερού στην Ελλάδα, αν και μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση για το πρόβλημα της λειψυδρίας, στα νησιά του Αιγαίου και κυρίως στα άνυδρα νησιά των Κυκλάδων, όπου το κόστος του μεταφερόμενου νερού είναι πολύ υψηλό, δεν χρησιμοποιείται ευρέως. Την διετία 2004 - 2006 δαπανήθηκαν από το ελληνικό κράτος 25,5 εκατομμύρια ευρώ για την μεταφορά νερού στα νησιά του Αιγαίου, ενώ μόνο μέσα στο 2006 δαπανήθηκαν περίπου 9,5 εκατομμύρια ευρώ, κόστος το οποίο υπολογίζεται ότι ανταποκρίνεται στην κατασκευή 15 μονάδων αφαλάτωσης θαλασσινού νερού, συνολικής παραγωγής 30.000 m³ την ημέρα, με μέσο κόστος παραγωγής 0,4 €/m³. Το μέσο κόστος του μεταφερόμενου νερού στα νησιά υπολογίζεται στα 7 €/m³. [27]

Το 2009 το υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας, Αιγαίου και Νησιωτικής Πολιτικής ανακοίνωσε πρόγραμμα για τη δημιουργία μονάδων αφαλάτωσης σε 13 νησιά, των Κυκλάδων και της Δωδεκανήσου (Αμοργός, Δονούσα, Κουφονήσια, Ηρακλεία, Θηρασία, Σίκινος, Φολέγανδρος, Μεγίστη, Χάλκη, Λειψοί, Αγαθονήσι, Αρκιοί και Ψέριμος), ενώ άλλα πέντε μικρά νησάκια θα παίρνουν νερό από διπλανά τους μεγαλύτερα νησιά.

Το πρόγραμμα είναι αυτοχρηματοδοτούμενο (το συνολικό κόστος το αναλαμβάνουν οι ανάδοχοι επενδυτές), τα οικόπεδα παραχωρούνται από τους δήμους, ενώ το υπουργείο αναλαμβάνει να αγοράζει για μια 10ετία εγγυημένη ποσότητα πόσιμου νερού, σε τιμή η οποία αντιστοιχεί στο 1/3 της τιμής του νερού, το οποίο μεταφέρεται σήμερα με υδροφόρα πλοία.

Σήμερα λειτουργούν στη χώρα μας περίπου 50 μονάδες αφαλάτωσης που εξυπηρετούν την ύδρευση δήμων και κοινοτήτων, με συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα αφαλάτωσης περίπου 35 χιλιάδες m³/ημέρα, ενώ υπάρχουν και αρκετές εκατοντάδες μικρότερες μονάδες ιδιωτικής χρήσης (ξενοδοχεία, βιομηχανίες, κατοικίες κλπ). Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται είναι σχεδόν αποκλειστικά είναι η αντίστροφη όσμωση, κυρίως με θαλασσινό νερό ως τροφοδοσία. Οι σημαντικότερες μονάδες αφαλάτωσης βρίσκονται στη Σύρο, τη Μύκονο και στη Χίο. [24]

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η αφαλάτωση θαλασσινού νερού μπορεί να δώσει λύση στο πρόβλημα της λειψυδρίας, μειώνοντας παράλληλα αισθητά το κόστος νερού από τα 7 €/m³ στην κλίμακα των 0,5 - 3 €/m³, ανάλογα με τη δυναμικότητα και την διαμόρφωση της μονάδας αφαλάτωσης.

| Είδος νερού που χρησιμοποιείται | Δυναμικότητα μονάδας αφαλάτωσης (m ³ /ημέρα) | Κόστος (€/m ³) |
|---------------------------------|---|----------------------------|
| Υφάλμυρο | <1.000 | 0,63- 1,06 |
| | 5.000 - 60.000 | 0,21- 0,43 |
| Θαλασσινό | <1.000 | 1,78- 9,00 |
| | 1.000 - 5.000 | 0,56- 3,15 |
| | 12.000 - 60.000 | 0,35- 1,30 |
| | >60.000 | 0,40- 0,80 |

Πίνακας 2.4: Οικονομίες κλίμακας στο κόστος αφαλατωμένου νερού με RO

Πηγή: Κλαδική Μελέτη Αφαλάτωσης Νερού - Μονάδα οικονομικής ανάλυσης αγορών Τράπεζας Πειραιώς

| Μονάδα | Έτος Κατασκευής (αρχικό) | Τύπος | Δυναμικότητα (m ³ /ημ.) | Αρχικό κόστος (εκ.€) | Λειτουργικό κόστος (€) |
|---|--------------------------|------------|------------------------------------|----------------------|------------------------|
| Σύρος 1η (Ερμούπολη) | 1992 | RO(SW) | 800 | 0,589 | 1,25 |
| Σύρος 2η (Ερμούπολη) | 1997 | RO(SW) | 800 | 1,482 | 1,25 |
| Σύρος 3η (Ερμούπολη) | 2001 | RO(SW) | 2x250 | 0,346 | 1 |
| Σύρος 4η (Άνω Σύρος) | 2000 | RO(SW) | 250 | 0,215 | 0,5 |
| Σύρος 5η (Άνω Σύρος) | 2002 | RO(SW) | 500 | 0,4 | 0,5 |
| Σύρος 6η (Ερμούπολη) | 2002 | RO(SW) | 4x500 | 0,313 | 1 |
| Σύρος 7η (Άνω Σύρος) | 2005 | RO(SW) | 2x500 | 1 | 0,4 |
| Σχοινούσα | 2004 | RO(SW) | 100 | 0,12 | 0,7 |
| Μύκονος (Κόρφου) παλαιά | 1989 | RO(SW) | 2x550 | | |
| Μύκονος (Κόρφου) νέα | 2001 | RO(SW) | 3x650 | 1,276 | 0,5 |
| Πάρος (Νάουσα) | 2001 | RO(SW) | 1200 | 0,415 | 0,5 |
| Τήνος (Παλαιά) | 2001 | RO(SW) | 500 | 0,434 | 0,62 |
| Τήνος (Νέα) | 2005 | RO(SW) | 500 | 0,376 | 0,62 |
| Οίας, Σαντορίνης 1η | 1994 | RO | 220 | | |
| Οίας, Σαντορίνης 2η | 2000 | RO | 320 | 0,211 | 2 |
| Οίας, Σαντορίνης 3η | 2002 | RO | 160 | | |
| Θήρας, Σαντορίνης | 2009 | RO | 1000 | | |
| Θηρασιά | 1997 | RO | 48 | | |
| Σίφνος | 2002 | RO(BW) | 500 | 0,224 | 3,5 |
| Ομηρούπολης (Δήμος), Χίου | 2000 | RO(BW) | 600 | 0,205 | 0,3 |
| Ομηρούπολης (Δήμος), Χίου | 2005 | RO | 3x1000 | 0,71 | 0,26 |
| Ομηρούπολης (Δήμος), Χίου | 2005 | RO | 500 | 0,2 | 0,26 |
| Νίσυρος (Παλαιά) | 1991 | RO | 300 | 0,572 | |
| Νίσυρος (Νέα) | 2002 | RO | 350 | 0,295 | 0,66 |
| Ιθάκη, Κεφαλονιάς1η | 1981 | RO | 620 | 0,264 | 2,88 |
| Ιθάκη, Κεφαλονιάς2η | 2003 | RO | 520 | 0,587 | 0,58 |
| Λέρου (ΔΕΥΑ) | 2001 | RO | 200 | 0,074 | 0,13 |
| Μήλου(Δήμος) | 2008 | RO(με Α/Γ) | 2000 | | |
| Κασσωπαίων (Δήμος) | 2001 | RO | 500 | 0,117 | 0,13 |
| Ποσειδωνίας (Δήμος) 1 | 2002 | RO(SW) | 2x250 | 0,464 | 0,56 |
| Ποσειδωνίας (Δήμος) 2 | 2005 | RO(SW) | 2x500 | 0,574 | 0,45 |
| Αγίου Γεωργίου (Δήμος) | 2002 | RO | 500 | 0,102 | 0,3 |
| Παξών (Δήμος) 1η | 2005 | RO | 330 | 0,26 | 0,51 |
| Παξών (Δήμος) 2η | 2005 | RO | 150 | 0,162 | 0,59 |
| Παξών (Δήμος) 3η | 2007 | RO(SW) | 250 | 0,211 | 0,51 |
| Δυστίων (Δήμος) | 2006 | RO(BW) | 400 | 0,2 | 0,3 |
| Σίφνος (Δήμος) | 2007 | RO(SW) | 250 | | |
| Ιος (Δήμος) | 2003 | RO(SW) | 1000 | | |
| Ιθάκη (Δήμος) | 2005 | RO(SW) | 200 | 0,22 | |
| Οινουσών (Δήμος) | 2005 | RO(SW) | 500 | | |
| Πόρου (Δήμος) | 2006 | RO(BW) | 1000 | 0,2 | 0,3 |
| Γαΐσιου (Δήμος), Αλμυρός ποταμός, Ηρακλείου | 2008 | RO(BW) | 1000 | | |
| Ηρακλεία(Πλωτή μονάδα Υδριάδα) | 2008 | RO(με Α/Γ) | 70 | 2,8 | 0,2 |

Πίνακας 2.5: Κοριότερες μονάδες αφαλάτωσης στην Ελλάδα

Πηγή: Κλαδική Μελέτη Αφαλάτωσης Νερού - Μονάδα οικονομικής ανάλυσης αγορών Τράπεζας Πειραιώς

**Λειτουργικό κόστος σε (€/m³)

3.1 Αρχές βελτιστοποίησης και μαθηματικού προγραμματισμού

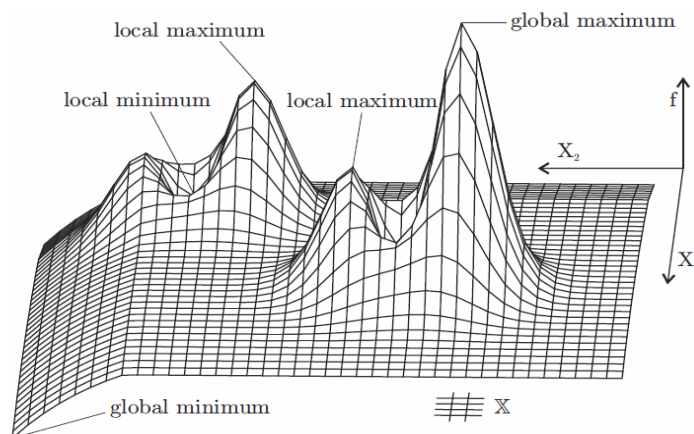
Με τον όρο *σύστημα* (*system*) χαρακτηρίζεται ένα σύνολο αλληλεπιδρώντων στοιχείων, τα οποία συνεργάζονται μεταξύ τους για την επίτευξη κάποιου κοινού σκοπού. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των δομικών στοιχείων του συστήματος είναι οι κανόνες που διέπουν τη λειτουργία του. Η *λήψη αποφάσεων* (*decision making*) σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας ή τη δομή ενός συστήματος δεν γίνεται με το ίδιο το σύστημα, αλλά με ένα *μοντέλο* (*model*) του. Το μοντέλο είναι μια αναπαράσταση του πραγματικού συστήματος, η οποία πρέπει να το απεικονίζει όσο το δυνατόν πιο πιστά. Η διαδικασία δημιουργίας του μοντέλου που περιγράφει το σύστημα, λέγεται *μοντελοποίηση* του συστήματος και αναφέρεται κατά βάση στην μαθηματική περιγραφή του (μαθηματικό μοντέλο).

Βελτιστοποίηση (*optimization*) ονομάζεται η επιλογή της κατάλληλης λύσης ενός προβλήματος, η οποία αξιολογείται ως ιδανικότερη, βάση ορισμένων κριτηρίων. Στην περίπτωση που αναφέρεται στο μοντέλο ενός συστήματος (*βελτιστοποίηση συστημάτων*), το πρόβλημα επικεντρώνεται συνήθως στην εύρεση τιμών των παραμέτρων του μοντέλου, για τις οποίες ικανοποιούνται οι περιορισμοί που έχουν τεθεί (*constrained optimization*). Ειδικότερα, στην περίπτωση ενός μαθηματικού μοντέλου, αναζητείται η ελάχιστη ή η μέγιστη τιμή μιας συνάρτησης, μίας ή περισσοτέρων μεταβλητών, η οποία ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση. Ο χώρος επιλογής εκφράζεται μέσα από την ύπαρξη περιορισμών, που λαμβάνουν οι τιμές των μεταβλητών και της συνάρτησης, και αντιπροσωπεύουν είτε φυσικούς περιορισμούς στους οποίους υπόκειται το σύστημα, είτε εκτιμήσεις του δημιουργού του μοντέλου. Η μαθηματική έκφραση των περιορισμών είναι ένα σύστημα εξισώσεων ή/και ανισώσεων, που απαιτείται να ικανοποιούνται. Έτσι, καθορίζεται ο χώρος αναζήτησης της λύσης μέσα στο χώρο των αποδεκτών λύσεων του προβλήματος.

Παρόλα αυτά, είναι δυνατόν σε ορισμένες περιπτώσεις να αναζητείται ακρότατη τιμή (ελάχιστο ή μέγιστο) μιας αντικειμενικής συνάρτησης, χωρίς την ύπαρξη περιορισμών (*unconstrained optimization*). Σε κάποιες περιπτώσεις, απαιτείται να ικανοποιούνται περισσότερα του ενός κριτήρια – αντικειμενικές συναρτήσεις (*multi-objective optimization*), απ' όπου επιλέγονται μεταξύ ικανών λύσεων οι προτιμότερες, από τον αποφασίζων. [5,6]

Μαθηματικός προγραμματισμός (*mathematical programming*) καλείται το σύνολο των υπολογιστικών τεχνικών για τον προσδιορισμό του μεγίστου ή του ελαχίστου μιας αντικειμενικής συνάρτησης, της οποίας οι μεταβλητές συνήθως απαιτείται να ικανοποιούν ένα σύνολο ανισώσεων ή/και εξισώσεων. Οι τεχνικές βελτιστοποίησης που βασίζονται στις αρχές του μαθηματικού προγραμματισμού μπορούν να ταξινομηθούν γενικά σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- *Γραμμικός προγραμματισμός (linear programming - LP)*: όταν η αντικειμενική συνάρτηση και οι ανισώσεις/εξισώσεις του μοντέλου είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών. Στην περίπτωση αυτή ένα τοπικό ακρότατο είναι και ολικό ακρότατο.
- *Μη γραμμικός προγραμματισμός (non-linear programming - NLP)*: όταν η αντικειμενική συνάρτηση και οι ανισώσεις/εξισώσεις του μοντέλου είναι μη γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών. Στην περίπτωση αυτή η εύρεση ενός τοπικού ακρότατου συνήθως δεν εξασφαλίζει ότι είναι και ολικό ακρότατο.



Εικόνα 3.1: Γραφική παράσταση μη γραμμικής συνάρτησης δύο μεταβλητών

Πηγή: Weise T., *Global optimization algorithms - theory and application*, 2nd edition, p.26, 2009

Σε σχέση με τις τιμές, που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές, οι δυνατότητες που υπάρχουν είναι:

- Συνεχείς τιμές
- Ακέραιες τιμές
- Μικτές τιμές

Συνοπώς, τα προβλήματα του μαθηματικού προγραμματισμού, στα οποία όλες ανεξαιρέτα οι μεταβλητές περιορίζονται να πάρουν ακέραιες τιμές εμπίπτουν στο πεδίο του *Ακέραιου Προγραμματισμού (Integer Programming - IP)*. Αντίστοιχα, τα προβλήματα στα οποία ο περιορισμός ακεραιότητας δεν ισχύει για όλες τις μεταβλητές, αλλά για μερικές από αυτές, ονομάζονται προβλήματα *Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (Mixed Integer Programming - MIP)*. [1]

3.2 Στοιχεία μαθηματικού προγραμματισμού

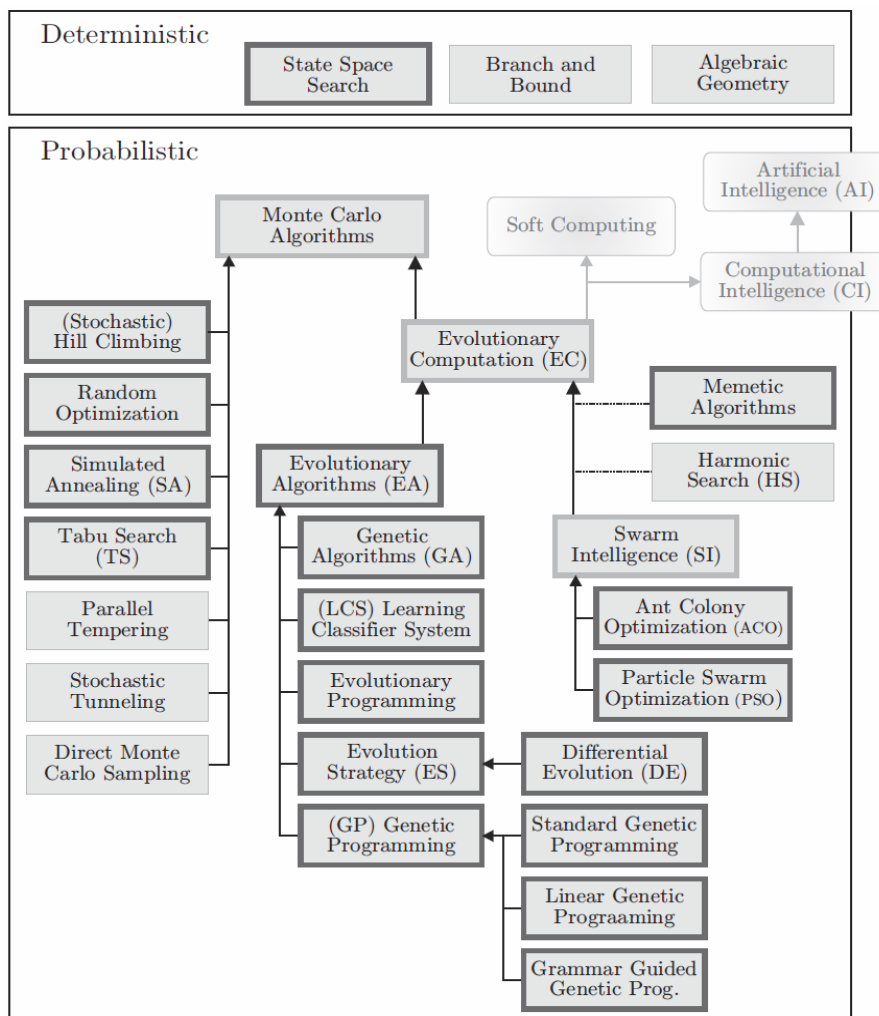
Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, για τη λύση των προβλημάτων ο μαθηματικός προγραμματισμός χρησιμοποιεί ένα μαθηματικό μοντέλο, το οποίο αποτελείται από μεταβλητές απόφασης, μια αντικειμενική συνάρτηση και ένα σύνολο περιορισμών :

- *Μεταβλητές απόφασης* (decision variables) ενός προβλήματος μαθηματικού προγραμματισμού είναι οι δραστηριότητες, οι οποίες μπορούν να αναπτυχθούν (π.χ. γραμμές και ύψος παραγωγής ανά προϊόν, επενδύσεις ανά κατηγορία κ.ά.) σε ποσότητες που πρόκειται να προσδιοριστούν με τη λύση του προβλήματος.
- *Αντικειμενική συνάρτηση* (objective function): εκφράζει το αντικείμενο (το κόστος, κέρδος, πωλήσεις κτλ), το οποίο πρόκειται να βελτιστοποιηθεί (να ελαχιστοποιηθεί ή να μεγιστοποιηθεί, αντίστοιχα).
- *Περιορισμοί Μεταβλητών* (variable constraints) είναι ένα σύνολο αλγεβρικών ανισοτήτων ή ισοτήτων, οι οποίες εκφράζουν τους περιορισμούς του περιβάλλοντος και της τεχνολογίας μέσα στους οποίους κινείται ο αποφασίζων, π.χ. περιορισμοί δυναμικότητας, διαθεσιμότητας πρώτων υλών, τεχνολογίας, αγοράς, κλπ. [1]

Η προσέγγιση της λύσης των προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού γίνεται μέσω κάποιων αυτοματοποιημένων μαθηματικών προτύπων, τα οποία ονομάζονται αλγόριθμοι βελτιστοποίησης (*optimization algorithms*). Οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με τον τρόπο που προσεγγίζουν τη λύση ως:

- Προσδιοριστικοί/ντετερμινιστικοί (deterministic algorithms)
- Στοχαστικοί/πιθανοτικοί (stochastic/probabilistic algorithms)

Οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι έχουν ως χαρακτηριστικό την χρήση εφαρμογών του απειροστικού λογισμού (κλίση συνάρτησης, μητρώα παραγώγων κλπ.), για την εύρεση λύσης, την οποία προσεγγίζουν πάντα με προκαθορισμένο τρόπο. Οι στοχαστικοί αλγόριθμοι, αντίθετα, αναπαράγουν και χρησιμοποιούν τυχαίες μεταβλητές/περιορισμούς ή/και τυχαίες κατευθύνσεις έρευνας. Έτσι, προσεγγίζουν τη λύση με διαφορετικό πάντα τρόπο, όμως μπορούν προσδιορίζουν την περιοχή της λύσης σε πολύ καλό βαθμό, ανάλογα με την περίπτωση. [36]



Εικόνα 3.2: Ταξινόμηση αλγορίθμων βελτιστοποίησης

Πηγή: Weise T., *Global optimization algorithms - theory and application*, 2nd edition, p.23, 2009

3.3 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης προβλημάτων πολλών μεταβλητών μη γραμμικού προγραμματισμού

Τα προβλήματα πολλών μεταβλητών (multivariable problems) αποτελούν το πιο σημαντικό πεδίο εφαρμογής των τεχνικών μαθηματικού προγραμματισμού. Τα μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν τα συστήματα, τα οποία καλούνται να αναλύσουν οι σύγχρονοι επιστήμονες, είναι συνήθως σύνθετα ως προς τη δομή. Περιγράφονται δηλαδή με περισσότερες της μίας μεταβλητές, και συνήθως υπάρχουν περιορισμοί στο χώρο έρευνας της λύσης. Συνεπώς, τα προβλήματα βελτιστοποίησης που προκύπτουν, εντάσσονται κυρίως στο χώρο του *πολυδιάστατου μαθηματικού προγραμματισμού με περιορισμούς (constrained multi-dimensional mathematical programming)*.

