



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Μοντελοποίηση διεργασίας επεξεργασίας νερού με αντίστροφη ώσμωση με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Διπλωματική εργασία

Σωτήρης Αλεξανδράκης

Επιβλέπων: Γεώργιος Αραμπατζής, Αναπληρωτής Καθηγητής

Εξεταστική επιτροπή: Ιψάκης Δημήτριος, Ιωαννίδης Ευστράτιος,
Γεώργιος Αραμπατζής

Χανιά, Οκτώβριος 2024

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι το αποτέλεσμα του πολυετούς μόχθου και προσπάθειας που κατέβαλα κατά την διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων. Συμβάλει τόσο στην ολοκλήρωση των σπουδών μου όσο και σαν εφόδιο στην μετέπειτα καριέρα μου στον χώρο των μηχανικών.

Θα ήθελα από καρδιάς να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου τόσο κατά την διάρκεια συγγραφής αυτής της διπλωματικής όσο και της μέχρι τώρα πορείας μου.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γεώργιο Αραμπατζή για την εμπιστοσύνη του απέναντι μου καθώς και τα μέλη της τριμελούς επιτροπής. Τέλος, ένα τεράστιο ευχαριστώ στην Θάλεια Κάρκου για την ακατάπαυστη και συνεχή στήριξη της τόσο κατά την διάρκεια του σχεδιασμού όσο και της συγγραφής της διπλωματικής.

Περίληψη

Η αφθονία του θαλασσινού νερού καθιστά την αφαλάτωση ως ιδανική διεργασία για την παραγωγή πόσιμου νερού, ιδιαίτερα σε περιοχές που πλήττονται από λειψυδρία. Η αντίστροφη ώσμωση είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη διεργασία αφαλάτωσης. Ωστόσο, οι υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις της απαιτούν την διερεύνηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, προκειμένου να τροφοδοτήσουν το σύστημα.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μαθηματική μοντελοποίηση ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης με στόχο την αφαλάτωση θαλασσινού νερού και η διερεύνηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), δηλαδή τα αιολικά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά, για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων του συστήματος.

Έχοντας συνειδητοποίηση την αναγκαιότητα για μελέτης της αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με την αντίστροφη ώσμωση, καθώς και της χρήσης ΑΠΕ, στο 2^ο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας αναλύονται και συγκρίνονται οι σημαντικότερες μέθοδοι αφαλάτωσης, οι οποίες κατηγοριοποιούνται στις θερμικές και τις τεχνολογίες μεμβρανών. Η αρχή λειτουργίας, οι εφαρμογές και τα βασικά χαρακτηριστικά της κάθε κατηγορίας αναλύονται επίσης. Στη συνέχεια, στα πλαίσια του 3^{ου} κεφαλαίου, μελετάται η αρχή λειτουργίας και οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης. Ακολουθεί η ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου, περιλαμβάνοντας τις μαθηματικές εξισώσεις και τις σχεδιαστικές παραμέτρους που απαιτούνται, στο κεφάλαιο 4. Η μαθηματική αποτύπωση του προβλήματος και εξισώσεις για τον υπολογισμό των σημαντικότερων παραμέτρων, όπως, μεταξύ άλλων, ο ρυθμός ροής του νερού και του άλατος, η απόρριψη αλατότητας και η συγκέντρωση άλατος στο διήθημα. Καθορίζονται όλες οι παραδοχές του μοντέλου και γίνεται αναφορά στις ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος.

Στο 5^ο κεφάλαιο μελετάται η αξιοποίηση ΑΠΕ με στόχο την ενεργειακή τροφοδοσία ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στα αιολικά και φωτοβολταϊκά συστήματα. Στο 6^ο κεφάλαιο επεξηγείται η υπολογιστική υλοποίηση του μαθηματικού μοντέλου στο πρόγραμμα Process Simulation and Modelling (PSM). Τα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου είναι η ποσότητα και οι ποιοτικές παράμετροι του θαλασσινού νερού, τεχνικά χαρακτηριστικά της μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης καθώς και παράμετροι λειτουργίας, όπως η πίεση και η θερμοκρασία.

Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν διάφορες παραμέτρους, όπως η ποιοτική σύσταση του διηθήματος και του συμπυκνώματος, η απαιτούμενη ενέργεια και ο ρυθμός ροής όλων των ρευμάτων. Όλα τα αποτελέσματα αναφέρονται και συζητούνται στο 7^ο κεφάλαιο. Τα κυριότερα συμπεράσματα συνοψίζονται στο 8^ο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Abstract

The abundance of seawater makes desalination an ideal solution for the production of drinking water, especially in water-stressed areas. Reverse osmosis is the most widely used process for desalination. However, the high energy requirements necessitate the exploration of renewable energy sources to feed the system.

The aim of this thesis is the development of a mathematical model of a reverse osmosis system, which is used for seawater desalination and the investigation of renewable energy sources (RES), such as wind systems and photovoltaics, to meet the system's energy demands.

Having considered the necessity of investigating seawater desalination with reverse osmosis and the use of RES, chapter 2 of this thesis analyses and compares the most important desalination methods, categorizing them into thermal and membrane technologies. The key principle and characteristics of each category are discussed. Therefore, in chapter 3, the operating principle and parameters affecting the performance of a reverse osmosis system are included. The development of the mathematical model follows in chapter 4, including the mathematical equations and all key design parameters. The mathematical formulation of the problem and equations for the calculation of the most important parameters, such as, among others, water flux and solute flux, removal efficiency of salinity and concentration of salinity in permeate. All model assumptions are determined and energy requirements of the system are mentioned.

In Chapter 5, the utilization of RES is studied with the aim of feeding a reverse osmosis system. Specifically, the wind and photovoltaic systems are mentioned. Chapter 6 explains the computational implementation of the mathematical model in the Process Simulation and Modelling (PSM) Tool. The required input data includes the quantity and quality parameters of the seawater, technical characteristics of the reverse osmosis membrane and operational parameters, such as pressure and temperature.

The results encompass several parameters, such as the qualitative parameters of permeate and concentrate, required energy and the flow rate of all streams. In Chapter 6 all results are reported and discussed. The main conclusions are summarized in Chapter 8 of this thesis.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	2
Περίληψη	3
Abstract	4
Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή	12
1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	13
Κεφάλαιο 2 – Αφαλάτωση.....	15
2.1 Η αφαλάτωση ως τρόπος λύσης της λειψυδρίας.....	15
2.2 Τεχνολογίες αφαλάτωσης	15
2.2.1 Θερμικές διεργασίες	16
2.2.2 Τεχνολογίες μεμβρανών.....	19
2.3 Σύγκριση των τεχνολογιών αφαλάτωσης θαλασσινού νερού	21
2.4 Εφαρμογές της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση	22
Κεφάλαιο 3 – Αντίστροφη ώσμωση ως μέθοδος αφαλάτωσης θαλασσινού νερού	25
3.1 Αρχή λειτουργίας.....	25
3.2 Παράμετροι της διεργασίας	27
3.2.1 Ωσμωτική πίεση	27
3.2.2 Ροή τροφοδοσίας και διηθήματος	28
3.2.3 Πόλωση συγκέντρωσης.....	29
3.2.4 Ανάκτηση νερού	29
3.2.5 Απόρριψη διαλυμένης ουσίας	31
3.2.6 Ποιότητα τροφοδοσίας	31
Κεφάλαιο 4 – Μοντελοποίηση της αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με αντίστροφη ώσμωση	35
4.1 Παραδοχές μοντέλου	35
4.2 Μαθηματικές εξισώσεις του μοντέλου	37
4.3 Ενεργειακές απαιτήσεις	40
Κεφάλαιο 5 – Αφαλάτωση θαλασσινού νερού με αντίστροφη ώσμωση και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	43
5.1 Εισαγωγικά στοιχεία.....	43
5.2 Χρήση αιολικής ενέργειας	43