Πέρα όμως, από την πολυπλοκότητα ως προς τη δομή, παρουσιάζεται συχνά και πολυπλοκότητα ως προς το είδος των σχέσεων που περιγράφουν ένα σύστημα. Δηλαδή, το μαθηματικό μοντέλο ενός συστήματος δεν προσεγγίζεται ικανοποιητικά από γραμμικές σχέσεις, αλλά από μη γραμμικές εξισώσεις ή/και ανισώσεις. Στις περιπτώσεις αυτές, οι τεχνικές πολυδιάστατου μη γραμμικού προγραμματισμού μπορούν να οδηγήσουν σε αποδεκτά αποτελέσματα βελτιστοποίησης, αν χρησιμοποιηθούν κατάλληλα. [5,30]

Οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης του πολυδιάστατου μη γραμμικού προγραμματισμού μπορούν να χωρισθούν στις εξής κατηγορίες, ως προς τον τρόπο προσέγγισης της λύσης:

➤ **Κύριες ή αποδεκτές μέθοδοι (primal or feasible methods)**

Είναι οι μέθοδοι που κινούνται συνεχώς εντός της αποδεκτής περιοχής (feasible region) του χώρου σχεδιασμού. Αν το αρχικό σημείο είναι εκτός αποδεκτής περιοχής, τότε με κατάλληλες τεχνικές η διαδικασία αναζήτησης βέλτιστης λύσης μεταφέρεται εντός του χώρου αποδεκτών σχεδιασμών, όπου και παραμένει μέχρι να εντοπιστεί κάποιο ακρότατο.

Αυτές οι μέθοδοι έχουν το πλεονέκτημα ότι αν για κάποιο λόγο διακοπεί πρόωρα η διαδικασία, δίνουν έστω και τότε μια αποδεκτή λύση που δεν παραβιάζει τις συναρτήσεις περιορισμού. Επίσης, δεν περιορίζονται από τη μορφή του προβλήματος, όπως πχ. την αναγκαιότητα για κυρτότητα των συναρτήσεων, αλλά έχουν γενική χρήση σε προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού.

Σημαντικότεροι εκπρόσωποι των μεθόδων αυτών είναι: η μέθοδος των αποδεκτών κατευθύνσεων (feasible directions), η μέθοδος της προβολής του διανύσματος των παραγώγων (gradient projection), η μέθοδος των ενεργών συνόλων (active sets) και η μέθοδος της γενικευμένης μειωμένης κλίσης (generalized reduced gradient - GRG). Η τελευταία αποτελεί και τη βάση του solver CONOPT, που χρησιμοποιήθηκε για τη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης της παρούσας εργασίας. [5,21]

➤ **Μέθοδοι συντελεστών ποινής (penalty and barrier functions)**

Στην κατηγορία αυτή, ο βασικός στόχος είναι να μετατραπεί ένα πρόβλημα με περιορισμούς σε πρόβλημα χωρίς περιορισμούς. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της προσθήκης στην αντικειμενική συνάρτηση των συναρτήσεων περιορισμού, πολλαπλασιασμένων με κάποιους συντελεστές ποινής (penalty parameters), που απορρίπτουν τους σχεδιασμούς που παραβιάζουν τους περιορισμούς. Έτσι, σχηματίζεται μια διευρυμένη (augmented) αντικειμενική συνάρτηση. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι εσωτερικής / εξωτερικής ποινής (interior/exterior penalty methods) και οι μέθοδοι φραγμών (barrier methods). [5,14]

➤ **Δυαδικές μέθοδοι (dual methods)**

Οι μέθοδοι αυτές διαμορφώνουν και επιλύουν το δυαδικό (dual) πρόβλημα βελτιστοποίησης, όπου άγνωστοι δεν είναι μόνο οι μεταβλητές σχεδιασμού αλλά και οι πολλαπλασιαστές Lagrange των συναρτήσεων περιορισμού. Έτσι, αντί να ελαχιστοποιηθεί η κανονική αντικειμενική συνάρτηση, μεγιστοποιείται η δυαδική της. Μετά την εύρεση των πολλαπλασιαστών Lagrange, προκύπτουν οι κύριες μεταβλητές του προβλήματος, με κατάλληλες αντικαταστάσεις. [5,21]

➤ **Μέθοδοι Lagrange (Lagrange methods)**

Οι μέθοδοι αυτές συνδυάζουν χαρακτηριστικά των κύριων και των δυαδικών μεθόδων. Συνήθως προσεγγίζουν τοπικά με γραμμικές σχέσεις τις μη γραμμικές σχέσεις του προβλήματος και διαμορφώνουν σε κάθε βήμα ένα υποπρόβλημα βελτιστοποίησης. Για να το επιτύχουν αυτό χρησιμοποιούν μη γραμμικές μεθόδους τύπου Newton ή quasi-Newton για την επίλυση του τοπικού υποπροβλήματος και την εύρεση των διανυσμάτων κατεύθυνσης μέσα στο χώρο σχεδιασμού, χρησιμοποιώντας τις συνθήκες βελτίστου Karush-Kuhn-Tucker (KKT).

Συνήθως, η αντικειμενική συνάρτηση προσεγγίζεται τοπικά μέσω μιας γραμμικής ή τετραγωνικής συνάρτησης, ενώ οι συναρτήσεις περιορισμού γραμμικοποιούνται. Έτσι, όταν η προσεγγιστική αντικειμενική συνάρτηση είναι γραμμική προκύπτει πρόβλημα διαδοχικού γραμμικού προγραμματισμού (Successive Linear Programming - SLP), ενώ όταν είναι τετραγωνική προκύπτει πρόβλημα διαδοχικού τετραγωνικού προγραμματισμού (Successive Quadratic Programming - SQP). [5,21]

3.4 Ο αλγόριθμος γενικευμένης μειωμένης κλίσης (generalized reduced gradient - GRG)

Ο αλγόριθμος γενικευμένης μειωμένης κλίσης (generalized reduced gradient - GRG) αποτελεί μια γενίκευση του αλγορίθμου μειωμένης κλίσης (reduced gradient) του Wolfe, που συμπεριλαμβάνει και μη γραμμικούς περιορισμούς. Ο αλγόριθμος μειωμένης κλίσης είναι μια επαναληπτική μέθοδος, που χρησιμοποιεί μόνο γραμμικούς περιορισμούς (linear constraints) και προσεγγίζει την λύση μόνο τοπικά. Δηλαδή το ακρότατο που προκύπτει δεν είναι δυνατόν να καθοριστεί αν είναι ολικό, και θεωρείται τοπικό, εκτός από ειδικές περιπτώσεις που μπορούμε να αποφανθούμε κατευθείαν για τη φύση του ακρότατου. Οι περιπτώσεις όμως αυτές αποτελούν συνήθως την εξαίρεση και όχι τον κανόνα, γι' αυτό δεχόμαστε την τοπική ισχύ ενός ελαχίστου ή μεγίστου με τον αλγόριθμο μειωμένης κλίσης ή αντίστοιχα με τη γενικευμένη του μορφή.

Η προσέγγιση της λύσης γίνεται με διαχωρισμό των αποδεκτών λύσεων του προβλήματος σε σύνολα εξαρτημένων ή βασικών (basic) και ανεξάρτητων ή μη βασικών (nonbasic) μεταβλητών και τη θεώρηση του προβλήματος ως πρόβλημα μόνο των μη βασικών μεταβλητών, μειώνοντας έτσι τις διαστάσεις του (reduced space). Στη συνέχεια, αναζητούνται αποδεκτές κατευθύνσεις έρευνας (feasible directions) και τελικά, μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας που ακολουθείται, βρίσκεται μια αποδεκτή λύση, η οποία ικανοποιεί τις συνθήκες Karush-Kuhn-Tucker (KKT). [33]

Το γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης μη γραμμικού προγραμματισμού μπορεί να οριστεί ως:

$$\min \text{ ή } \max f(x)$$

$$\text{με περιορισμό } g(x) = b$$

$$\text{και } x.lo \leq x \leq x.up$$

Συνοπτικά, τα βασικά βήματα του αλγορίθμου γενικευμένης μειωμένης κλίσης είναι:

1. Αρχικοποίηση και εύρεση μιας εφικτής λύσης
2. Υπολογισμός της Ιακωβιανής μήτρας J (Jacobian) των περιορισμών
3. Επιλογή συνόλου από n βασικές μεταβλητές, x_b , τέτοιο ώστε ο πίνακας B (υποπίνακας στηλών βασικών μεταβλητών του J) να είναι αντιστρέψιμος.
4. Παραγοντοποίηση (factorization ή decomposition) του πίνακα B . Οι εναπομείναντες μεταβλητές, x_n , λέγονται μη βασικές.
5. Επίλυση της $B^T u = \frac{df}{dx_b}$ για τους πολλαπλασιαστές u .
6. Υπολογισμός της μειωμένης κλίσης (reduced gradient), $r = \frac{df}{dx} - J^T u$. Εξ' ορισμού $r = 0$ για τις βασικές μεταβλητές.
7. Εάν η προβολή της τιμής του r στα όρια είναι μικρή, τότε stop. Το τρέχον σημείο είναι κοντά στο βέλτιστο.
8. Επιλογή συνόλου υπερβασικών μεταβλητών (superbasic variables), x_s , ως υποσύνολο των μη βασικών μεταβλητών, και εύρεση κατεύθυνσης έρευνας, d_s , για τις υπερβασικές μεταβλητές βασισμένη στην r_s ή/και από πληροφορίες από παραγώγους δεύτερης τάξης.
9. Εκτέλεση έρευνας γραμμής κατά μήκος της κατεύθυνσης d . Για κάθε βήμα, η τιμή του x_s μεταβάλλεται στην κατεύθυνση d_s και η τιμή του x_b προσαρμόζεται ανάλογα, ώστε να ικανοποιεί τη σχέση $g(x_b, x_s) = b$ μέσω μιας quasi-Newton διαδικασίας (Taylor approximations), που χρησιμοποιεί το παραγοντοποιημένο πίνακα B του βήματος 4.
10. Επιστροφή στο βήμα 2. [16]

3.5 Ο solver CONOPT

Ο *CONOPT* είναι ένα πρόγραμμα επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης ή αλλιώς, solver. Βασίζεται στην εφαρμογή του αλγορίθμου γενικευμένης μειωμένης κλίσης - GRG για έρευνα σε εφικτές κατευθύνσεις λύσεων. Αναπτύχθηκε αρχικά το 1985 από τον A. Drud και ολοκληρώθηκε η πρώτη φάση της ανάπτυξής του το 1992. Σήμερα, εξελίσσεται συνεχώς (εκδόσεις 1.0 - 2.0 - 3.0) και τα δικαιώματά του ανήκουν στην ARKI Consulting & Development, που εδρεύει στη Δανία.

Τα προβλήματα που μπορεί να λύσει ο *CONOPT* είναι της μορφής:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) \\ \text{s/t} \quad & x_L \leq x \leq x_U \\ & b_L \leq Ax \leq b_U \\ & c_L \leq c(x) \leq c_U \end{aligned}$$

όπου: $x, x_L, x_U \in \mathbb{R}^n$, $A \in \mathbb{R}^{m1 \times n}$, $b_L, b_U \in \mathbb{R}^{m1}$ και $c(x), c_L, c_U \in \mathbb{R}^{m2}$

- x_L, x_U : όρια στις τιμές των μεταβλητών
- b_L, b_U : όρια των γραμμικών περιορισμών
- A : πίνακας γραμμικών περιορισμών
- c_L, c_U : όρια μη γραμμικών περιορισμών

Συνοπτικά, τα βασικά χαρακτηριστικά του *CONOPT* είναι:

- Χρήση συνεχών μεταβλητών και διαφορίσιμων συναρτήσεων περιορισμών.
- Χρήση αραιής Ιακωβιανής μήτρας (sparse Jacobian).
- Οι μη γραμμικές συναρτήσεις του μοντέλου και οι αναλυτικές τους παράγωγοι θεωρούνται ως υπολογίσιμες με μεγάλη ακρίβεια.
- Χρήση παραγώγων δεύτερης τάξης για μοντέλα με πολλούς βαθμούς ελευθερίας.
- Δυνατότητα αυτόματης διαμόρφωσης του μεγέθους (scale) του μοντέλου και των περιορισμών. Συνίσταται όμως η κατάλληλη διαμόρφωση από τον χρήστη για διευκόλυνση της επίλυσης.
- Δεν εγγυάται ότι η λύση είναι ολικό ακρότατο. [12]

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε ο solver CONOPT 3 σε συνδυασμό με τη γλώσσα αλγεβρικής μοντελοποίησης *GAMS* (General Algebraic Modeling System).

3.6 Η γλώσσα GAMS

Το Γενικό Σύστημα Αλγεβρικής Μοντελοποίησης *GAMS* (General Algebraic Modeling System) έχει σχεδιαστεί για την ανάλυση γραμμικών και μη γραμμικών προβλημάτων συνεχών, ακεραίων και μικτών αριθμών. Το σύστημα είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για μεγάλα και πολυσύνθετα προβλήματα, ενώ επιτρέπει στο χρήστη να επικεντρωθεί στο πρόβλημα του μοντέλου, με το να καθιστά την οργάνωσή του απλή. Ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τη διατύπωση γρήγορα και εύκολα μετατρέποντας ένα γραμμικό πρόβλημα σε μη γραμμικό χωρίς δυσκολία. Η γλώσσα που χρησιμοποιεί το *GAMS*, είναι τυπικά παρόμοια με τις συνήθεις γλώσσες προγραμματισμού, καθιστώντας έτσι το σύστημα οικείο σε όποιον έχει κάποια επαφή με τον προγραμματισμό.

Χρησιμοποιώντας το *GAMS*, τα στοιχεία εισάγονται μόνο μια φορά με τη μορφή καταλόγων και πινάκων. Όλοι οι περιορισμοί του προβλήματος εισάγονται σε μια δήλωση και το *GAMS* παράγει αυτόματα περιορισμό για την κάθε εξίσωση, αφήνοντας το χρήστη να κάνει εξαιρέσεις, σε περίπτωση που δεν επιδιώκεται γενικότητα στη λύση.

Ο σχεδιασμός στο *GAMS* έχει ενσωματώσει τις έννοιες που προέρχονται από τη θεωρία βάσεων δεδομένων και το μαθηματικό προγραμματισμό, και προσπαθεί να συγχωνεύσει αυτές τις έννοιες ώστε να ανταποκριθούν στις ανάγκες του σχεδιασμού μοντέλων. Η σχετική θεωρία βάσεων δεδομένων παρέχει ένα δομημένο πλαίσιο για τις γενικές δυνατότητες οργάνωσης και μετασχηματισμού των στοιχείων του μοντέλου, σε συνδυασμό με τον μαθηματικό προγραμματισμό, που προφέρει ποικίλες μεθόδους για τη λύση των προβλημάτων βελτιστοποίησης των μοντέλων. [1,31]

Η γενική διαμόρφωση ενός προγράμματος στη γλώσσα *GAMS* είναι:

Inputs

- **Sets**
 - ◆ **Declaration**
 - ◆ **Assignment of members**

- **Data (Parameters, Tables, Scalars)**
 - ◆ **Declaration**
 - ◆ **Assignment of values**

- **Variables**
 - ◆ **Declaration**
 - ◆ **Assignment of type**

- Assignment of bounds and/or initial values
- Equations
 - ◆ Declaration
 - ◆ Definition
- Model and Solve statements

Outputs

- Echo Print
- Symbol Reference Maps
- Equation Listings
- Status Reports
- Results

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το *GAMS* δεν λύνει μόνο του προβλήματα βελτιστοποίησης, αλλά αφού έχει δημιουργηθεί το μοντέλο από τον χρήστη, τότε καλείται ο κατάλληλος solver για την επίλυση του προβλήματος. Το μοντέλο σε γλώσσα *GAMS* της παρούσας εργασίας δίνεται στο παράρτημα. [25]

4.1 Μεταφορά μέσω μεμβρανών στην αντίστροφη όσμωση

Αν και η ροή και τα φαινόμενα μεταφοράς στο διάλυμα που ανακυκλοφορεί στο χώρο μεταξύ των μεμβρανών αφαλάτωσης είναι σημαντικά, δεν καθορίζουν την απόδοση της διεργασίας. Αυτή καθορίζεται από τη μεταφορά νερού και αλάτων διαμέσου των μεμβρανών. Συνεπώς, καθίσταται απαραίτητο να χαρακτηριστεί και να περιγραφεί μαθηματικά η μεταφορά μέσω μεμβρανών, ώστε να αναπτυχθούν μοντέλα προσομοίωσης της διεργασίας αφαλάτωσης.

4.1.1 Μοντέλα μεταφοράς

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, μια μεμβράνη μπορεί να οριστεί ως ένα φράγμα μεταξύ δύο φάσεων. Ένα μόριο ή σωματίδιο μεταφέρεται από τη μία φάση στην άλλη μέσω της μεμβράνης, εξαιτίας της δράσης μιας κινούσας δύναμης (driving force). Η δύναμη αυτή μπορεί να είναι διαφορά χημικού δυναμικού, διαφορά συγκέντρωσης, διαφορά πίεσης κλπ. ή συνδυασμός αυτών. Συγκεκριμένα, υπάρχει σχέση ευθείας αναλογίας μεταξύ της ροής μέσω της μεμβράνης και της κινούσας δύναμης, της μορφής:

$$J = A \times X$$

όπου A = συντελεστής αναλογίας και X = κινούσα δύναμη.

Σήμερα υπάρχουν αρκετές θεωρίες που περιγράφουν μαθηματικά το πρόβλημα και χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: [35]

➤ **Μοντέλα μη αντιστρεπτών θερμοδυναμικών διεργασιών (irreversible thermodynamics models)**

Τα μοντέλα αυτά, περιγράφουν την ροή του διαλύτη (νερό) και των διαλυμένων ουσιών (άλατα) μέσω της μεμβράνης ως:

$$J_w = L_p (\Delta P - \Delta \Pi)$$

$$J_s = C_s (1 - \sigma) J_w + D \varepsilon \Delta C$$

όπου: J_w = ροή του νερού, J_s = ροή των αλάτων, ΔP = ασκούμενη πίεση κατά μήκος της μεμβράνης, $\Delta \Pi$ = οσμωτική πίεση κατά μήκος της μεμβράνης, C_s = μέση συγκέντρωση των αλάτων, ΔC = διαφορά συγκέντρωσης αλάτων κατά μήκος της μεμβράνης, D = συντελεστής διάχυσης, ε = πορώδες της μεμβράνης, L_p = υδροδυναμική περατότητα της μεμβράνης, σ = συντελεστής ανάκλασης του Staverman.

Η προσέγγιση αυτή δεν είναι πολύ δημοφιλής πλέον, γιατί θεωρείται ότι δεν περιγράφει τον πραγματικό μηχανισμό μεταφοράς της μεμβράνης. Τα διασημότερα μοντέλα αυτής της κατηγορίας είναι τα μοντέλα των Kedem - Katchalsky και Spiegler - Kedem. [28,35]

➤ **Μοντέλα ομογενούς (μη πορώδους) μεμβράνης (homogenous or nonporous models)**

Τα μοντέλα αυτά θεωρούν ότι η μεμβράνη είναι μη πορώδης. Ο διαχωρισμός του διαλύτη και της διαλυμένης ουσίας από τη μεμβράνη εξαρτάται από τη διαφορά διαλυτότητας (solubility) και διαχυτότητας (diffusivity) που υπάρχει μεταξύ τους στη φάση της μεμβράνης. Η ροή διαμέσου της μεμβράνης εξαρτάται από τη διαφορά πίεσης εκατέρωθεν της μεμβράνης και τη διαφορά συγκέντρωσης κατά μήκος της μεμβράνης.

Το πιο δημοφιλές μοντέλο αυτής της κατηγορίας είναι το μοντέλο διαλύματος - διάχυσης (solution - diffusion model - SD). Στο μοντέλο αυτό, η ροή του διαλύτη (νερό) και των διαλυμένων ουσιών (άλατα) μέσω της μεμβράνης περιγράφεται ως:

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

$$J_s = B (C_m - C_p)$$

όπου: J_w = ροή του νερού, J_s = ροή των αλάτων, ΔP = ασκούμενη πίεση κατά μήκος της μεμβράνης, $\Delta \Pi$ = οσμωτική πίεση κατά μήκος της μεμβράνης, A = σταθερά διαπερατότητας νερού, B = σταθερά διαπερατότητας αλάτων, C_m = συγκέντρωση των αλάτων στην επιφάνεια της μεμβράνης, C_p = συγκέντρωση των αλάτων στην πλευρά του αφαλατωμένου διαλύματος

Στην κατηγορία αυτή επίσης ανήκουν και διευρυμένα μοντέλα της παραπάνω περίπτωσης, όπως το μοντέλο διαλύματος - διάχυσης - ατελειών (solution - diffusion - imperfection model). [28,35]

➤ **Μοντέλα πορώδους μεμβράνης (porous models)**

Τα μοντέλα αυτά θεωρούν πορώδη τη μεμβράνη και ότι η μεταφορά γίνεται κυρίως μέσω διάχυσης στους πόρους. Το σημαντικότερο μοντέλο της κατηγορίας αυτής είναι το μοντέλο επιλεκτικής ρόφησης - τριχοειδούς ροής (preferential sorption - capillary flow model - PSCF), των Kimura και Sourirajan (Kimura-Sourirajan Analysis - KSA).

Το μοντέλο αυτό θεωρεί τη μεμβράνη ως μικροπορώδη, δηλαδή ότι έχει πόρους με διάμετρο μικρότερη από 2 nm. Όταν έρχεται σε επαφή το διάλυμα τροφοδοσίας (θαλασσινό νερό) με τη μεμβράνη, οι χημικές ιδιότητες του επιφανειακού στρώματος της μεμβράνης επιτρέπουν την επιλεκτική ρόφηση του διαλύτη (νερό) και τη δημιουργία στρώματος διαλύτη στην επιφάνεια και στους πόρους της μεμβράνης. Οι διαλυμένες ουσίες (άλατα) απορρίπτονται από την μεμβράνη και δεν σχηματίζουν κάποιο επιφανειακό στρώμα. Όταν στα μόρια του διαλύτη, του επιφανειακού στρώματος που έχει δημιουργηθεί, ασκηθεί υδροστατική πίεση, αυτά τότε περνούν μέσω των τριχοειδών πόρων στην άλλη μεριά της μεμβράνης, όπου βρίσκεται το καθαρό διάλυμα (αφαλατωμένο νερό).

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι αλγεβρικά ίδιες με το μοντέλο διαλύματος - διάχυσης (solution - diffusion). Αυτό που αλλάζει όμως, είναι οι τιμές των σταθερών διαπερατότητας της μεμβράνης και ο τρόπος υπολογισμού τους. Άλλα μοντέλα στην κατηγορία αυτή είναι το μοντέλο ομοιόμορφων πόρων (fine porous model) και το μοντέλο ροής μέσω των πόρων λόγω επιφανειακής δύναμης (surface force pore flow model). [18,35]

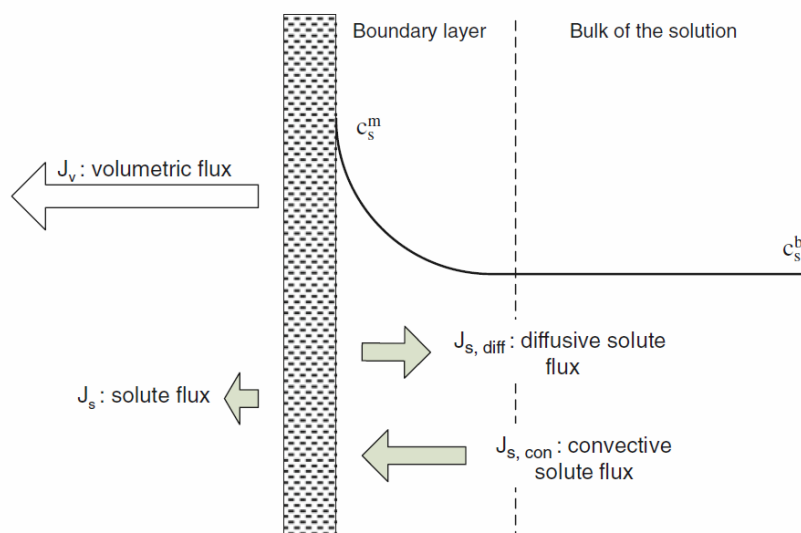
4.1.2 Το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης (concentration polarization)

Το φαινόμενο της εμφάνισης πόλωσης συγκέντρωσης είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά τη μελέτη της μεταφοράς μέσω μεμβρανών, και πρέπει να ληφθεί υπόψη στη δημιουργία του μοντέλου της διεργασίας. Περιγράφει την αύξηση της συγκέντρωσης των διαλυμένων ουσιών (αλάτων) στην επιφάνεια της μεμβράνης και τη μείωση της ροής διαλύματος μέσω αυτής.

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη θεωρία λεπτού υμενίου (thin film theory), δημιουργείται βαθμίδα συγκέντρωσης στο υμένιο, το οποίο έχει προέλθει από την συσσώρευση των διαλυμένων ουσιών στην επιφάνεια της μεμβράνης. Συνεπώς, η συγκέντρωση των αλάτων θα είναι μεγαλύτερη στην επιφάνεια της μεμβράνης σε σχέση με τον κύριο όγκο του υγρού, γεγονός το οποίο προκαλεί διάχυση των στερεών στην αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της ροής και τελικά μείωση της ροής.

Συνοψίζοντας, η πόλωση συγκέντρωσης επιδρά αρνητικά κατά τη μεταφορά μέσω μεμβρανών διότι:

- Αυξάνεται η οσμωτική πίεση του διαλύματος τροφοδοσίας, και ως εκ τούτου, μειώνεται η ροή μέσω της μεμβράνης για σταθερή υδροστατική πίεση.
- Μειώνεται ο συντελεστής μεταφοράς μάζας, λόγω των επικαθίσεων στη μεμβράνη από άλατα διοθενών ιόντων (Ca^{+2} , Mg^{+2}), εξαιτίας της υπέρβασης του ορίου διαλυτότητάς τους.
- Μειώνεται η δυνατότητα απόρριψης αλάτων της μεμβράνης, εξαιτίας της μεγαλύτερης ροής αλάτων προς αυτή. [13,35]



Εικόνα 4.1: Προφίλ συγκεντρώσεων στην επιφάνεια της μεμβράνης και πέρα από αυτή

Πηγή: Cipollina A., Micale G., Rizzuti L., *Seawater desalination - conventional and renewable energy processes, Green energy and technology volumes*, p. 57, Springer, 2009

4.2 Αναλυτικό μοντέλο μεταφοράς μέσω μεμβρανών κοίλων ινών

Για να προσομοιωθεί η διεργασία της αντίστροφης όσμωσης, θα πρέπει πρώτα να περιγραφεί μαθηματικά. Στην περίπτωση των μεμβρανών κοίλων ινών, έχουν προταθεί κατά καιρούς διάφορες προσεγγίσεις. Ανάμεσά τους ξεχωρίζει η περίπτωση του μοντέλου Τριβής - Πόλωσης Συγκέντρωσης (Friction - Concentration Polarization - FCP) του Sekino και κυρίως η επέκταση του μοντέλου από τους Al-Bastaki και Abbas, το οποίο αποτελεί και τη βάση της μοντελοποίησης για τη συγκεκριμένη εργασία.

Το μοντέλο αυτό θεωρείται σημαντικό, γιατί συμπεριλαμβάνει στην περιγραφή της διεργασίας τα εξής σημεία:

- Τη μεταφορά μέσω των μεμβρανών, σύμφωνα με το μοντέλο Kimura - Sourirajan, που περιγράφηκε παραπάνω.
- Το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης, σύμφωνα με τη θεωρία λεπτού υμενίου.
- Το συντελεστή μεταφοράς μάζας για την εξίσωση πόλωσης συγκέντρωσης.
- Την πειραματικά προσδιοριζόμενη τιμή των σταθερών διαπερατότητας της μεμβράνης.
- Την πτώση πίεσης στο εσωτερικό των κοίλων ινών, από την εξίσωση των Hagen - Poiseuille
- Την πτώση πίεσης κατά μήκος της δέσμης των κοίλων ινών (εσωτερικά του κελύφους - εξωτερικά της κάθε ίνας), από την εξίσωση του Ergun. [8,32]

Η μαθηματική έκφραση αυτών των σημείων δίνεται παρακάτω, στο αντίστοιχο υποκεφάλαιο, μαζί με τις υπόλοιπες εξισώσεις.

4.3 Παραδοχές στη μοντελοποίηση της διεργασίας αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο των Al-Bastaki και Abbas [8] για την περιγραφή της διεργασίας αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση. Επίσης, θεωρήθηκε διάταξη με στοιχεία μεμβρανών κοίλων ινών (hollow fibers) και ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα (σταθερές διαπερατότητας κλπ) και οι διαστάσεις των μεμβρανών B-10 της DuPont. Το γεγονός ότι έχουν πλέον αποσυρθεί τα στοιχεία αυτά δεν επηρεάζει την ουσία της διαδικασίας, διότι στην περίπτωση χρήσης στοιχείων κοίλων ινών άλλης εταιρίας, απλά αλλάζουν τα αντίστοιχα αριθμητικά δεδομένα και διαστάσεις.

Οι βασικές παραδοχές που έγιναν για την δημιουργία, αλλά και την εφαρμογή του μοντέλου είναι οι εξής:

- Θεωρείται ότι η ροή του διαλύματος τροφοδοσίας μέσα στο δοχείο πίεσης είναι μόνο ακτινική (μηδενική αξονική ταχύτητα). Επίσης η ροή του καθαρού διαλύματος – αφαλατωμένου νερού μέσα σε κάθε κοίλη ίνα θεωρείται αξονική.
- Οι συντελεστές διαπερατότητας της μεμβράνης θεωρούνται σταθερές κατά τη διεργασία (σταθερές διαπερατότητας).
- Θεωρείται ότι η διεργασία εκτελείται ήδη για αρκετό χρονικό διάστημα, τέτοιο ώστε να θεωρηθούν μόνιμες συνθήκες λειτουργίας (*steady state*).
- Θεωρούνται σταθερές η θερμοκρασία και οι ιδιότητες των ρευστών (πυκνότητα, ιξώδες, συντελεστής διάχυσης) μέσα στο στοιχείο μεμβράνης. [24]

4.4 Περιγραφή και μοντελοποίηση του προβλήματος

Στο πλαίσιο της εργασίας χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα *GAMS* και ο solver *CONOPT* για την μοντελοποίηση και τη βελτιστοποίηση μιας μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού. Η διάταξη της μονάδας είναι μονού σταδίου (*single stage*) και όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιεί στοιχεία μεμβρανών κοίλων ινών. Θεωρήθηκε ότι η τροφοδότηση της μονάδας γίνεται από επιφανειακή άντληση και η απόρριψη της άλμης γίνεται στην επιφάνεια της θάλασσας. Επίσης θεωρήθηκε σύστημα ανάκτησης ενέργειας από το ρεύμα άλμης, το οποίο αποτελείται από φυγοκεντρικές αντλίες αντίστροφης λειτουργίας.

Ο βασικός σκοπός είναι να βρεθεί ποιο είναι το ελάχιστο κόστος παραγωγής αφαλατωμένου πόσιμου νερού, συναρτήσει των συνθηκών λειτουργίας της εγκατάστασης. Παράλληλα, εξετάστηκαν και εναλλακτικά σενάρια ως προς τις τιμές κάποιων παραμέτρων και τα αποτελέσματα που ελήφθησαν παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Η μοντελοποίηση του προβλήματος έγινε σε 3 επίπεδα:

- ◆ Συναρτήσεις που περιγράφουν τη διεργασία σε ένα στοιχείο μεμβράνης
- ◆ Συναρτήσεις που περιγράφουν τη διεργασία σε όλη την έκταση της εγκατάστασης
- ◆ Συναρτήσεις που περιγράφουν το κόστος της διεργασίας

4.4.1 Μεταβλητές απόφασης και δεδομένα

Οι τιμές των παραμέτρων που ελήφθησαν ως σταθερές για την επίλυση του μοντέλου είναι: [10,11,15,23]

| Σύμβολο | Τιμή | Μονάδα | Περιγραφή |
|---------------|-----------------------|------------------------------------|--|
| i | 2 | - | Αριθμός ιόντων στη διαλυμένη ουσία |
| R | 8.315 | $N \cdot m / kg \cdot mol \cdot K$ | Παγκόσμια σταθερά των αερίων |
| M_s | 58,8 | g / mol | Μοριακό βάρος διαλυμένης ουσίας |
| T | 298 | K | Θερμοκρασία |
| ρ_b | 1.040 | kg / m^3 | Μέση πυκνότητα άλμης |
| ρ_p | 1.000 | kg / m^3 | Μέση πυκνότητα καθαρού νερού |
| μ_b | $1,02 \cdot 10^{-3}$ | $kg / m \cdot s$ | Ιξώδες άλμης |
| μ_p | $0,9 \cdot 10^{-3}$ | $kg / m \cdot s$ | Ιξώδες αφαλατωμένου νερού |
| D | $1,5 \cdot 10^{-9}$ | m^2 / s | Συντελεστής διάχυσης αλάτων στο νερό |
| P_{swip} | 4,93 | atm | Πίεση αντλίας τροφοδοσίας θαλασσινού νερού |
| eff_{swip} | 0,74 | - | Βαθμός απόδοσης αντλίας τροφοδοσίας θαλασσινού νερού |
| eff_{hpp} | 0,74 | - | Βαθμός απόδοσης αντλίας υψηλής πίεσης |
| eff_{ers} | 0,8 | - | Βαθμός απόδοσης συστήματος ανάκτησης ενέργειας |
| f_c | 0,9 | - | Συντελεστής λειτουργίας μονάδας |
| cc_{mod} | 1.520 | $\$$ | Μοναδιαίο κόστος στοιχείου μεμβρανών B-10 |
| A | $4,351 \cdot 10^{-5}$ | $kg / m^2 \cdot s \cdot atm$ | Σταθερά διαπερατότητας καθαρού νερού |
| B | $4 \cdot 10^{-9}$ | m / s | Σταθερά διαπερατότητας αλάτων |
| R_i | $1,27 \cdot 10^{-2}$ | m | Εσωτερική ακτίνα της δέσμης κοίλων ινών κάθε στοιχείου |
| R_o | $5,334 \cdot 10^{-2}$ | m | Εξωτερική ακτίνα της δέσμης κοίλων ινών κάθε στοιχείου |
| L | 0,75 | m | Μήκος δέσμης κοίλων ινών |
| A_m | 152 | m^2 | Συνολική επιφάνεια μεμβράνης κάθε στοιχείου |
| r_i | $2,1 \cdot 10^{-5}$ | m | Εσωτερική ακτίνα κοίλης ίνας |
| r_o | $5 \cdot 10^{-5}$ | m | Εξωτερική ακτίνα κοίλης ίνας |
| ε | 0,4 | - | Πορώδες των στοιχείων μεμβρανών |
| d_p | $1,2 \cdot 10^{-4}$ | m | Ειδική επιφανειακή διάμετρος |
| C_{pmax} | 500 | ppm | Μέγιστη επιθυμητή αλμυρότητα αφαλατωμένου νερού |

| | | | |
|-------------------------|--------|--------------|--|
| <i>Prodc</i> | 125 | m^3/h | Συνολική παραγωγή αφαλατωμένου νερού |
| <i>Q_{fmax}</i> | 0,917 | m^3/h | Μέγιστη επιτρεπτή παροχή τροφοδοσίας ανά στοιχείο (module) |
| <i>int.</i> | 0,08 | - | Επιτόκιο αναγωγής |
| <i>n</i> | 25 | <i>years</i> | Χρόνος ζωής εγκατάστασης |
| <i>C_f</i> | 41.000 | <i>ppm</i> | Μέση αλμυρότητα νερού τροφοδοσίας |
| <i>CRF</i> | 0,094 | - | Συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου |

Πίνακας 4.1: Πίνακας δεδομένων προβλήματος βελτιστοποίησης

Οι μεταβλητές απόφασης του μοντέλου είναι:

| A/A | Σύμβολο | Μονάδα | Περιγραφή |
|-----|-------------|------------------|---|
| 1 | P_p | <i>atm</i> | Μέση πίεση στο εσωτερικό της κοίλης ίνας |
| 2 | P_b | <i>atm</i> | Μέση πίεση στο εσωτερικό του δοχείου πίεσης |
| 3 | Q_b | m^3/h | Ογκομετρική παροχή άλμης |
| 4 | C_m | <i>ppm</i> | Συγκέντρωση αλάτων στην επιφάνεια της μεμβράνης |
| 5 | C_b | <i>ppm</i> | Συγκέντρωση αλάτων ρεύματος άλμης |
| 6 | C_p | <i>ppm</i> | Συγκέντρωση αλάτων ρεύματος καθαρού νερού |
| 7 | C_f | <i>ppm</i> | Συγκέντρωση αλάτων νερού τροφοδότησης |
| 8 | Q_f | m^3/h | Ογκομετρική παροχή νερού τροφοδότησης |
| 9 | P_f | <i>atm</i> | Πίεση λειτουργίας αντλίας υψηλής πίεσης |
| 10 | Q_p | m^3/h | Ογκομετρική παροχή καθαρού νερού |
| 11 | V_w | <i>m/h</i> | Ταχύτητα ροής νερού |
| 12 | J_s | $kg/m^2 \cdot h$ | Ροή αλάτων δια της μεμβράνης |
| 13 | U_{si} | <i>m/s</i> | Επιφανειακή ταχύτητα στην εσωτερική ακτίνα της δέσμης κοίλων ινών |
| 14 | U_{so} | <i>m/s</i> | Επιφανειακή ταχύτητα στην εξωτερική ακτίνα της δέσμης κοίλων ινών |
| 15 | U_s | <i>m/s</i> | Μέση λογαριθμική επιφανειακή ταχύτητα |
| 16 | J_w | $kg/m^2 \cdot h$ | Ροή νερού δια της μεμβράνης |
| 17 | k_s | <i>m/s</i> | Συντελεστής μεταφοράς μάζας |
| 18 | NM | - | Αριθμός στοιχείων μεμβράνης |
| 19 | P_{out} | <i>atm</i> | Μέση πίεση για τον υπολογισμό ανάκτησης ενέργειας |
| 20 | Q_{feed} | m^3/h | Συνολική παροχή νερού τροφοδότησης |
| 21 | Re | - | Αριθμός Reynolds |
| 22 | Sc | - | Αριθμός Schmidt |
| 23 | Sh | - | Αριθμός Sherwood |
| 24 | CC_{swip} | \$ | Κεφαλαιουχικό κόστος τροφοδότησης και προκατεργασίας νερού |
| 25 | CC_{hpp} | \$ | Κεφαλαιουχικό κόστος αντλιών υψηλής πίεσης |
| 26 | CC_{ers} | \$ | Κεφαλαιουχικό κόστος συστήματος ανάκτησης ενέργειας |
| 27 | CC_{prm} | \$ | Κεφαλαιουχικό κόστος στοιχείων μεμβράνης |
| 28 | CC_{pec} | \$ | Κεφαλαιουχικό κόστος εξοπλισμού μονάδας |
| 29 | CC_{cw} | \$ | Κεφαλαιουχικό κόστος έργων υποδομής |
| 30 | CC_{ic} | \$ | Έμμεσο κεφαλαιουχικό κόστος |
| 31 | TCC | \$ | Συνολικό κεφαλαιουχικό κόστος |

| | | | |
|----|-----------|------------|--|
| 32 | CO_{cc} | \$ | Λειτουργικό κόστος κεφαλαίου |
| 33 | CO_{rp} | \$ | Λειτουργικό κόστος αλλαγής στοιχείων μεμβράνης |
| 34 | CO_{en} | \$ | Λειτουργικό κόστος ενέργειας |
| 35 | CO_{sp} | \$ | Λειτουργικό κόστος ανταλλακτικών |
| 36 | CO_{ch} | \$ | Λειτουργικό κόστος χημικών |
| 37 | CO_{om} | \$ | Λειτουργικό κόστος λειτουργίας και συντήρησης |
| 38 | AOC | \$ | Ετήσιο λειτουργικό κόστος |
| 39 | $COST$ | \$ / m^3 | Κόστος ανά m^3 αφαλατωμένου νερού |