5.2.1	Περιγραφή ανεμογεννήτριας	44
5.2.2	Σύστημα ανεμογεννήτριας - αντίστροφης ώσμωσης (Wind – RO)	44
5.3	Χρήση ηλιακής ενέργειας	46
5.3.1	Περιγραφή φωτοβολταϊκού	46
5.3.2	Σύστημα φωτοβολταϊκού - αντίστροφης ώσμωσης (PV – RO).....	47
Κεφάλαιο 6 – Ανάλυση και προσομοίωση του μαθηματικού μοντέλου.....		52
6.1	Περιβάλλον προσομοίωσης – Process Simulation and Modelling (PSM) Tool	52
6.2	Ανάλυση βημάτων προσομοίωσης.....	52
Κεφάλαιο 7 – Αποτελέσματα		58
7.1.	Προσομοίωση της διεργασίας.....	58
7.1.1.	Ποιότητα νερού στο διήθημα και στο συμπύκνωμα	58
7.1.2.	Ενεργειακές απαιτήσεις	59
7.1.3.	Ρυθμός ροής διηθήματος και συμπυκνώματος	59
7.2	Επίδραση των παραμέτρων στην απόδοση της διεργασίας	59
7.2.1.	Επίδραση της αλατότητας του διαλύματος τροφοδοσίας.....	59
7.2.2.	Επίδραση του ρυθμού ροής του διαλύματος τροφοδοσίας.....	62
7.2.3.	Επίδραση της θερμοκρασίας.....	69
7.2.4.	Επίδραση της πίεσης.....	73
7.3.	Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	76
7.3.1.	Χρήση ανεμογεννήτριας.....	76
7.3.2.	Χρήση φωτοβολταϊκού.....	77
Κεφάλαιο 8° – Συμπεράσματα		80
Βιβλιογραφία.....		82

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1. Σχηματική αναπαράσταση των σταδίων της πολυβάθμιας εκτόνωσης (Belessiotis et al., 2016).....	17
Εικόνα 2. Σχηματική αναπαράσταση των σταδίων της απόσταξης πολλαπλής επίδρασης (Tan et al., 2022)	18
Εικόνα 3. Σχηματική αναπαράσταση 2 σταδίων της εξάτμισης με θερμική επανασυμπύεση ατμών (Belessiotis et al., 2016).	19
Εικόνα 4. Σχηματική αναπαράσταση της απόσταξης με μεμβράνες (Alhathal Alanezi et al., 2016)	20
Εικόνα 5. Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας της ηλεκτροδιάλυσης (Aghaeinejad-Meybodi & Ghasemzadeh, 2017).....	20
Εικόνα 6. Εικονική αναπαράσταση της ώσμωσης (αριστερά) και της αντίστροφης ώσμωσης (δεξιά)	25
Εικόνα 7. Πόλωση συγκέντρωσης κατά την προσπάθεια διέλευσης του διαλύματος μέσω της μεμβράνης.....	29
Εικόνα 8. Σύστημα RO με βάνα ελέγχου ροής.	30
Εικόνα 9. Σχηματική αναπαράσταση μιας μονάδας αντίστροφης ώσμωσης.....	36
Εικόνα 10. Σχηματική απεικόνιση μονάδας αντίστροφης ώσμωσης ενεργειακά τροφοδοτούμενη από ανεμογεννήτρια.	45
Εικόνα 11. Διάταξη αντίστροφης ώσμωσης με πηγή ενέργειας τη χρήση φωτοβολταϊκού	47
Εικόνα 12. Σύστημα αντίστροφης ώσμωσης, ενεργειακά τροφοδοτούμενο από ανεμογεννήτρια με παράλληλη χρήση μπαταρίας, μετατροπέα και ελεγκτή φόρτισης.....	48
Εικόνα 13. Σύστημα αντίστροφης ώσμωσης, ενεργειακά τροφοδοτούμενο από Φ/Β, με παράλληλη χρήση μπαταριών, μετατροπέα και ελεγκτή φόρτισης.....	48
Εικόνα 14. Διάγραμμα ροής του συστήματος αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με αντίστροφη ώσμωση στο περιβάλλον προσομοίωσης PSM Tool	52
Εικόνα 15. Σύσταση θαλασσινού νερού και ρυθμός ροής ως διάλυμα τροφοδοσίας.....	53
Εικόνα 16. Εισαγωγή τιμών των παραμέτρων διεργασίας ως γνωστές (πάνω) και άγνωστες (κάτω).....	54
Εικόνα 17. Διάγραμμα ροής των βημάτων της προσομοίωσης του μοντέλου στο PSM	56
Εικόνα 18. Απεικόνιση της ανεμογεννήτριας AEOLOS	76