Πίνακας 4.2: Πίνακας μεταβλητών απόφασης προβλήματος βελτιστοποίησης

4.4.2 Περιορισμοί

Οι περιορισμοί του παρόντος προβλήματος βελτιστοποίησης αποτελούν και τον πυρήνα του. Αποτελούνται από τις μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν τη διεργασία (μοντέλο διεργασίας) σε ένα στοιχείο, στο σύνολο της εγκατάστασης, αλλά και τις σχέσεις κόστους της διεργασίας. Επίσης, λόγω της φύσεως του προβλήματος, δίνονται αρχικές τιμές και επιτρεπτά όρια διακύμανσης των τιμών ορισμένων βασικών μεταβλητών, ώστε να αποφευχθούν προβλήματα (πχ. διαιρέσεις με το μηδέν κλπ.) από τον solver. Ειδικότερα, έχουμε: [8,22,23]

➤ Σε κάθε στοιχείο μεμβρανών:

| A/A | Σχέση | Περιγραφή |
|-----|---|---|
| 1 | $J_w = 3600 \cdot A \cdot (P_b - P_p - \frac{i \cdot R \cdot T \cdot \rho_b \cdot (C_m - C_p)}{10^6 \cdot M_s \cdot 101325})$ | Ροή νερού μέσω της μεμβράνης |
| 2 | $J_s = \frac{3600 \cdot B \cdot \rho_b \cdot (C_m - C_p)}{10^6}$ | Ροή αλάτων μέσω της μεμβράνης |
| 3 | $V_w = \frac{J_w + J_s}{\rho_p}$ | Ταχύτητα ροής (διείσδυσης) καθαρού νερού |
| 4 | $C_p = \frac{J_s \cdot 10^6}{V_w \cdot \rho_p}$ | Συγκέντρωση αλάτων ρεύματος καθαρού νερού |
| 5 | $Q_p = V_w \cdot A_m$ | Ογκομετρική παροχή καθαρού νερού |
| 6 | $Q_f = Q_b + Q_p$ | Ισοζύγιο ροής |
| 7 | $Q_f \cdot C_f = Q_b \cdot C_b + Q_p \cdot C_p$ | Ισοζύγιο μάζας |
| 8 | $U_{SI} = \frac{Q_f}{3600 \cdot 2\pi \cdot R_i \cdot L}$ | Επιφανειακή ταχύτητα στην εσωτερική ακτίνα της δέσμης κοίλων ινών |
| 9 | $U_{SO} = \frac{Q_f - V_w \cdot A_m}{3600 \cdot 2\pi \cdot R_o \cdot L}$ | Επιφανειακή ταχύτητα στην εξωτερική ακτίνα της δέσμης κοίλων ινών |
| 10 | $U_s = \frac{U_{SI} - U_{SO}}{\ln(\frac{U_{SI}}{U_{SO}})}$ | Μέση λογαριθμική επιφανειακή ταχύτητα |

| | | |
|----|---|---|
| 11 | $Re = \frac{2 \cdot r_o \cdot U_s \cdot \rho_b}{\mu_b}$ | Αριθμός Reynolds |
| 12 | $Sc = \frac{\mu_b}{\rho_b \cdot D}$ | Αριθμός Schmidt |
| 13 | $Sh = 2,725 \cdot Re^{1/3} \cdot Sc^{1/3}$ | Αριθμός Sherwood |
| 14 | $k_s = \frac{Sh \cdot D}{2 \cdot r_o}$ | Συντελεστής μεταφοράς μάζας |
| 15 | $\Phi = \frac{C_m - C_p}{C_b - C_p} = e^{\left(\frac{V_w}{3600 \cdot k_s}\right)}$ | Πόλωση συγκέντρωσης |
| 16 | $P_p = 1 + \frac{16 \cdot \mu_p \cdot r_o \cdot V_w \cdot L^2}{2 \cdot 3600 \cdot r_i^4 \cdot 101325}$ | Μέση πίεση στο εσωτερικό της κοίλης ίνας |
| 17 | $P_b = P_f - \frac{150 \cdot (1-\varepsilon)^2 \cdot \mu_b \cdot U_s \cdot (R_o - R_i)}{2 \cdot \varepsilon^3 \cdot d_p^2 \cdot 101325} - \frac{1,75 \cdot (1-\varepsilon) \cdot \rho_b \cdot U_s^2 \cdot (R_o - R_i)}{2 \cdot \varepsilon^3 \cdot d_p \cdot 101325}$ | Μέση πίεση στο εσωτερικό του δοχείου πίεσης |

Πίνακας 4.3: Μαθηματική περιγραφή αφαλάτωσης σε ένα στοιχείο μεμβρανών σύμφωνα με το μοντέλο των Al-Bastaki και Abbas

➤ Στο σύνολο της μονάδας:

| A/A | Σχέση | Περιγραφή |
|-----|---|---|
| 18 | $Prodc = Q_p \cdot NM$ | Συνολική παραγωγή αφαλατωμένου νερού |
| 19 | $Q_{feed} = Q_f \cdot NM$ | Συνολική παροχή νερού τροφοδότησης |
| 20 | $P_{out} = 2 \cdot P_b - P_f$ | Μέση πίεση για τον υπολογισμό ανάκτησης ενέργειας |
| 21 | $Prodc \cdot C_{max} \geq Q_p \cdot NM \cdot C_p$ | Περιορισμός μέγιστης συγκέντρωσης αλάτων αφαλατωμένου νερού |
| 22 | $Q_f \leq Q_{fmax}$ | Περιορισμός παροχής τροφοδοσίας ανά στοιχείο |
| 23 | $P_{out} \leq P_f$ | Περιορισμός τιμής για την P_{out} |

Πίνακας 4.4: Μαθηματική περιγραφή αφαλάτωσης στο σύνολο της μονάδας

➤ Εξισώσεις κόστους:

| Α/Α | Σχέση | Περιγραφή |
|-----|---|--|
| 24 | $cc_{swip} = 996 \cdot (24 \cdot Q_{feed})^{0,8}$ | Κεφαλαιουχικό κόστος τροφοδότησης και προκατεργασίας νερού |
| 25 | $cc_{hpp} = 81 \cdot (1,01325 \cdot P_f \cdot Q_{feed})^{0,96}$ | Κεφαλαιουχικό κόστος αντλιών υψηλής πίεσης |
| 26 | $cc_{ers} = 81 \cdot (P_{out} \cdot 1,01325)^{0,96} \cdot (Q_{feed} - Prodc)^{0,96}$ | Κεφαλαιουχικό κόστος συστήματος ανάκτησης ενέργειας |
| 27 | $cc_{prm} = NM \cdot cc_{mod}$ | Κεφαλαιουχικό κόστος στοιχείων μεμβράνης |
| 28 | $cc_{pec} = cc_{swip} + cc_{hpp} + cc_{ers} + cc_{prm}$ | Κεφαλαιουχικό κόστος εξοπλισμού μονάδας |
| 29 | $cc_{cw} = 0,1 \cdot cc_{pec}$ | Κεφαλαιουχικό κόστος έργων υποδομής |
| 30 | $cc_{ic} = 0,1 \cdot cc_{pec}$ | Έμμεσο κεφαλαιουχικό κόστος |
| 31 | $TCC = cc_{pec} + cc_{cw} + cc_{ic}$ | Συνολικό κεφαλαιουχικό κόστος |
| 32 | $co_{cc} = 0,08 \cdot TCC$ | Λειτουργικό κόστος κεφαλαίου |
| 33 | $co_{rp} = 0,2 \cdot NM \cdot cc_{mod}$ | Λειτουργικό κόστος αλλαγής στοιχείων μεμβράνης |
| 34 | $co_{en} = 0,03 \cdot f_c \cdot \left[\frac{P_{swip} \cdot Q_{feed} \cdot 24}{eff_{swip}} + \frac{P_f \cdot 1,01325 \cdot Q_{feed} \cdot 24}{eff_{hpp}} - eff_{ers} \cdot P_{out} \cdot 1,01325 \cdot 24 \cdot (Q_{feed} - Prodc) \right]$ | Λειτουργικό κόστος ενέργειας |
| 35 | $co_{sp} = Prodc \cdot 24 \cdot 365 \cdot f_c \cdot 0,033$ | Λειτουργικό κόστος ανταλλακτικών |
| 36 | $co_{ch} = Q_{feed} \cdot 24 \cdot 365 \cdot f_c \cdot 0,018$ | Λειτουργικό κόστος χημικών |
| 37 | $co_{om} = Prodc \cdot 24 \cdot 365 \cdot f_c \cdot 0,126$ | Λειτουργικό κόστος λειτουργίας και συντήρησης |
| 38 | $AOC = co_{cc} + co_{rp} + co_{en} + co_{sp} + co_{ch} + co_{om}$ | Ετήσιο λειτουργικό κόστος |

Πίνακας 4.5: Εξισώσεις κόστους μονάδας αφαλάτωσης

➤ Αρχικές τιμές και εύρος διακύμανσης τιμών βασικών μεταβλητών:

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για να αποφευχθούν προβλήματα στον solver κατά την επίλυση του προβλήματος (όπως διαιρέσεις με το μηδέν για μηδενικές αρχικές τιμές μεταβλητών που βρίσκονται σε παρονομαστή κλάσματος κλπ.), αλλά και για διευκολύνουμε την εξεύρεση λύσης, είναι δυνατόν να δοθούν αρχικές τιμές (initial values) σε ορισμένες μεταβλητές. Επίσης δίνονται και κατάλληλα όρια (bounds) στις τιμές που μπορούν να πάρουν οι μεταβλητές. Τα όρια αυτά είτε αποτελούν περιορισμούς λόγω των απαιτήσεων της διεργασίας, είτε κυρίως εκτιμήσεις του δημιουργού του μοντέλου.

Συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία, τα κατώτατα όρια των μεταβλητών επιλέχθηκαν βάσει μιας πρωταρχικής επίλυσης του προβλήματος με συνήθεις τιμές από την βιβλιογραφία. Τα ανώτατα όρια αποτελούν κυρίως εκτιμήσεις του δημιουργού του μοντέλου, όμως έτσι κι αλλιώς, δεν επηρεάζουν την επίλυση του προβλήματος.

Λόγω της φύσης του μοντέλου δεν χρειάστηκε τελικά να δοθούν αρχικές τιμές σε μεταβλητές, καθώς παρατηρήθηκε σύγκλιση με τη χρήση μόνο ορίων στις μεταβλητές. [8]**

| Σύμβολο | Μονάδα | Κατώτατη Τιμή | Ανώτατη Τιμή | Περιγραφή |
|----------------------|------------------|---------------------|--------------|---|
| P_p | atm | 5 | - | Αρχική εκτίμηση |
| P_b | atm | 50 | 67,9 | Αρχική εκτίμηση |
| Q_b | m^3/h | 0,4 | 0,917 | Αρχική εκτίμηση |
| C_m | ppm | 50.100 | 70.000 | Εκτίμηση λόγω πόλωσης συγκέντρωσης |
| C_b | ppm | 50.000 | 70.000 | Αρχική εκτίμηση |
| C_p | ppm | 100 | 500 | Εκτίμηση λόγω περιορισμού στη συγκέντρωση αλάτων |
| Q_f | m^3/h | 0,5 | 0,917 | Εκτίμηση λόγω περιορισμού στην παροχή τροφοδότησης ανά στοιχείο |
| P_f | atm | 55 | 67,9 | Περιορισμός στην πίεση λειτουργίας του στοιχείου |
| Q_p | m^3/h | 0,2 | 0,917 | Αρχική εκτίμηση |
| V_w | m/h | 10^{-4} | 0,1 | Αρχική εκτίμηση |
| J_s | $kg/m^2 \cdot h$ | $6 \cdot 10^{-4}$ | - | Αρχική εκτίμηση |
| U_{si} | m/s | $3 \cdot 10^{-3}$ | - | Αρχική εκτίμηση |
| U_{so} | m/s | 10^{-4} | - | Αρχική εκτίμηση |
| $\ln(U_{si}/U_{so})$ | - | 1,1 | - | Αρχική εκτίμηση |
| J_w | $kg/m^2 \cdot h$ | 1,3 | - | Αρχική εκτίμηση |
| k_s | m/s | $1,4 \cdot 10^{-5}$ | - | Αρχική εκτίμηση |
| NM | - | 272 | 800 | Αρχική εκτίμηση |
| P_{out} | atm | 45 | 67,9 | Αρχική εκτίμηση |
| Q_{feed} | m^3/h | 200 | 450 | Περιορισμός ισχύος εξισώσεων κόστους CC_{hpp} και CC_{ers} |
| Re | - | 0,1 | - | Αρχική εκτίμηση |
| Sc | - | 500 | - | Αρχική εκτίμηση |
| Sh | - | 10 | - | Αρχική εκτίμηση |
| Φ | - | 1,001 | 1,006 | Εκτίμηση από βιβλιογραφία** |

Πίνακας 4.6: Επιτρεπτά όρια τιμών των μεταβλητών

4.4.3 Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος είναι η συνάρτηση προς βελτιστοποίηση. Στην παρούσα εργασία, η αντικειμενική συνάρτηση είναι η συνάρτηση κόστους ανά m³ αφαλατωμένου νερού και ζητείται το ελάχιστο κόστος, δεδομένων των περιορισμών. Θα έχουμε:

$$COST = \frac{(TCC \cdot CRF) + AOC}{Prodc \cdot 24 \cdot 365}$$

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (σε \$/m³) αποδίδεται κάθε φορά σε μια μεταβλητή, με την ονομασία *COST*. Αυτό γίνεται λόγω απαίτησης του *GAMS*. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

5.1 Αποτελέσματα αρχικής περίπτωσης

Η αρχική περίπτωση ελαχιστοποίησης κόστους της μονάδας αντίστροφης όσμωσης περιέχει ως δεδομένα και μεταβλητές, τα στοιχεία που δόθηκαν στους πίνακες 1 και 2 του προηγούμενου κεφαλαίου. Από τα στοιχεία αυτά, ξεχωρίζουν πρωτίστως τα εξής:

- C_f : συγκέντρωση αλάτων νερού τροφοδότησης (ppm)
- C_p : συγκέντρωση αλάτων αφαλατωμένου (καθαρού) νερού (ppm)
- P_f : πίεση λειτουργίας (πίεση αντλίας υψηλής πίεσης) (atm)
- Q_f : ογκομετρική παροχή τροφοδοσίας ανά στοιχείο (m^3/h)
- Q_p : ογκομετρική παροχή καθαρού νερού (εξόδου) ανά στοιχείο (m^3/h)
- NM : αριθμός στοιχείων μεμβρανών

Το χαρακτηριστικό αυτών των στοιχείων είναι ότι αποτελούν τους βασικούς άξονες του προβλήματος, που καθορίζουν τις τιμές των υπολοίπων μεταβλητών.

Στην αρχική περίπτωση που εξετάστηκε, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα οι τιμές του πίνακα 1. Συγκεκριμένα, για τις μεταβλητές που αναφέρθηκαν παραπάνω είχαμε:

| Σύμβολο | Τιμή | Μονάδα | Περιγραφή |
|-------------------------|---------------|-----------------------|--------------------------------------|
| $Prodc (=Q_p \cdot NM)$ | 125 (3.000) | m^3/h (m^3/d) | Συνολική παραγωγή αφαλατωμένου νερού |
| C_f | 41.000 | ppm | Μέση αλμυρότητα νερού τροφοδοσίας |

Οι μεταβλητές αυτές είχαν σταθερή τιμή, λόγω των απαιτήσεων σχεδιασμού του προβλήματος. Οι υπόλοιπες μεταβλητές έλαβαν τιμή κατά την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Η διακύμανση των τιμών των υπολοίπων αυτών μεταβλητών έγινε μέσα στα όρια που τέθηκαν και παρουσιάστηκαν στον πίνακα 3. Συγκεκριμένα, για τις εν λόγω μεταβλητές είχαμε:

| Σύμβολο | Μονάδα | Κατώτατη Τιμή | Ανώτατη Τιμή | Περιγραφή |
|---------|---------|---------------|--------------|---|
| C_p | ppm | 100 | 500 | Μέγιστη επιθυμητή αλμυρότητα αφαλατωμένου νερού |
| Q_f | m^3/h | 0,5 | 0,917 | Εκτίμηση λόγω περιορισμού στην παροχή τροφοδότησης ανά στοιχείο |
| P_f | atm | 55 | 67,9 | Περιορισμός στην πίεση λειτουργίας του στοιχείου |
| Q_p | m^3/h | 0,2 | 0,917 | Αρχική εκτίμηση |
| NM | - | 272 | 800 | Αρχική εκτίμηση |

Τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης που ελήφθησαν από την περίπτωση αυτή παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

| Σύμβολο | Βελτιστοποιημένη Τιμή | Μονάδα | Περιγραφή |
|-------------|-----------------------|---------------------|---|
| P_p | 6,005 | atm | Μέση πίεση στο εσωτερικό της κοίλης ίνας |
| P_b | 67,837 | atm | Μέση πίεση στο εσωτερικό του δοχείου πίεσης |
| Q_b | 0,603 | m^3/h | Ογκομετρική παροχή άλμης |
| C_m | 59.042,027 | ppm | Συγκέντρωση αλάτων στην επιφάνεια της μεμβράνης |
| C_b | 58.902,343 | ppm | Συγκέντρωση αλάτων ρεύματος άλμης |
| C_p | 500 | ppm | Συγκέντρωση αλάτων ρεύματος καθαρού νερού |
| Q_f | 0,869 | m^3/h | Ογκομετρική παροχή νερού τροφοδότησης |
| P_f | 67,859 | atm | Πίεση λειτουργίας αντλίας υψηλής πίεσης |
| Q_p | 0,267 | m^3/h | Ογκομετρική παροχή καθαρού νερού |
| V_w | 0,002 | m/h | Ταχύτητα ροής νερού |
| J_s | $8,767 \cdot 10^{-4}$ | $kg/m^2 \cdot h$ | Ροή αλάτων δια της μεμβράνης |
| U_{si} | 0,004 | m/s | Επιφανειακή ταχύτητα στην εσωτερική ακτίνα της δέσμης κοίλων ινών |
| U_{so} | $6,663 \cdot 10^{-4}$ | m/s | Επιφανειακή ταχύτητα στην εξωτερική ακτίνα της δέσμης κοίλων ινών |
| U_s | 0,002 | m/s | Μέση λογαριθμική επιφανειακή ταχύτητα |
| J_w | 1,753 | $kg/m^2 \cdot h$ | Ροή νερού δια της μεμβράνης |
| k_s | $2,039 \cdot 10^{-4}$ | m/s | Συντελεστής μεταφοράς μάζας |
| NM | 469 | - | Αριθμός στοιχείων μεμβράνης |
| P_{out} | 67,814 | atm | Μέση πίεση για τον υπολογισμό ανάκτησης ενέργειας |
| Q_{feed} | 407,784 | m^3/h | Συνολική παροχή νερού τροφοδότησης |
| Re | 0,191 | - | Αριθμός Reynolds |
| Sc | 653,846 | - | Αριθμός Schmidt |
| Sh | 13,593 | - | Αριθμός Sherwood |
| Φ | 1,002 | - | Πόλωση συγκέντρωσης |
| CC_{swip} | 1.551.600 | \$ | Κεφαλαιουχικό κόστος τροφοδότησης και προκατεργασίας νερού |
| CC_{hpp} | 1.507.700 | \$ | Κεφαλαιουχικό κόστος αντλιών υψηλής πίεσης |
| CC_{ers} | 1.060.300 | \$ | Κεφαλαιουχικό κόστος συστήματος ανάκτησης ενέργειας |
| CC_{prm} | 712.880 | \$ | Κεφαλαιουχικό κόστος στοιχείων μεμβράνης |
| CC_{pec} | 4.832.480 | \$ | Κεφαλαιουχικό κόστος εξοπλισμού μονάδας |
| CC_{cw} | 483.248 | \$ | Κεφαλαιουχικό κόστος έργων υποδομής |
| CC_{ic} | 483.248 | \$ | Έμμεσο κεφαλαιουχικό κόστος |
| TCC | 5.798.976 | \$ | Συνολικό κεφαλαιουχικό κόστος |
| CO_{cc} | 463.920 | $\$/year$ | Λειτουργικό κόστος κεφαλαίου |
| CO_{rp} | 142.580 | $\$/year$ | Λειτουργικό κόστος αλλαγής στοιχείων μεμβράνης |
| CO_{en} | 16.240 | $\$/year$ | Λειτουργικό κόστος ενέργειας |
| CO_{sp} | 32.522 | $\$/year$ | Λειτουργικό κόστος ανταλλακτικών |
| CO_{ch} | 57.869 | $\$/year$ | Λειτουργικό κόστος χημικών |
| CO_{om} | 124.170 | $\$/year$ | Λειτουργικό κόστος λειτουργίας και συντήρησης |
| AOC | 837.301 | $\$/year$ | Ετήσιο λειτουργικό κόστος |
| COST | 1,261 | $\$/m^3 \cdot year$ | Κόστος ανά m^3 αφαλατωμένου νερού |

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα αρχικής περίπτωσης βελτιστοποίησης

Θα πρέπει να αναφερθεί στο σημείο αυτό, ότι όλες οι μεταβλητές θεωρήθηκαν *συνεχείς*, δηλαδή μπορούν να λάβουν οποιαδήποτε τιμή μέσα στο επιτρεπτό εύρος διακύμανσής τους. Η παραδοχή αυτή καλύπτει το σύνολο των μεταβλητών, εκτός από τη μεταβλητή NM , που αντιπροσωπεύει τον αριθμό των στοιχείων μεμβράνης που απαιτούνται, και συνεπώς θα έπρεπε να είναι ακέραια.

Παρόλα αυτά, μπορούμε να παρακάμψουμε το πρόβλημα αυτό με το να υπολογίσουμε αρχικά το κόστος για συνεχή τιμή της NM , και στη συνέχεια να επιλέξουμε για νέα τιμή την στρογγυλοποιημένη (προς τα πάνω) τιμή της NM και με αυτή ως δεδομένο, να υπολογιστεί τελικά το κόστος. Η προσέγγιση αυτή δίνει πρακτικά το ίδιο ακριβώς αποτέλεσμα με την περίπτωση της συνεχούς μορφής μεταβλητής (διαφορά στο τρίτο δεκαδικό ψηφίο), είναι απαραίτητη όμως, διότι αποφεύγεται έτσι η μετατροπή του προβλήματος σε πρόβλημα Μικτού Ακέραιου Μη Γραμμικού Προγραμματισμού (Mixed Integer Non Linear Programming - MINLP).

Η αποφυγή αυτή αποτελεί κέρδος για την διαδικασία επίλυσης του προβλήματος, διότι για τιμές μεταβλητών τόσο μεγάλες (εδώ $NM = 469$) δεν έχει νόημα ο ορισμός ακεραίας μεταβλητής στο GAMS (εύρος τιμών ακεραίων μεταβλητών: 1 - 100). Στην περίπτωση αυτή λοιπόν, η αρχική τιμή της ήταν $NM = 468,712$ και συνεπώς, επιλέχθηκε η τιμή $NM = 469$ ως σταθερά, για την επόμενη επίλυση του μοντέλου.

Συνοψίζοντας, η βέλτιστη τιμή κόστους που προέκυψε ήταν:

$$\boxed{COST = 1.261 \text{ \$ / m}^3 \cdot \text{year}}$$

και οι τιμές των βασικών παραμέτρων (μεταβλητών) που την καθόρισαν ήταν:

| Σύμβολο | Τιμή | Μονάδα |
|---------|--------|-------------------|
| C_p | 500 | ppm |
| Q_f | 0,869 | m ³ /h |
| P_f | 67,859 | atm |
| Q_p | 0,267 | m ³ /h |
| NM | 469 | - |
| C_f | 41.000 | ppm |

5.2 Μελέτη περιπτώσεων

Στα επόμενα υποκεφάλαια θα εξεταστούν οι δυνατότητες αλλαγής των τιμών των μεταβλητών αυτών και το αποτέλεσμα που επιφέρουν στο τελικό κόστος ανά περίπτωση (μελέτη περιπτώσεων).

5.2.1 Η περίπτωση της μεταβλητής C_f

Κατά την αρχική επίλυση, η συγκέντρωση σε άλατα (αλμυρότητα) του νερού τροφοδότησης θεωρήθηκε σταθερή και ίση με 41.000 ppm , τιμή η οποία είναι τυπική για το επιφανειακό θαλασσινό νερό στο Αιγαίο Πέλαγος, κατά μέσο όρο [10]. Μπορούμε όμως να εξετάσουμε τη επίπτωση που έχει η μεταβλητή αυτή στο τελικό κόστος, εξετάζοντας σενάρια διαφορετικής αλμυρότητας του νερού τροφοδοσίας. Τα αποτελέσματα της μελέτης περίπτωσης ήταν:

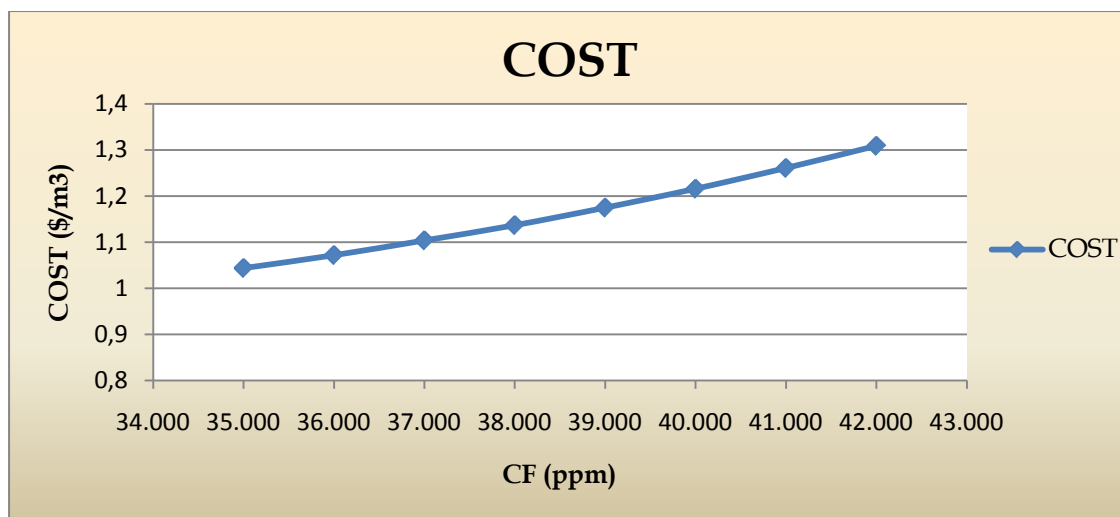
| $C_f \text{ (ppm)}$ | $Q_f \text{ (m}^3/\text{h)}$ | $Q_b \text{ (m}^3/\text{h)}$ | R | COST $(\$/\text{m}^3 \cdot \text{year})$ |
|---------------------|------------------------------|------------------------------|------|--|
| 35.000 | 0,651 | 0,385 | 0,41 | 1,044 |
| 36.000 | 0,680 | 0,413 | 0,39 | 1,072 |
| 37.000 | 0,711 | 0,444 | 0,38 | 1,104 |
| 38.000 | 0,745 | 0,478 | 0,36 | 1,137 |
| 39.000 | 0,782 | 0,516 | 0,34 | 1,175 |
| 40.000 | 0,824 | 0,557 | 0,32 | 1,216 |
| 41.000 | 0,869 | 0,603 | 0,31 | 1,261 |
| 42.000 | 0,917 | 0,650 | 0,29 | 1,309 |

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συναρτήσει της αλμυρότητας του νερού τροφοδότησης

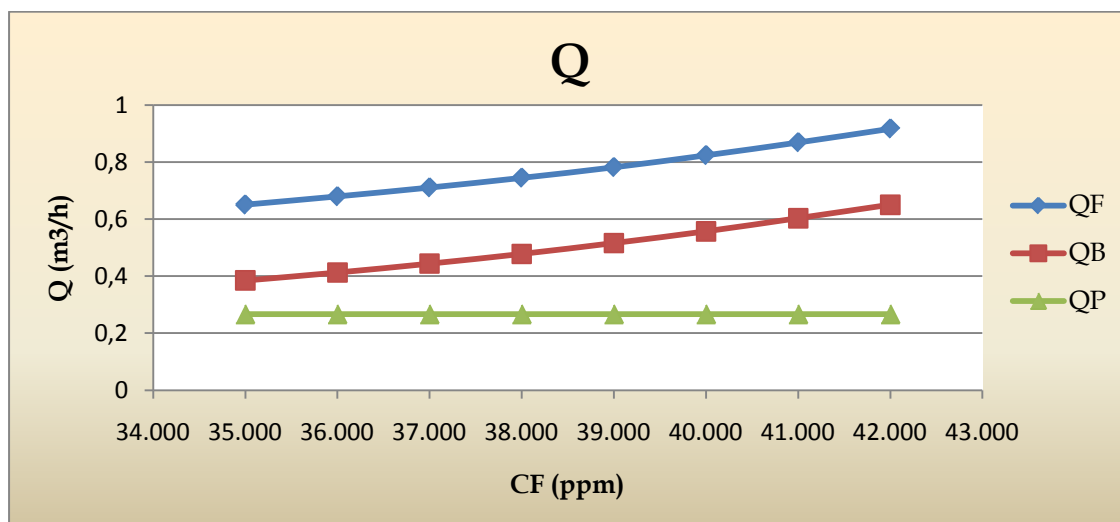
Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η συγκέντρωση των αλάτων στο ρεύμα τροφοδοσίας, τόσο αυξάνεται και το κόστος ανά m^3 του αφαλατωμένου νερού. Επίσης αυξάνεται η ογκομετρική παροχή του νερού τροφοδότησης και η ογκομετρική παροχή της άλμης, με σταθερές τις υπόλοιπες μεταβλητές.

Το αποτέλεσμα αυτό φαίνεται λογικό, διότι ουσιαστικά όσο αυξάνεται η αλμυρότητα του νερού τροφοδότησης τόσο μειώνεται ο βαθμός ανάκτησης (*recovery*) της μονάδας, όπου:

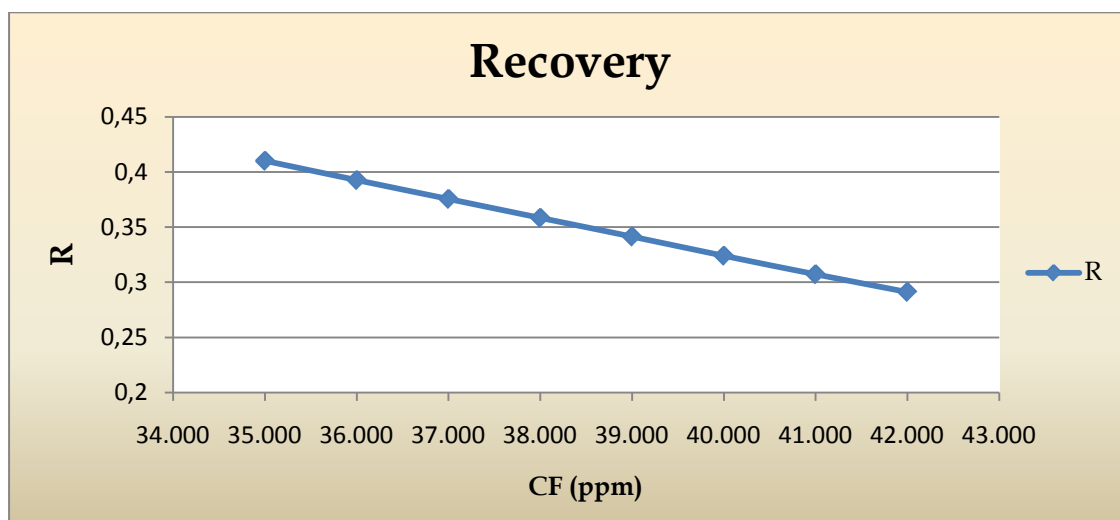
$$\text{Recovery} \rightarrow R = \frac{Q_p}{Q_f} = \frac{\text{Prodc}}{Q_{FEED}}$$



Γράφημα 5.1: Μεταβολή του μοναδιαίου κόστους συναρτήσει της συγκέντρωσης του νερού τροφοδότησης



Γράφημα 5.2: Μεταβολή της ογκομετρικής παροχής συναρτήσει της συγκέντρωσης του νερού τροφοδότησης



Γράφημα 5.3: Μεταβολή του βαθμού ανάκτησης συναρτήσει της συγκέντρωσης του νερού τροφοδότησης

5.2.2 Η περίπτωση της μεταβλητής P_f

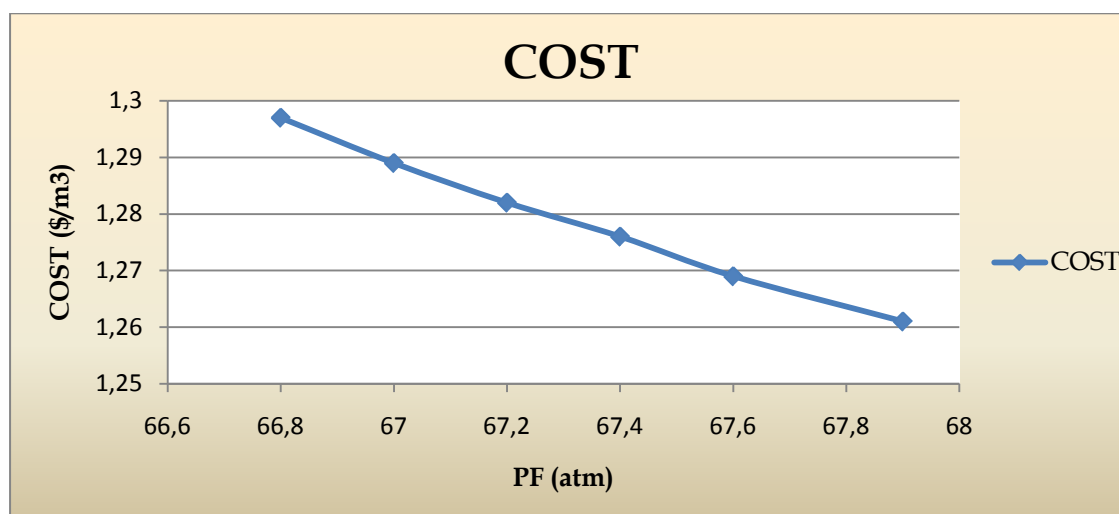
Κατά την αρχική επίλυση του προβλήματος, η μεταβλητή P_f (πίεση λειτουργίας) δεν έλαβε αρχική τιμή, αλλά μόνο άνω και κάτω όρια που αντιπροσωπεύουν το επιτρεπτό εύρος λειτουργίας των στοιχείων μεμβράνης. Συνεπώς, με την ολοκλήρωση της βελτιστοποίησης, η ληφθείσα τιμή P_f ήταν αυτή ελαχιστοποιούσε το κόστος σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες μεταβλητές.

Η βέλτιστη τιμή της P_f είναι πρακτικά το άνω όριο λειτουργίας των μεμβρανών. Το γεγονός αυτό μας προϊδεάζει για την επίπτωση της μεταβολής της πίεσης στο μοναδιαίο κόστος, με σταθερές τις υπόλοιπες βασικές μεταβλητές. Στην μελέτη περίπτωσης που έγινε, διαπιστώθηκε ότι το πρόβλημα δεν έχει λύση για τιμές της $P_f \leq 66,8 \text{ atm}$. Συνεπώς, εξετάστηκε μόνο το εφικτό διάστημα τιμών της μεταβλητής και τα αποτελέσματα ήταν:

| $P_f \text{ (atm)}$ | COST ($\$/m^3 \cdot \text{year}$) |
|---------------------|-------------------------------------|
| 66,8 | 1,297 |
| 67,0 | 1,289 |
| 67,2 | 1,282 |
| 67,4 | 1,276 |
| 67,6 | 1,269 |
| 67,9 | 1,261 |

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συναρτήσει της πίεσης λειτουργίας

Παρατηρούμε ότι η επίδραση της πίεσης λειτουργίας είναι πρακτικά πολύ μικρή στο μοναδιαίο κόστος, δεδομένου του σχεδιασμού του προβλήματος. Επίσης, φαίνεται και η τάση μείωσης του κόστους για λειτουργία σε μεγαλύτερες πιέσεις. Όμως, το εύρος τιμών της P_f είναι μικρό για εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα, και αυτό πιθανώς οφείλεται στο ότι για πιέσεις $P_f \leq 66,8 \text{ atm}$ παραβιάζεται ο περιορισμός της μέγιστης παροχής ανά στοιχείο $Q_f \leq 0,917 \text{ m}^3/\text{h}$ και συνεπώς δεν υπάρχει εφικτή λύση.



Γράφημα 5.4 Μεταβολή του μοναδιαίου κόστους συναρτήσει της επιτρεπτής πίεσης λειτουργίας

5.2.3 Η περίπτωση της μεταβλητής $Prodc$

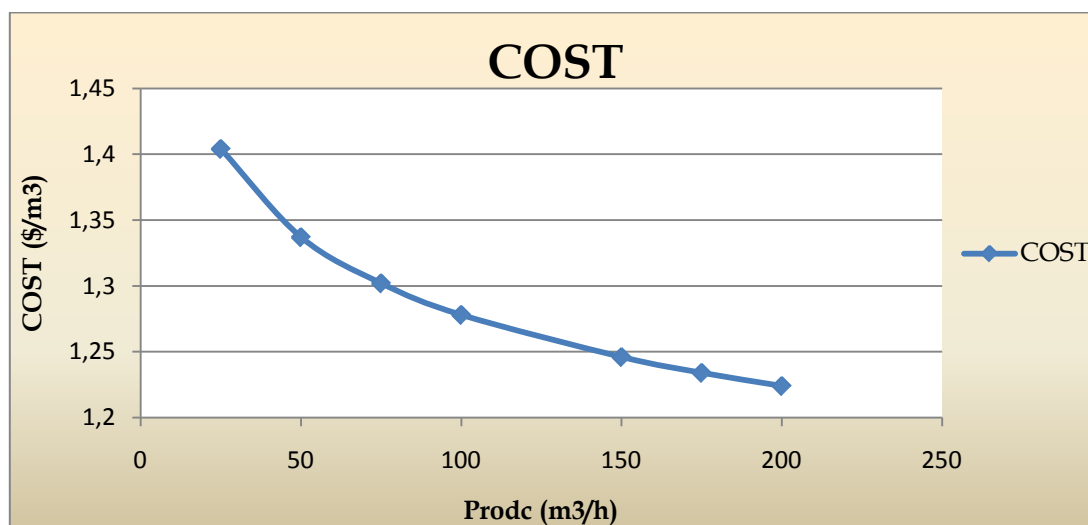
Η μεταβλητή $Prodc$ αποτελεί μια από τις βασικές παραμέτρους σχεδιασμού της μονάδας, καθώς ορίζει την απαιτούμενη παραγωγή αφαλατωμένου νερού. Είναι σύνθετη μεταβλητή, αποτελούμενη από το γινόμενο $Prodc = Q_p \cdot NM$. Στην αρχική επίλυση θεωρήθηκε σταθερή και ίση με $Prodc = 125 \text{ (m}^3\text{/h)}$, το οποίο ερμηνεύεται ως μονάδα δυναμικότητας $3.000 \text{ (m}^3\text{/d)}$. Έχει ενδιαφέρον να εξεταστεί πώς επιδρά η μεταβολή της δυναμικότητας της μονάδας στο μοναδιαίο κόστος. Τα αποτελέσματα ήταν:

| $Prodc \text{ (m}^3\text{/h)}$ | $COST \text{ (\$/m}^3\text{·year)}$ |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| 25 | 1,404 |
| 50 | 1,337 |
| 75 | 1,302 |
| 100 | 1,278 |
| 150 | 1,246 |
| 175 | 1,234* |
| 200 | 1,224* |

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συναρτήσει της δυναμικότητας της μονάδας

Στις παραπάνω περιπτώσεις, θεωρήθηκε σταθερή μόνο η $Cf = 41.000 \text{ ppm}$. Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της δυναμικότητας της μονάδας μειώνεται το μοναδιαίο κόστος του νερού.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στις περιπτώσεις $Prodc = 175$ και $Prodc = 200$ ξεπεράστηκε το όριο $Q_{FEED} \leq 450 \text{ (m}^3\text{/h)}$ και άρα θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί διαφορετική εξίσωση υπολογισμού του κεφαλαιουχικού κόστους των αντλιών υψηλής πίεσης και του συστήματος ανάκτησης ενέργειας. Συνεπώς, οι τιμές του κόστους για τις δυναμικότητες αυτές αποτελούν υποθετικές τιμές, με την υπόθεση ισχύος των ίδιων εξισώσεων κόστους και για $Q_{FEED} \geq 450 \text{ (m}^3\text{/h)}$. [22]



Γράφημα 5.5: Μεταβολή του μοναδιαίου κόστους συναρτήσει της δυναμικότητας της μονάδας

5.2.4 Η περίπτωση της μεταβλητής Q_{FEED}

Η μεταβλητή $Q_{FEED} = Q_f \cdot NM$ σε όλες τις μέχρι στιγμής περιπτώσεις αφέθηκε να λάβει τιμή ελεύθερα, στο διάστημα $250 \leq Q_{FEED} \leq 450$ (m^3/h). Το διάστημα αυτό, όπως προαναφέρθηκε, αποτελεί το επιτρεπτό για την εφαρμογή των εξισώσεων υπολογισμού του κεφαλαιουχικού κόστους των αντλιών υψηλής πίεσης και του συστήματος ανάκτησης ενέργειας.

Η τιμή της μεταβλητής αυτής, η οποία συμπεριλαμβάνεται μεν στις βασικές παραμέτρους του προβλήματος, δεν αποτελεί, εν τέλει, καθοριστικό παράγοντα για τη μονάδα. Κι αυτό, γιατί ο καθορισμός γίνεται συνήθως βάσει της επιθυμητής δυναμικότητας παραγωγής και όχι τροφοδοσίας. Έτσι, αυτό που μας ενδιαφέρει πρωτίστως είναι να καθοριστεί η μεταβλητή **Prodc**, ενώ η Q_{FEED} αρκεί να βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων.

Παρόλα αυτά, μπορούμε να εξετάσουμε πως μεταβάλλεται το μοναδιαίο κόστος συναρτήσει της Q_{FEED} , με την προϋπόθεση ότι η **Prodc** δεν είναι πλέον προκαθορισμένη, αλλά ελεύθερη ως προς τις τιμές που μπορεί να λάβει. Η προϋπόθεση αυτή είναι αναγκαία, διότι το πρόβλημα δεν έχει εφικτή λύση για σταθερές τις τιμές αμφοτέρων των **Prodc**, Q_{FEED} .

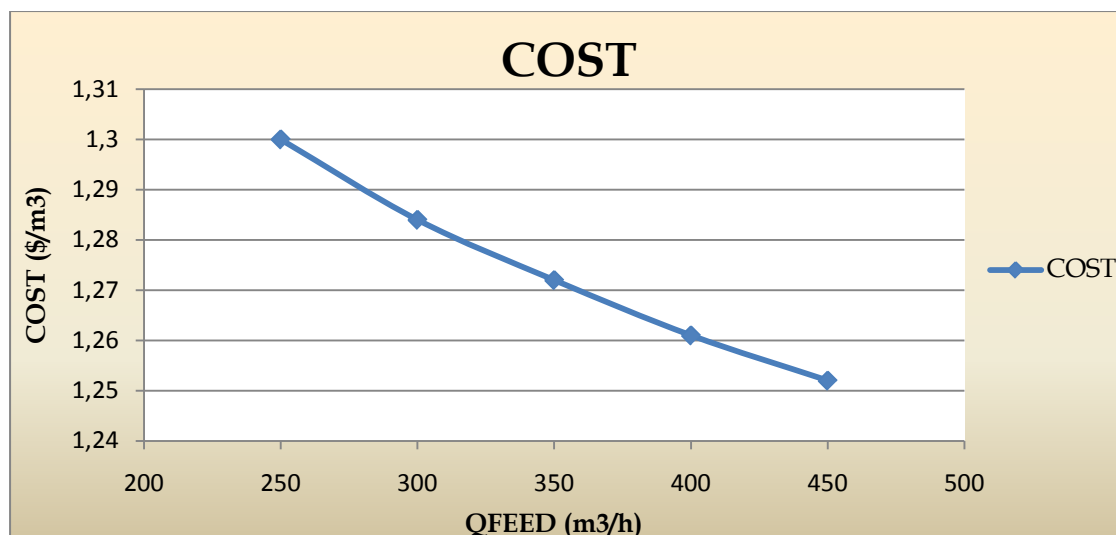
Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν ήταν:

| Q_{FEED} (m^3/h) | PRODC (m^3/h) | R | COST ($\$/m^3 \cdot year$) |
|------------------------|-------------------|------|------------------------------|
| 250 | 76,740 | 0,31 | 1,300 |
| 300 | 92,088 | 0,31 | 1,284 |
| 350 | 107,436 | 0,31 | 1,272 |
| 400 | 122,784 | 0,31 | 1,261 |
| 450 | 138,132 | 0,31 | 1,252 |

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συναρτήσει της παροχής τροφοδότησης

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα κινούνται στην ίδια λογική με την προηγούμενη περίπτωση, δηλαδή, με την αύξηση της παροχής τροφοδότησης της μονάδας (και άρα και της παραγωγικής δυναμικότητας) μειώνεται το μοναδιαίο κόστος του νερού.

Επίσης παρατηρούμε ότι βαθμός ανάκτησης της μονάδος είναι σταθερός, κι αυτό γιατί, όπως φάνηκε στην πρώτη μελέτη περίπτωσης, το R εξαρτάται από την αλμυρότητα του νερού τροφοδότησης C_f και όχι από τις ογκομετρικές παροχές Q .



Γράφημα 5.6: Μεταβολή του μοναδιαίου κόστους συναρτήσει της παροχής τροφοδότησης

5.2.5 Η περίπτωση της μεταβλητής C_p

Η μεταβλητή αυτή αποτελεί την προδιαγραφή για την ποιότητα του αφαλατωμένου νερού. Μέχρι στιγμής, σε όλες τις περιπτώσεις θεωρήθηκε ως ανώτατο όριο στην τιμή της το $C_p \leq 500 \text{ ppm}$, που αποτελεί και το θεωρούμενο ως ανώτατο επιτρεπτό όριο. Έχει πρακτικό ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε πως επιδρά η αλλαγή του ορίου αυτού στο μοναδιαίο κόστος του νερού, καθώς είναι πιθανό να υπάρχουν αυστηρότερες ή χαλαρότερες ($C_p \leq 1.000 \text{ ppm}$) απαιτήσεις σε ορισμένες εφαρμογές. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν ήταν:

| C_p (ppm) | COST (\$/m ³ ·year) |
|-------------|--------------------------------|
| 400 | 1,323 |
| 500 | 1,261 |
| 600 | 1,224 |
| 700 | 1,216 |
| 800 | 1,224 |
| 900 | 1,240 |
| 1.000 | 1,262 |

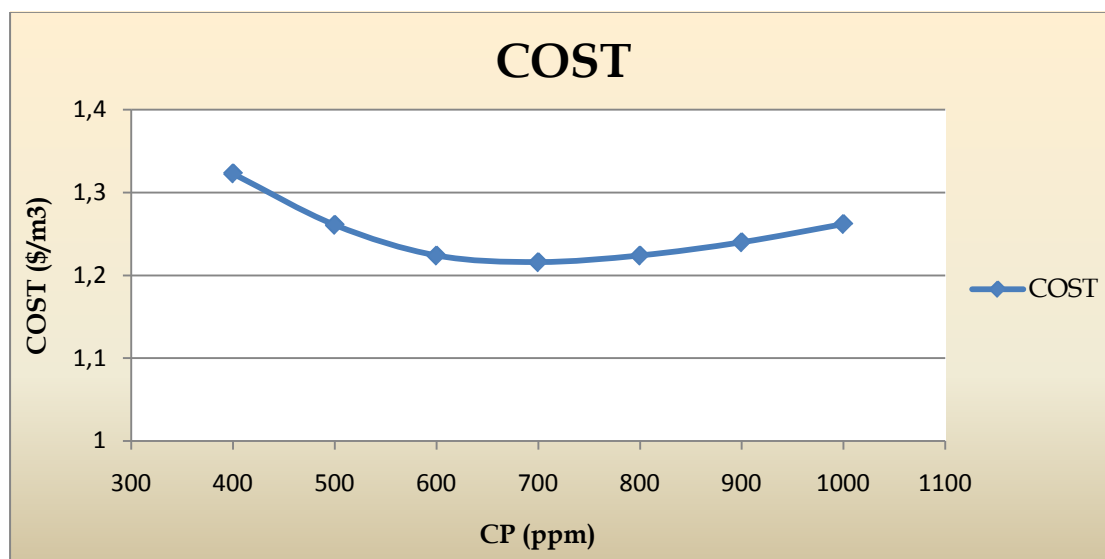
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συναρτήσει της αλμυρότητας του αφαλατωμένου νερού

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η αλμυρότητα (χαλαρώνει ο περιορισμός), τόσο μειώνεται το μοναδιαίο κόστος, μέχρι την τιμή $C_p = 700 \text{ ppm}$. Από την τιμή αυτή και πάνω το κόστος αυξάνεται, αντί να μειώνεται.

Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πιθανώς η διάταξη της μονάδας δεν είναι η κατάλληλη για τιμές $C_p \leq 400 \text{ ppm}$. Θα πρέπει δηλαδή, να εξεταστεί άλλη διαμόρφωση, όπως πχ. δύο σταδίων, με ανακυκλοφορία της άλμης κλπ, που θα καλύπτει τις απαιτήσεις που υπάρχουν.

Στην περίπτωση για $C_p \geq 700$ ppm, το πρόβλημα δεν φαίνεται να είναι η διαμόρφωση της μονάδας, αλλά η αξιοποίηση της υπάρχουσας διαμόρφωσης. Ειδικότερα, γίνεται αντιληπτό ότι για $C_p \geq 700$ ppm καλύπτονται μεν μαθηματικά οι περιορισμοί, όμως για τις δεδομένες συνθήκες (C_f , $Prodc$, P_f) η λειτουργία δεν είναι αποδοτική (μικρή Q_e , μεγάλη NM).

Συνοπτικά, λοιπόν, θα μπορούσαμε να προσθέσουμε ότι η καλύτερη οικονομικά περίπτωση θα ήταν αυτή με $C_p = 700$, δεδομένων των άλλων προδιαγραφών που έχουν τεθεί.



Γράφημα 5.7: Μεταβολή του μοναδιαίου κόστους συναρτήσει της συγκέντρωσης του αφαλατωμένου νερού

5.2.6 Η περίπτωση της ελεύθερης επιλογής τιμών των βασικών μεταβλητών

Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν παραπάνω, είχαν όλες ως κοινό χαρακτηριστικό ότι πάντα κάποια μεταβλητή είχε προκαθορισμένη τιμή (*fixed value variable*), λόγω του σχεδιασμού που έγινε. Αν αφαιρούσαμε αυτόν τον περιοριστικό παράγοντα, θα είχε ενδιαφέρον να δούμε ποια θα ήταν πλέον η βέλτιστη λύση του προβλήματος. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από την τελευταία μελέτη περίπτωσης ήταν:

| Σύμβολο | Τιμή | Μονάδα |
|------------|---------------------|--------------------------|
| C_p | 500 | ppm |
| Q_f | 0,651 | m^3/h |
| P_f | 67,900 | atm |
| Q_p | 0,267 | m^3/h |
| NM | 691 | - |
| C_f | 35.000 | ppm |
| $Prodc$ | 184,345 (4.424,3) | m^3/h (m^3/d) |
| Q_{FEED} | 450 | m^3/h |
| $COST$ | 1,02 | (\$ / $m^3 \cdot year$) |

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα μελέτης περίπτωσης με χρήση ελεύθερων τιμών μεταβλητών

6.1 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αρχικής επίλυσης

Στην παρούσα εργασία, κάνοντας χρήση της γλώσσας μοντελοποίησης GAMS και του solver CONOPT, δημιουργήθηκε και επιλύθηκε ένα πρόγραμμα μη γραμμικού προγραμματισμού, που περιγράφει την λειτουργία μιας μονάδας αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με αντίστροφη όσμωση. Αρχικά, με τον καθορισμό ορισμένων μεταβλητών σχεδιασμού, υπολογίστηκε το ελάχιστο δυνατό μοναδιαίο κόστος αφαλατωμένου νερού ($\$/m^3$) και οι τιμές των μεταβλητών, που το επιτυγχάνουν.

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα που ελήφθησαν και παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, θα μπορούσαμε να αναφέρουμε τα εξής:

- Το ελάχιστο δυνατό μοναδιαίο κόστος αφαλατωμένου νερού, δεδομένων των περιορισμών και των συνθηκών που αναφέρθηκαν, υπολογίστηκε ως:

$$COST_{min} = 1,261 \$/m^3$$

Αν μετατρέψουμε την τιμή αυτή σε € με την τρέχουσα μέση ισοτιμία €/€ :

$$1 \text{ €} = 1,4 \text{ \$ (06/2011)}$$

για να την συγκρίνουμε με τα κόστη που είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία, θα έχουμε:

$$COST_{min} = 0,9 \text{ €/m}^3$$

Η τιμή αυτή παρατηρούμε ότι βρίσκεται εντός των αναμενόμενων ορίων τιμών για το μέγεθος της μονάδας (πίνακας 2.4)

- Το υπολογισθέν κόστος είναι κατά πολύ χαμηλότερο από το μέσο κόστος του μεταφερόμενου νερού στα νησιά. ($\sim 7 \text{ €/m}^3$). Το γεγονός αυτό καθιστά την περίπτωση των μονάδων αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με αντίστροφη όσμωση ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα για τα άνυδρα νησιά του Αιγαίου. [27]
- Σε περιπτώσεις νησιών όπως η Νάξος, η Σάμος και η Σύρος, όπου υπάρχει ικανοποιητικά μεγάλη ζήτηση νερού ώστε να δικαιολογηθεί το μέγεθος της μονάδας που εξετάστηκε στην εργασία, αλλά και μεγάλο έλλειμμα (πίνακας 1.5), το όφελος θα ήταν τεράστιο. Ειδικότερα, αν θεωρήσουμε την μέγιστη ετήσια παραγωγή της παρούσας μονάδας ($3000 \text{ m}^3/d \times 365 \text{ d/yr} = 1.095.000 \text{ m}^3/\text{yr}$) επί την διαφορά μεταξύ των τιμών παραγωγής και μεταφοράς νερού ($7 \text{ €/m}^3 - 0,9 \text{ €/m}^3 = 6,1 \text{ €/m}^3$) θα έχουμε:

$$\Delta C = 1.095.000 \text{ m}^3/\text{yr} \times 6,1 \text{ €/m}^3 = 6.679.500 \text{ €/yr}$$

Η εξοικονόμηση αυτή, αν και στην πραγματικότητα είναι μικρότερη λόγω των προσεγγίσεων που έγιναν για τους επιμέρους υπολογισμούς, είναι της τάξης μεγέθους του συνολικού κεφαλαιουχικού κόστους (TCC) της

προτεινόμενης μονάδας. Συνεπώς, ο χρόνος αποπληρωμής της συγκεκριμένης επένδυσης για το ελληνικό δημόσιο θα ήταν *λιγότερο από ένα έτος*.

- Το υπολογισθέν ελάχιστο μοναδιαίο κόστος, αν και βρίσκεται εντός των αναμενόμενων ορίων, παρουσιάζεται μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα ενδεικτικά κόστη ορισμένων εν λειτουργία μονάδων, ακόμα και με μικρότερη δυναμικότητα. Το γεγονός αυτό αποτελεί μια καλή ένδειξη ότι πιθανόν το πρόβλημα επιδέχεται περαιτέρω υπολογιστική βελτίωση, όπως εξέταση πιθανότητας ανακυκλοφορίας της άλμης, χρήση άλλου τύπου στοιχείων μεμβρανών, όπως σπειροειδούς περιέλιξης (*spiral wound*) κλπ., καθώς επίσης και η περίπτωση εναλλακτικού συστήματος ανάκτησης ενέργειας (*ERS*), όπως εναλλάκτης πίεσης (*pressure exchanger*), καθώς υπάρχουν ενδείξεις στη διεθνή βιβλιογραφία ότι έτσι μειώνεται ακόμα περισσότερο το μοναδιαίο κόστος νερού.
- Για τον υπολογισμό του ελάχιστου μοναδιαίου κόστος αφαλατωμένου νερού, θεωρήθηκε ότι το μοναδιαίο κόστος του στοιχείου μεμβρανών **B-10** ήταν:

$$cc_{mod} = 1.520 \$/module$$

Η τιμή αυτή αποτελεί εκτίμηση, που εμφανίζεται σε διάφορα papers σχετικά με την οικονομική ανάλυση μονάδων αντίστροφης όσμωσης (*1.520 \$/module - Marcovecchio et al. [23], 1.450 \$/module - Voros et al. [34]*). Υπάρχουν όμως και νεότερες δημοσιεύσεις που εκτιμούν το κόστος αυτό χαμηλότερα, (*1.000 \$/module - Yan-yue Lu et al. [20]*). Στην περίπτωση που χρησιμοποιούσαμε την τελευταία εκτίμηση (*1.000 \$/module*), θα είχαμε:

$$COST_{min} = 1,170 \$/m^3 \rightarrow COST_{min} = 0,84 \€/m^3$$

6.2 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μελέτης περιπτώσεων

Αφού υπολογίστηκε το ελάχιστο κόστος κατά την αρχική επίλυση, εξετάστηκε στη συνέχεια η μεταβολή που επιφέρει στο κόστος, η αλλαγή των βασικών μεταβλητών του προβλήματος. Αξιολογώντας, λοιπόν, τα αποτελέσματα που ελήφθησαν και παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, θα μπορούσαμε να αναφέρουμε τα εξής:

- Παρατηρήθηκε ότι η συγκέντρωση των αλάτων στο ρεύμα τροφοδοσίας C_f είναι *ευθέως ανάλογη* με το μοναδιαίο κόστος του αφαλατωμένου νερού, για το εύρος *35.000 ppm–42.000 ppm* και *αντιστρόφως ανάλογη* με το βαθμό ανάκτησης R της μονάδας. Προφανώς λοιπόν, η μείωση του βαθμού ανάκτησης, λόγω αύξησης της συγκέντρωσης τροφοδοσίας, επιδρά αρνητικά στο κόστος του νερού στο δεδομένο εύρος συγκεντρώσεων, καθώς για να διατηρηθεί σταθερή η δυναμικότητα παραγωγής **Prodc**, αυξάνεται η τροφοδοσία Q_{FEED} .

- Η επίδραση της πίεσης λειτουργίας είναι πρακτικά πολύ μικρή στο μοναδιαίο κόστος, δεδομένου του σχεδιασμού του προβλήματος. Πάντως, παρατηρήθηκε τάση μείωσης του κόστους για λειτουργία σε μεγαλύτερες πιέσεις. Όμως, το εύρος τιμών της P_f είναι μικρό για εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για την επιρροή της μεταβλητής, και αυτό πιθανώς οφείλεται στο ότι για πιέσεις $P_f \leq 66,8 \text{ atm}$ παραβιάζεται ο περιορισμός της μέγιστης παροχής ανά στοιχείο $Q_f \leq 0,917 \text{ m}^3/\text{h}$ και συνεπώς δεν υπάρχει εφικτή λύση.
- Παρατηρήθηκε ότι το μέγεθος και η δυναμικότητα της μονάδας (είτε από την σκοπιά της μεταβλητής *Prodc*, είτε της Q_{FEED}) είναι *αντιστρόφως ανάλογα* με το μοναδιαίο κόστος του αφαλατωμένου νερού. Το συμπέρασμα αυτό εξάγεται μεν για το συγκεκριμένο εύρος των τιμών των *Prodc*, Q_{FEED} , όμως είναι εμφανές ότι μπορεί να επεκταθεί και σε μεγαλύτερο εύρος τιμών, καθώς αποτελεί την απόδειξη των οικονομιών κλίμακας (economies of scale) στο κόστος του αφαλατωμένου νερού.
- Ο βαθμός ανάκτησης R της μονάδος *δεν εξαρτάται* από τις τιμές των ογκομετρικών παροχών Q_f και Q_p , αλλά μόνο από τη συγκέντρωση των αλάτων στο ρεύμα τροφοδοσίας C_f , όπως προαναφέρθηκε.
- Η συγκέντρωση των αλάτων στο αφαλατωμένο (καθαρό) νερό C_p , έχει μια ιδιόμορφη επιρροή στο μοναδιαίο κόστος του νερού καθώς βρέθηκε ότι για $400 \leq C_p \leq 700 \text{ ppm}$ το κόστος *μειώνεται* με την *αύξηση* του ορίου συγκέντρωσης, ενώ για $700 < C_p \leq 1000 \text{ ppm}$ το κόστος *αυξάνεται* με την *αύξηση* του ορίου συγκέντρωσης. Η βέλτιστη τιμή του κόστους (μεταβλητή *COST*) ήταν:

$$COST_{min} = 1,216 \text{ \$/m}^3 \rightarrow COST_{min} = 0,87 \text{ €/m}^3 \text{ για } C_p = 700 \text{ ppm}$$

Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο για το πρώτο σκέλος, διότι αναμένουμε μείωση του κόστους όταν χαλαρώνει ο περιορισμός της συγκέντρωσης σε μεγαλύτερες τιμές. Η ιδιαιτερότητα βρίσκεται στο δεύτερο σκέλος, όπου η αύξηση του κόστους που παρατηρείται μπορεί, πιθανόν, να αποδοθεί στο γεγονός ότι καλύπτονται μεν μαθηματικά οι περιορισμοί, όμως για τις δεδομένες συνθήκες (C_f , *Prodc*, P_f) η λειτουργία δεν είναι πλέον αποδοτική (μικρή Q_f , μεγάλη NM).

- Για τιμές $C_p \leq 400 \text{ ppm}$ το πρόβλημα δεν έχει εφικτή λύση, με τις δεδομένες συνθήκες και απαιτήσεις. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πιθανώς η διάταξη της μονάδας δεν είναι η κατάλληλη για τιμές $C_p \leq 400 \text{ ppm}$. Θα πρέπει δηλαδή, να εξεταστεί άλλη διαμόρφωση, όπως πχ. δύο σταδίων, με ανακυκλοφορία της άλμης κλπ, που θα καλύπτει τις απαιτήσεις που υπάρχουν.

- Στην περίπτωση της ελεύθερης επιλογής τιμών των βασικών μεταβλητών, αφαιρέθηκαν οι περιορισμοί λόγω σχεδιασμού και οι τιμές αφέθηκαν να λάβουν ελεύθερα τιμή, μέσα στα επιτρεπτά όρια. Στην περίπτωση αυτή, το ελάχιστο μοναδιαίο κόστος ήταν αισθητά μειωμένο:

$$COST_{min} = 1,02 \$/m^3 \rightarrow COST_{min} = 0,73 \€/m^3$$

$$\text{για } C_f = 35.000 \text{ ppm και } Prodc = 4.424 \text{ m}^3/d$$

Από το αποτέλεσμα αυτό φαίνεται καθαρά ότι η κατεύθυνση ελαχιστοποίησης του κόστους είναι προς την ελαχιστοποίηση της συγκέντρωσης τροφοδοσίας και μεγιστοποίηση της δυναμικότητας παραγωγής.

6.3 Αξιολόγηση της μεθοδολογίας επίλυσης

Η αξιολόγηση της μεθοδολογίας, που επιλέχθηκε για τη λύση του προβλήματος εύρεσης του ελάχιστου δυνατού κόστους αφαλατωμένου νερού, μπορεί να αναλυθεί στους δύο επιμέρους άξονες που την αποτελούν:

- τη μοντελοποίηση του προβλήματος στη γλώσσα *GAMS*
- την επίλυση του προβλήματος μη γραμμικού προγραμματισμού (*NLP*) με τον solver *CONOPT*

6.3.1 Αξιολόγηση της γλώσσας *GAMS* ως εργαλείο μοντελοποίησης

Το Γενικό Σύστημα Αλγεβρικής Μοντελοποίησης *GAMS* (General Algebraic Modeling System) κρίνεται ιδιαίτερος θετικά, ως προς τη χρήση του και της δυνατότητας που προσφέρει, καθώς:

- Προσφέρει ένα εύχρηστο και κατανοητό περιβάλλον εργασίας.
- Επιτρέπει την εύληπτη οργάνωση του προβλήματος στα δομικά του στοιχεία (*data, variables, equations, model and solve statements*).
- Επιτρέπει την περιγραφή των μοντέλων ανεξάρτητα από τους αλγόριθμους βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται. Έτσι, είναι δυνατόν με μια μικρή αλλαγή στον κώδικα να αλλάξουμε είτε τη φύση του προβλήματος (*NLP, MINLP κλπ.*), είτε τον solver που χρησιμοποιείται (*CONOPT, BARON, CPLEX κλπ.*).
- Επιτρέπει την έκφραση της λογικής του προβλήματος βελτιστοποίησης ανεξάρτητα των δεδομένων που χρησιμοποιούνται κάθε φορά. Έτσι, είναι δυνατόν ένα πρόβλημα να μεγαλώσει ως προς το μέγεθός του, χωρίς να αυξηθεί η πολυπλοκότητά της αναπαράστασής του.

- Δίνει τη δυνατότητα ελέγχου και διόρθωσης των σφαλμάτων που έχουν γίνει από τον χρήστη κατά τη μοντελοποίηση, με άμεσο τρόπο μέσω της κωδικοποίησης σφαλμάτων που χρησιμοποιεί (*error codes*).
- Προσφέρει αναλυτική αναφορά στην έξοδο (*output*) για την πορεία επίλυσης, την λύση, τα στατιστικά και τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης.

Πέρα από πολλά θετικά στοιχεία που παρουσιάζει η χρήση του *GAMS*, θα πρέπει να επισημάνουμε και τα μειονεκτήματά του:

- Επιτρέπει μόνο στατική (αλγεβρική) μοντελοποίηση και όχι δυναμική, καθώς δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν διαφορικές εξισώσεις. Συνεπώς, τα μοντέλα του *GAMS* που περιγράφουν συστήματα, αναφέρονται πάντα σε μόνιμες συνθήκες (*steady state*) και όχι μεταβατικές (*transient state*).
- Δεν επιλύει το ίδιο το *GAMS* το πρόβλημα βελτιστοποίησης, αλλά καλείται μέσω αυτού ένας solver που παρέχει τη λύση. Οι κυριότεροι solvers όμως, απαιτούν αγορά της άδειας χρήσης τους, για χρήση σε προβλήματα με πολλές μεταβλητές και εξισώσεις, που δεν καλύπτονται από την ελεύθερη έκδοσή τους. Συνεπώς, δεν είναι οικονομικά εφικτό να δοκιμάζεται η λύση ενός προβλήματος με διάφορους solvers.

6.3.2 Αξιολόγηση του solver CONOPT και του μη γραμμικού προγραμματισμού

Αξιολογώντας τη χρήση του *CONOPT*, ως solver μη γραμμικού προγραμματισμού, στο συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης, θα μπορούσαμε να αναφέρουμε τα εξής:

- Συγκλίνει ταχύτατα και δίνει τη λύση του εκάστοτε προβλήματος σε ελάχιστο χρόνο ($t \ll 1$ sec).
- Προσφέρει αναλυτικά στοιχεία στην περίληψη της επίλυσης στην έξοδο (*output*).
- Απαιτεί πολλά όρια (bounds) στις τιμές των μεταβλητών, ώστε το πρόβλημα να λαμβάνει εφικτή λύση και να μην εμφανίζονται απροσδιοριστίες όπως διαίρεση με το μηδέν κλπ.
- Το ακρότατο που παρέχει είναι τοπικό (local) και όχι ολικό (global). Συνεπώς, αυτό περιορίζει την αποτελεσματική εφαρμογή του σε στενές περιοχές τιμών του προβλήματος. Για τις περιοχές αυτές, ο χρήστης πρέπει να έχει καλή αίσθηση των τιμών που παίρνουν οι μεταβλητές, ώστε να καθοδηγήσει τον solver προς την λύση, είτε με κατάλληλες αρχικές τιμές, είτε με κατάλληλα όρια μεταβλητών.

Το τελευταίο στοιχείο στην αξιολόγηση του *CONOPT*, αποτελεί και το βασικό μειονέκτημα του μη γραμμικού προγραμματισμού (*NLP*), ότι δηλαδή κατά βάση δεν εγγυάται για την ποιότητα της λύσης.

Αυτό όμως μπορεί να ξεπεραστεί αν λάβουμε υπ' όψιν τον ιδιαίτερα μη γραμμικό χαρακτήρα μερικών προβλημάτων, όπως αυτό που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία, και την αδυναμία να προσεγγίσουμε γραμμικά και με ακρίβεια, τα προβλήματα αυτά. Συνεπώς, με αντάλλαγμα την ρεαλιστική απεικόνιση, εγκαταλείπουμε την αξίωση για εύρεση ολικού ακρότατου (κάτι που προσφέρει ο γραμμικός προγραμματισμός - *LP*) και αναζητούμε την βέλτιστη λύση στο διάστημα που ορίζεται από τους περιορισμούς του προβλήματος.

Το γεγονός αυτό δεν στερεί σε ποιότητα και αξιοπιστία τη λύση που δίνεται, όταν το πρόβλημα φράζεται σωστά. Δηλαδή, όπως συνέβη και στο μοντέλο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της εργασίας, δεν είναι απαραίτητο να βρούμε ένα ολικό ακρότατο σε όλο το εύρος του προβλήματος, αλλά ένα τοπικό, στο πολύ στενό και συγκεκριμένο εύρος στο οποίο επιλέγουμε να ψάξουμε τη λύση.

Στο μοντέλο αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση που δημιουργήθηκε, μας ενδιέφερε το ελάχιστο κόστος νερού, με βάση τις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν (C_f , P_f , C_p , $Prodc$, Q_{FEED} , Q_f κλπ). Το κόστος που βρέθηκε, προφανώς δεν ήταν το ολικό ελάχιστο κόστος αφαλατωμένου νερού, αλλά ένα τοπικό, στην περιοχή όμως που μας ενδιαφέρει.

Πάντως, θα πρέπει να αναφερθεί, ότι υπάρχει περίπτωση, παρόλο τον περιορισμό του προβλήματος σε μια στενή περιοχή, να μην λάβουμε ικανοποιητική λύση από τον solver, λόγω ανυπέρβλητων προβλημάτων που μπορεί να συναντήσει κατά τη λύση (πχ. εγκλωβισμός σε ένα τοπικό ακρότατο). Συνεπώς, το αν η ληφθείσα τιμή αποτελεί αποδεκτή λύση, το αποφασίζει ο δημιουργός του μοντέλου.

6.4 Αξιολόγηση της μεθόδου αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση

Όπως φάνηκε, η τάση στο έλλειμμα νερού εμφανίζεται αυξητική, γεγονός που αποτελεί 'κώδωνα κινδύνου' για τις αποφάσεις που πρέπει να παρθούν. Στο πλαίσιο αυτό, η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης για αφαλάτωση θαλασσινού νερού μπορεί να προσφέρει λύση, παράλληλα με μια ευρύτερη, ολοκληρωμένη πολιτική διαχείρισης των υδατικών πόρων.

Από τα αποτελέσματα της αρχικής επίλυσης και της μελέτης περιπτώσεων, φάνηκε ότι η αφαλάτωση θαλασσινού νερού αποτελεί μια βιώσιμη λύση για την αντιμετώπιση του προβλήματος λειψυδρίας, που αντιμετωπίζουν αρκετές περιοχές της χώρας, ιδίως τα νησιά. Είτε πρόκειται για πόσιμο νερό, είτε για γενικής χρήσης, η αντίστροφη όσμωση μπορεί να συνεισφέρει αποτελεσματικά στην κάλυψη των ελλειμμάτων νερού.

Με την αναμενόμενη πρόοδο της τεχνολογίας μεμβρανών και των συστημάτων ανάκτησης ενέργειας, το κόστος του αφαλατωμένου νερού προβλέπεται να μειωθεί περαιτέρω στο μέλλον, καθιστώντας την αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση την πλέον τεχνολογικά και οικονομικά προσιτή λύση για την ανάκτηση νερού.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- [1] Αφειρίδης Ι., **Ολοκληρωμένος ενεργειακός σχεδιασμός ξενοδοχείων με τη χρήση μαθηματικού προγραμματισμού**, Μεταπτυχιακή εργασία, ΠΜΣ Οργάνωση και διοίκηση βιομηχανικών συστημάτων - Πανεπιστήμιο Πειραιά/ΕΜΠ, Αθήνα, 2009
- [2] Δαγκαλίδης Α., **Κλαδική μελέτη 12 - Αφαλάτωση νερού**, Μονάδα οικονομικής ανάλυσης και αγορών - Τράπεζα Πειραιώς, Αθήνα, 2009
- [3] Δεληγιάννη Ε., Μπελεσιώτης Β., **Μέθοδοι και συστήματα αφαλάτωσης - Αρχές διεργασιών αφαλάτωσης**, Αθήνα, 1995
- [4] Καραχάλιου Π., **Τεχνολογίες αφαλάτωσης και προοπτικές εφαρμογής στον ελληνικό χώρο**, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων - ΕΜΠ, Αθήνα, 2010
- [5] Καρλαύτης Μ.Γ., Λαγαρός Ν.Δ., **Επιχειρησιακή έρευνα και βελτιστοποίηση για μηχανικούς**, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2010
- [6] Μανουσάκης Γ., **Οικογένειες αλγορίθμων βελτιστοποίησης μη γραμμικών συναρτήσεων**, Διδακτορική διατριβή - Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2005
- [7] Παλιεράκης Γ., **Αφαλάτωση με χρήση ηλιακών συλλεκτών**, Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανολόγων μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα, 2007

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- [8] Al - Bastaki N.M., Abbas A., **Modeling an industrial osmosis unit**, Desalination 126, pp. 33 - 39, Elsevier, 1999
- [9] Al - Shayji K.A., **Modeling, simulation and optimization of large-scale commercial desalination units**, Doctoral Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 1998
- [10] Avlonitis S.A., **Operational water cost and productivity improvements for small size RO desalination plants**, Desalination 142, pp. 295 - 304, Elsevier, 2002
- [11] Baker R., **Membrane technology and applications**, 2nd edition, Wiley, 2004
- [12] Chis V., **Nonlinear optimization software CONOPT**, Powerpoint presentation, McMaster University - Canada, 2007
- [13] Cipollina A., Micale G., Rizzuti L., **Seawater desalination - conventional and renewable energy processes**, Green energy and technology volumes, Springer, 2009
- [14] Edgar T., Himmelblau D., Ladson L., **Optimization of chemical processes**, 2nd edition, McGraw - Hill, 2001

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [15] *El – Dessouky H.T., Ettouney H.M., Fundamentals of salt water desalination*, Elsevier, 2002
- [16] *GAMS Development Corporation, The solver manuals - CONOPT*, 2008
- [17] *Gulich J. F., Centrifugal pumps*, Springer, 2008
- [18] *Kucera J., Reverse osmosis – industrial applications and processes*, Scrivener Publishing (Wiley), 2010
- [19] *Li N., Fane A., Winston W.H., Matsuura T., Advanced membrane technology and applications*, Wiley, 2008
- [20] *Lu Y.Y., Hu Y.D., Xu D.M., Wu L.Y., Optimum design of reverse osmosis seawater desalination system considering membrane cleaning and replacing*, Journal of Membrane Science 282, pp. 7 – 13, Elsevier, 2006
- [21] *Luenberger D.G., Ye Y., Linear and nonlinear programming*, International series in operations research and management science, 3rd edition, Springer, 2008
- [22] *Malek A., Hawlader M.N.A., Ho J.C., Design and economics of RO seawater desalination*, Desalination 105, pp. 245 – 261, Elsevier, 1996
- [23] *Marcovecchio M., Aguirre P., Scenna N., Global optimal design of RO networks for seawater desalination: modeling and algorithm*, Desalination 184, pp. 259 - 271, Elsevier, 2005
- [24] *Marcovecchio M., Scenna N., Aguirre P., Improvements of a hollow fiber reverse osmosis desalination model: Analysis of numerical results*, Chemical Engineering Research and Design 88, pp. 789 - 802, Elsevier, 2010
- [25] *McCarl B.A., Expanded GAMS user guide – version 23.3*, GAMS Development Corporation, 2010
- [26] *Mezher T., Fath H., Abbas Z., Khaled A., Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies*, Desalination 266 (1-3), pp. 263 - 273 Elsevier, 2011
- [27] *Mohamed E.S., Papadakis G., Mathioulakis E., Belesiotis V., The effect of hydraulic energy recovery in a small seawater reverse osmosis desalination system – experimental and economical evaluation*, Desalination 184, pp. 241 - 246, Elsevier, 2005
- [28] *Nath K., Membrane separation processes*, Prentice–Hall India, 2008
- [29] *Noble R.D., Stern S.A., Membrane separations technology – principles and applications*, Membrane science and technology series 2, Elsevier, 1995
- [30] *Ravindran A., Ragsdell K.M., Reklaitis G.V., Engineering optimization – methods and applications*, 2nd edition, Wiley, 2006

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [31] *Rosenthal R.E., GAMS - A user's guide*, GAMS Development Corporation, 2010
- [32] *Sekino M., Study of an analytical model for hollow fiber reverse osmosis module systems*, Desalination 100, pp. 85 - 97, Elsevier, 1995
- [33] *Sinha S.M., Mathematical programming - theory and methods*, Elsevier, 2006
- [34] *Voros N.G., Maroulis Z.B., Marinou - Kouris D., Short-cut structural design of reverse osmosis desalination plants*, Journal of Membrane Science 127, pp. 47 - 68, Elsevier, 1997
- [35] *Wang L., Chen J., Hung J., Shammass N., Membrane and desalination technologies*, Handbook of environmental engineering, Volume 13, Humana Press (Springer), 2011
- [36] *Weise T., Global optimization algorithms - theory and application*, 2nd edition, 2009

Διαδίκτυο

- [37] <http://www.lenntech.com/calculators/osmotic/osmotic-pressure.htm>
- [38] <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclegreeki.html>
- [39] <http://www.ec.gc.ca>
- [40] <http://www.ksb.com>
- [41] <http://www.isoenergy.co.uk>
- [42] <http://www.hohusa.net>
- [43] <http://www.desline.com>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.1

ΚΩΔΙΚΑΣ GAMS

General Algebraic Modeling System

Compilation

OPTIMIZATION OF REVERSE OSMOSIS UNIT FOR SEAWATER DESALINATION

6

7

8

9 **SCALARS**

10

11 ions number of ions for ionized solutes /2/

12

13 rgas ideal gas constant (Nm per kg*mol*K) /8315/

14

15 mws molecular weight of solute /58.8/

16

17 tempsw seawater temperature (K) /298/

18

19 rbrine average brine density (kg per m³) /1040/

20

21 rpermeate average pure water density (kg per m³) /1000/

22

23 viscbrine brine viscosity (kg per m*s) /1.02E-3/

24

25 viscperm permeate viscosity (kg per m*s) /0.9E-3/

26

27 diff diffusion coefficient (m² per s) /1.5E-9/

28

29 presswip SWIP outlet pressure (atm) /4.93/

30

31 effswip intake pump efficiency /0.74/

32

33 effhpp high pressure pump efficiency /0.74/
34
35 effers energy recovery system efficiency /0.8/
36
37 fc load factor /0.9/
38
39 ccmmod cost per module (estimation - US dollars) /1520/
40
41 pwpconst pure water permeability constant (kg per m²*s*atm) /4.351E-5/
42
43 spconst salt permeability constant (m per s) /4E-9/
44
45 ribundle inner radius of the fiber bundle (m) /1.27E-2/
46
47 robundle outer radius of the fiber bundle (m) /5.334E-2/
48
49 length length of the fiber bundle (m) /0.75/
50
51 membarea membrane area per module (m²) /152/
52
53 rifiber inner fiber radius (m) /2.1E-5/
54
55 rofiber outer fiber radius (m) /5E-5/
56
57 voidfr void fraction /0.4/
58
59 dp specific surface diameter (m) /1.2E-4/
60
61 CPmax maximum allowed salt concentration in permeate (ppm) /500/
62
63 QFmax maximum feed flow rate per module (m³ per h) /0.917/
64
65 i discount rate /0.08/

66

67 n number of years /25/ ;

68

69

70

71 PARAMETER

72

73 CRF capital recovery factor ;

74

75 $CRF = (i*((1+i)**n))/(((1+i)**n) - 1);$

76

77

78

79 POSITIVE VARIABLES

80

81 *MODEL VARIABLES*

82

83 PF feed pressure (atm)

84

85 CB concentration in the high pressure side (ppm)

86

87 VW velocity of permeation flow (m per h)

88

89 QF feed flow rate per module (m³ per h)

90

91 CF salt concentration of feed stream (ppm)

92

93 QB brine flow rate per module (m³ per h)

94

95 QP permeate flow rate per module (m³ per h)

96

97 CM concentration at the membrane wall (ppm)

98

99 CP concentration of the permeate (ppm)
100
101 KS mass transfer coefficient (m per s)
102
103 NM number of modules
104
105 POUT average pressure used to calculate costs (atm)
106
107 QFEED total seawater feed flow rate (m³ per h)
108
109 PRODC total production required (m³ per h)
110
111 RE Reynolds number
112
113 SC Schmidt number
114
115 SH Sherwood number
116
117 PHI concentration polarization factor
118
119
120 ***COST VARIABLES***
121
122 CCswip seawater intake and pretreatment capital cost (dollars)
123
124 CChpp high pressure pumps capital cost (dollars)
125
126 CCers energy recovery system capital cost (dollars)
127
128 CCprm permeators capital cost (dollars)
129
130 CCpec plant equipment capital cost (dollars)
131

132 CCcw civil work capital cost (dollars)
133
134 CCic indirect capital cost (dollars)
135
136 TCC total capital cost (dollars)
137
138 COcc capital charge operating cost (dollars per y)
139
140 CORp permeator replacement operating cost (dollars per y)
141
142 COen energy operating cost (dollars per y)
143
144 COsp spares operating cost (dollars per y)
145
146 COch chemical treatment operating cost (dollars per y)
147
148 COom operation and maintainance operating cost (dollars per y)
149
150 AOC annual operating cost (dollars per y)
151
152
153 ***INTERMEDIATE VARIABLES***
154
155 INTERM1 intermediate no.1
156
157 INTERM2 intermediate no.2 ;
158
159
160
161 **FREE VARIABLES**
162
163 PP average pressure drop in the fiber bore (atm)
164

165 PB average pressure drop on the shell side of the fiber bundle (atm)
166
167 JW water flux (kg per m²*h)
168
169 JS salt flux (kg per m²*h)
170
171 USI superficial velocity at the inner radius of the fiber bundle (m per s)
172
173 USO superficial velocity at the outer radius of the fiber bundle (m per s)
174
175 US average superficial velocity (m per s)
176
177 COST objective function value - cost of fresh water (dollar per m³) ;
178
179
180
181
182
183 ****BOUNDS AND STARTING VALUES****
184
185
186 PF.lo = 55 ;
187 PF.up = 67.9 ;
188
189 CB.lo = 45000 ;
190 CB.up = 70000 ;
191
192 VW.lo = 0.0001 ;
193 VW.up = 0.1 ;
194
195 QF.lo = 0.5 ;
196 QF.up = 0.917 ;
197

198 CF.fx = 41000 ;
199
200 QB.lo = 0.4 ;
201 QB.up = 0.917 ;
202
203 QP.lo = 0.2 ;
204 QP.up = 0.917 ;
205
206 CM.lo = 45100 ;
207 CM.up = 70000 ;
208
209 CP.lo = 100 ;
210 CP.up = 500 ;
211
212 KS.lo = 1.4E-5 ;
213
214 NM.fx = 469 ;
215
216 POUT.lo = 45 ;
217 POUT.up = 67.9 ;
218
219 QFEED.lo = 250 ;
220 QFEED.up = 450 ;
221
222 PRODC.fx = 125 ;
223
224 RE.lo = 0.1 ;
225
226 SC.lo = 500 ;
227
228 SH.lo = 10 ;
229
230 PHI.lo = 1.001 ;

231 PHI.up = 1.006 ;
232
233 PP.lo = 5 ;
234
235 PB.lo = 50 ;
236 PB.up = 67.9 ;
237
238 JW.lo = 1.3 ;
239
240 JS.lo = 6E-6 ;
241
242 USI.lo = 3E-3 ;
243
244 USO.lo = 1E-4 ;
245
246 INTERM1.lo = 1.1 ;
247
248 INTERM2.lo = 0.1E-4 ;
249
250
251
252
253 **EQUATIONS**
254
255 *****DECLARATION*****
256
257 ***MODEL***
258
259 water_flux water flux through the membrane
260
261 salt_flux salt flux through the membrane
262
263 perm_vel permeation velocity

264

265 perm_conc permeate concentration

266

267 perm_flr permeate flow rate

268

269 flow_bal flow balance

270

271 mass_bal mass balance

272

273 sfvel_in superficial velocity at the inner radius of the fiber bundle

274

275 sfvel_out superficial velocity at the outer radius of the fiber bundle

276

277 sfvel_logm log mean average of both above velocities

278

279 rey_num Reynolds number equation

280

281 sch_num Schmidt number equation

282

283 she_num Sherwood number equation

284

285 mass_co mass coefficient equation

286

287 phi_num concentration polarization factor equation

288

289 conc_pol concentration polarization effect equation

290

291 pres_fibr average pressure drop in the fiber bore equation

292

293 pres_shell average pressure drop on the shell side of the fiber bundle equation

294

295

296

297 *FUNCTION*

298

299 total_pr total desired permeate production

300

301 total_feed total seawater feed

302

303 pres_out equation of average pressure used to calculate costs

304

305 perm_sal_constr constrain of maximum allowed salt concentration in permeate

306

307 feed_flrt_constr feed flow rate per module constrain

308

309 pres_out_constr average pressure used to calculate costs constrain

310

311

312

313 *COSTS*

314

315 swip_ccost seawater intake and pretreatment capital cost equation

316

317 hpp_ccost high pressure pumps capital cost equation

318

319 ers_ccost energy recovery system capital cost equation

320

321 prm_ccost permeators capital cost equation

322

323 pec_ccost plant equipment capital cost equation

324

325 cw_ccost civil work capital cost equation

326

327 ic_ccost indirect capital cost equation

328

329 tcc_ccost total capital cost equation

330

331 cc_ocost capital charge operating cost equation

332

333 rp_ocost permeator replacement operating cost equation

334

335 en_ocost energy operating cost equation

336

337 sp_ocost spares operating cost equation

338

339 ch_ocost chemical treatment operating cost equation

340

341 om_ocost operation and maintainance operating cost equation

342

343 aoc_acost annual operating cost equation

344

345 obj_fun cost of fresh water per m^3 equation

346

347

348 ***INTERMEDIATE***

349

350 interm1_eq intermediate equation no.1

351

352 interm2_eq intermediate equation no.2 ;

353

354

355 *****ASIGNMENT*****

356

357

358 ***FUNCTION***

359

360 total_pr.. PRODC =e= QP*NM ;

361

362 total_feed.. QFEED =e= NM*QF ;

363

364 pres_out.. POUT =e= (2*PB)-PF ;

365

366 perm_sal_constr.. PRODC*CPmax =g= NM*QP*CP ;

367

368 feed_flrt_constr.. QF =l= QFmax ;

369

370 pres_out_constr.. POUT =l= PF ;

371

372

373

374 ***MODEL***

375

376

377 water_flux.. JW =e= 3600*pwpconst*(PB-PP-((ions*rgas*temp*sw*rbrine*(CM-CP))/(1E6*mws*101325)));

378

379 salt_flux.. JS =e= (3600*spconst*(CM-CP)*rbrine)/1E6 ;

380

381 perm_vel.. VW =e= (JW+JS)/rpermeate ;

382

383 perm_conc.. CP =e= (JS*1E6)/(VW*rpermeate) ;

384

385 perm_flr.. QP =e= VW*membarea ;

386

387 flow_bal.. QF =e= QB + QP ;

388

389 mass_bal.. QF*CF =e= (QB*CB)+(QP*CP) ;

390

391 sfvel_in.. USI =e= QF/(3600*2*3.1416*ribundle*length) ;

392

393 sfvel_out.. USO =e= (QF-(VW*membarea))/(3600*2*3.1416*robundle*length) ;

394

395 interm1_eq.. INTERM1 =e= log(USI)-log(USO) ;

396

397 sfvel_logm.. US =e= (USI-USO)/INTERM1 ;

398

399 rey_num.. RE =e= (2*rofiber*US*rbrine)/viscbrine ;

400

401 sch_num.. SC =e= viscbrine/(rbrine*diff) ;

402

403 she_num.. SH =e= 2.725*(RE**0.333)*(SC**0.333) ;

404

405 mass_co.. KS =e= (SH*diff)/(2*rofiber) ;

406

407 interm2_eq.. INTERM2 =e= VW/(3600*KS) ;

408

409 phi_num.. (CM-CP)/(CB-CP) =e= PHI ;

410

411 conc_pol.. PHI =e= exp(INTERM2) ;

412

413 pres_fibr.. PP =e= 1+((16*viscperm*rofiber*VW*(length**2))/(7200*(rifiber**4)*101325)) ;

414

415 pres_shell.. PB =e= PF - (((150*((1-voidfr)**2)*viscbrine*US*(robundle-ribundle))/(2*(voidfr**3)*(dp**2)*101325)) - ((1.75*(1-voidfr)*rbrine*(US**2)*(robundle-ribundle))/(2*(voidfr**3)*dp*101325))) ;

416

417

418

419

420 ***COSTS***

421

422 swip_ccost.. CCswip =e= 996*((24*QFEED)**0.8) ;

423

424 hpp_ccost.. CChpp =e= 81*((1.01325*PF*QFEED)**0.96) ;

425

426 ers_ccost.. CCers =e= 81*(((POUT*1.01325)**0.96)*((QFEED-PRODC)**0.96)) ;

427

428 prm_ccost.. CCprm =e= NM*ccmod ;

429

430 pec_ccost.. CCpec =e= CCswip+CChpp+CCers+CCprm ;

431

432 cw_ccost.. CCcw =e= 0.1*CCpec ;

433

434 ic_ccost.. CCic =e= 0.1*CCpec ;

435

436 tcc_ccost.. TCC =e= CCpec+CCcw+CCic ;

437

438 cc_ocost.. COcc =e= 0.08*TCC ;

439

440 rp_ocost.. CORp =e= 0.2*NM*ccmod ;

441

442 en_ocost.. COen =e= 0.03*fc*((presswip*QFEED*24)/effswip)+((PF*1.01325*QFEED*24)/effhpp)-
(effers*POUT*1.01325*24*(QFEED-PRODC));

443

444 sp_ocost.. COsp =e= PRODC*24*365*fc*0.033 ;

445

446 ch_ocost.. COch =e= QFEED*24*365*fc*0.018 ;

447

448 om_ocost.. COom =e= PRODC*24*365*fc*0.126 ;

449

450 aoc_acost.. AOC =e= COcc+CORp+COen+COsp+COch+COom ;

451

452 obj_fun.. COST =e= ((TCC*CRF)+AOC)/(PRODC*24*365) ;

453

454

455

456

457

458

459 MODEL ROPLANT_NLP /ALL/ ;

460

461 OPTION NLP = CONOPT ;

462

463 SOLVE ROPLANT_NLP USING NLP MINIMIZING COST ;

COMPILATION TIME = 0.015 SECONDS 2 Mb WIN225-148 May 29, 2007

General Algebraic Modeling System

Model Statistics SOLVE ROPLANT_NLP Using NLP From line 463**MODEL STATISTICS**

| | | | |
|----------------------------|------------|-------------------------|-----------|
| BLOCKS OF EQUATIONS | 42 | SINGLE EQUATIONS | 42 |
| BLOCKS OF VARIABLES | 43 | SINGLE VARIABLES | 43 |
| NON ZERO ELEMENTS | 125 | NON LINEAR N-Z | 42 |
| DERIVATIVE POOL | 12 | CONSTANT POOL | 38 |
| CODE LENGTH | 331 | | |

GENERATION TIME = 0.000 SECONDS 3 Mb WIN225-148 May 29, 2007

EXECUTION TIME = 0.000 SECONDS 3 Mb WIN225-148 May 29, 2007

General Algebraic Modeling System

Solution Report SOLVE ROPLANT_NLP Using NLP From line 463

SOLVE SUMMARY

MODEL ROPLANT_NLP OBJECTIVE COST
TYPE NLP DIRECTION MINIMIZE
SOLVER CONOPT FROM LINE 463

**** SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION

**** MODEL STATUS 2 LOCALLY OPTIMAL

**** OBJECTIVE VALUE 1.2608

RESOURCE USAGE, LIMIT 0.039 1000.000

ITERATION COUNT, LIMIT 59 10000

EVALUATION ERRORS 0 0

CONOPT3 x86/MS Windows version 3.14R-017-061

Copyright (C) ARKI Consulting and Development A/S

Bagsvaerdvej 246 A

DK-2880 Bagsvaerd, Denmark

Using default options.

** Warning ** The variance of the derivatives in the initial
point is large (= 4.6). A better initial
point, a better scaling, or better bounds on the
variables will probably help the optimization.

**** Optimal solution. There are no superbasic variables.**

CONOPT time Total 0.037 seconds
of which: Function evaluations 0.001 = 2.7%
 1st Derivative evaluations 0.000 = 0.0%

Workspace = 0.26 Mbytes
Estimate = 0.26 Mbytes
Max used = 0.06 Mbytes

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

```

---- EQU water_flux . . . -0.045
---- EQU salt_flux . . . 1790.290
---- EQU perm_vel . . . -45.402
---- EQU perm_conc . . . 0.003
---- EQU perm_flr . . . 5.439
---- EQU flow_bal . . . 3.228
---- EQU mass_bal . . . -5.480E-5
---- EQU sfvel_in . . . -0.239
---- EQU sfvel_out . . . -0.804
---- EQU sfvel_logm . . . -0.801
---- EQU rey_num . . . -0.008
---- EQU sch_num 653.846 653.846 653.846 -2.348E-6
---- EQU she_num . . . -3.392E-4
---- EQU mass_co . . . -22.610
---- EQU phi_num . . . 1.925
---- EQU conc_pol . . . 1.925
---- EQU pres_fibr 1.000 1.000 1.000 0.007
---- EQU pres_shell . . . -0.002
---- EQU total_pr . . . 0.005
---- EQU total_feed . . . 0.002
---- EQU pres_out . . . 0.003
---- EQU perm_sal_~ . . . +INF .
---- EQU feed_flrt~ -INF 0.869 0.917 .

```

```

---- EQU pres_out_~ -INF -0.045 . . .
---- EQU swip_ccost . . . . 1.9033E-7
---- EQU hpp_ccost . . . . 1.9033E-7
---- EQU ers_ccost . . . . 1.9033E-7
---- EQU prm_ccost . . . . 1.9033E-7
---- EQU pec_ccost . . . . 1.9033E-7
---- EQU cw_ccost . . . . 1.5861E-7
---- EQU ic_ccost . . . . 1.5861E-7
---- EQU tcc_ccost . . . . 1.5861E-7
---- EQU cc_ocost . . . . 9.1324E-7
---- EQU rp_ocost . . . . 9.1324E-7
---- EQU en_ocost . . . . 9.1324E-7
---- EQU sp_ocost . . . . 9.1324E-7
---- EQU ch_ocost . . . . 9.1324E-7
---- EQU om_ocost . . . . 9.1324E-7
---- EQU aoc_acost . . . . 9.1324E-7
---- EQU obj_fun . . . . 1.000
---- EQU interm1_eq . . . . 8.3171E-4
---- EQU interm2_eq . . . . 1.930

```

water_flux water flux through the membrane

salt_flux salt flux through the membrane

perm_vel permeation velocity

perm_conc permeate concentration

perm_flr pemeate flow rate

flow_bal flow balance

mass_bal mass balance

sfvel_in superficial velocity at the inner radius of the fiber bundle

sfvel_out superficial velocity at the outer radius of the fiber bundle

sfvel_logm log mean average of both above velocities

rey_num Reynolds number equation

sch_num Schmidt number equation

she_num Sherwood number equation

mass_co mass coefficient equation

phi_num concentration polarization factor equation

conc_pol concentration polarization effect equation

pres_fibr average pressure drop in the fiber bore equation

pres_shell average pressure drop on the shell side of the fiber bundle equation

total_pr total desired permeate production

total_feed total seawater feed

pres_out equation of average pressure used to calculate costs

perm_sal_constr constrain of maximum allowed salt concentration in permeate

feed_flrt_constr feed flow rate per module constrain

pres_out_constr average pressure used to calculate costs constrain

swip_ccost seawater intake and pretreatment capital cost equation

hpp_ccost high pressure pumps capital cost equation

ers_ccost energy recovery system capital cost equation

prm_ccost permeators capital cost equation

pec_ccost plant equipment capital cost equation

cw_ccost civil work capital cost equation

ic_ccost indirect capital cost equation

tcc_ccost total capital cost equation

cc_ocost capital charge operating cost equation

rp_ocost permeator replacement operating cost equation

en_ocost energy operating cost equation

sp_ocost spares operating cost equation

ch_ocost chemical treatment operating cost equation

om_ocost operation and maintainance operating cost equation

aoc_acost annual operating cost equation

obj_fun cost of fresh water per m^3 equation

interm1_eq intermediate equation no.1

interm2_eq intermediate equation no.2

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| --- VAR PF | 55.000 | 67.859 | 67.900 | . |
| --- VAR CB | 45000.000 | 58902.343 | 70000.000 | . |
| --- VAR VW | 1.0000E-4 | 0.002 | 0.100 | . |
| --- VAR QF | 0.500 | 0.869 | 0.917 | . |
| --- VAR CF | 41000.000 | 41000.000 | 41000.000 | 4.7648E-5 |
| --- VAR QB | 0.400 | 0.603 | 0.917 | . |
| --- VAR QP | 0.200 | 0.267 | 0.917 | . |
| --- VAR CM | 45100.000 | 59042.027 | 70000.000 | . |
| --- VAR CP | 100.000 | 500.000 | 500.000 | -0.003 |
| --- VAR KS | 1.4000E-5 | 2.0389E-4 | +INF | . |
| --- VAR NM | 469.000 | 469.000 | 469.000 | 0.004 |
| --- VAR POUT | 45.000 | 67.814 | 67.900 | . |
| --- VAR QFEED | 250.000 | 407.784 | 450.000 | . |
| --- VAR PRODC | 125.000 | 125.000 | 125.000 | -0.014 |
| --- VAR RE | 0.100 | 0.191 | +INF | . |
| --- VAR SC | 500.000 | 653.846 | +INF | . |
| --- VAR SH | 10.000 | 13.593 | +INF | . |
| --- VAR PHI | 1.001 | 1.002 | 1.006 | . |
| --- VAR CCswip | . | 1.5516E+6 | +INF | . |
| --- VAR CChpp | . | 1.5077E+6 | +INF | . |
| --- VAR CCers | . | 1.0603E+6 | +INF | . |
| --- VAR CCprm | . | 7.1288E+5 | +INF | . |
| --- VAR CCpec | . | 4.8325E+6 | +INF | . |
| --- VAR CCcw | . | 4.8325E+5 | +INF | . |
| --- VAR CCic | . | 4.8325E+5 | +INF | . |
| --- VAR TCC | . | 5.7990E+6 | +INF | . |
| --- VAR COcc | . | 4.6392E+5 | +INF | . |
| --- VAR COrp | . | 1.4258E+5 | +INF | . |
| --- VAR COen | . | 16240.047 | +INF | . |
| --- VAR COsp | . | 32521.500 | +INF | . |
| --- VAR COch | . | 57869.474 | +INF | . |

| | | | | | | |
|-----|-------------|-----------|--------------|--------|------|---|
| --- | VAR COom | . | 1.2417E+5 | | +INF | . |
| --- | VAR AOC | . | 8.3730E+5 | | +INF | . |
| --- | VAR INTERM1 | 1.100 | 1.801 | | +INF | . |
| --- | VAR INTERM2 | 1.0000E-5 | 0.002 | | +INF | . |
| --- | VAR PP | 5.000 | 6.005 | | +INF | . |
| --- | VAR PB | 50.000 | 67.837 | 67.900 | | . |
| --- | VAR JW | 1.300 | 1.753 | | +INF | . |
| --- | VAR JS | 6.0000E-6 | 8.7673E-4 | | +INF | . |
| --- | VAR USI | 0.003 | 0.004 | | +INF | . |
| --- | VAR USO | 1.0000E-4 | 6.6632E-4 | | +INF | . |
| --- | VAR US | -INF | 0.002 | | +INF | . |
| --- | VAR COST | -INF | 1.261 | | +INF | . |

PF feed pressure (atm)

CB concentration in the high pressure side (ppm)

VW velocity of permeation flow (m per h)

QF feed flow rate per module (m³ per h)

CF salt concentration of feed stream (ppm)

QB brine flow rate per module (m³ per h)

QP permeate flow rate per module (m³ per h)

CM concentration at the membrane wall (ppm)

CP concentration of the permeate (ppm)

KS mass transfer coefficient (m per s)

NM number of modules

POUT average pressure used to calculate costs (atm)

QFEED total seawater feed flow rate (m³ per h)

PRODC total production required (m³ per h)

RE Reynolds number

SC Schmidt number

SH Sherwood number

PHI concentration polarization factor

CCswip seawater intake and pretreatment capital cost (dollars)

CChpp high pressure pumps capital cost (dollars)

CCers energy recovery system capital cost (dollars)

CCprm permeators capital cost (dollars)

CCpec plant equipment capital cost (dollars)

CCcw civil work capital cost (dollars)

CCic indirect capital cost (dollars)

TCC total capital cost (dollars)

COcc capital charge operating cost (dollars per y)

COrp permeator replacement operating cost (dollars per y)

COen energy operating cost (dollars per y)

COsp spares operating cost (dollars per y)

COch chemical treatment operating cost (dollars per y)

COom operation and maintainance operating cost (dollars per y)

AOC annual operating cost (dollars per y)

INTERM1 intermediate no.1

INTERM2 intermediate no.2

PP average pressure drop in the fiber bore (atm)

PB average pressure drop on the shell side of the fiber bundle (atm)

JW water flux (kg per m²*h)

JS salt flux (kg per m²*h)

USI superficial velocity at the inner radius of the fiber bundle (m per s)

USO superficial velocity at the outer radius of the fiber bundle (m per s)

US average superficial velocity (m per s)

COST objective function value - cost of fresh water (dollar per m³)

****** REPORT SUMMARY: 0 NONOPT**

0 INFEASIBLE

0 UNBOUNDED

0 ERRORS

EXECUTION TIME = 0.000 SECONDS 2 Mb WIN225-148 May 29, 2007

**** FILE SUMMARY

Input C:\Users\Arvanitis\Desktop\GAMS CODE\ROPLANT_NLP.gms

Output C:\Users\Arvanitis\Documents\gamsdir\projdir\ROPLANT_NLP.lst