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1. Ταξινόμηση και διαχωρισμός των βασικών χαρακτηριστικών των θερμικών μεθόδων με τις τεχνολογίες αφαλάτωσης.....	15
Πίνακας 2. Τεχνικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών αφαλάτωσης	21
Πίνακας 3. Παράμετροι διεργασίας για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού	26
Πίνακας 4. Παράμετροι ποιότητας θαλασσινού νερού	33
Πίνακας 5. Τεχνικά χαρακτηριστικά και διαστάσεις μεμβράνης TM820M-400 από την Toray (https://pureaqua.com/content/pdf/toray-tm820m-400-membrane.pdf)	39
Πίνακας 6. Τιμές βασικών παραμέτρων για την συνδεσμολογία ανεμογεννητριών με μονάδες αντίστροφης ώσμωσης	50
Πίνακας 7. Τιμές βασικών παραμέτρων για την συνδεσμολογία Φ/Β με μονάδες αντίστροφης ώσμωσης.....	50
Πίνακας 8. Αποτελέσματα προσομοίωσης σχετικά με την ποιότητα νερού τροφοδοσίας, διηθήματος και συμπυκνώματος.....	58
Πίνακας 9. Δεδομένα της αλατότητας τροφοδοσίας, ανάκτησης νερού και απόρριψης αλατότητας.....	61
Πίνακας 10. Συγκέντρωση της αλατότητας στο διάλυμα τροφοδοσίας, συμπυκνώματος και διηθήματος	61
Πίνακας 11. Σενάρια ρυθμού ροής τροφοδοσίας με τις τιμές ανάκτησης νερού και απόρριψης αλατότητας.....	63
Πίνακας 12. Σενάρια ρυθμού ροής τροφοδοσίας με τιμές αλατότητας διηθήματος και συμπυκνώματος.....	65
Πίνακας 13. Συγκέντρωση διαλυμένων συστατικών στο διήθημα για διαφορετικό ρυθμό ροής τροφοδοσίας	67
Πίνακας 14. Συγκέντρωση ιόντων στο συμπύκνωμα για κάθε ρυθμό ροής τροφοδοσίας που μελετήθηκε	68
Πίνακας 15. Ειδική ενεργειακή κατανάλωση για κάθε ρυθμό ροής τροφοδοσίας που μελετήθηκε	69
Πίνακας 16. Ανάκτηση νερού και απόρριψη αλατότητας για κάθε σενάριο θερμοκρασίας ...	70
Πίνακας 17. Συγκέντρωση διαλυμένων συστατικών στο διήθημα για κάθε θερμοκρασία	71
Πίνακας 18. Συγκέντρωση ιόντων στο συμπύκνωμα για κάθε θερμοκρασία τροφοδοσίας που μελετήθηκε	72
Πίνακας 19. Ανάκτηση νερού και απόρριψη αλατότητας για κάθε τιμή πίεσης τροφοδοσίας	73

Πίνακας 20. Αλατότητα διηθήματος και συμπυκνώματος για κάθε τιμή πίεσης τροφοδοσίας	74
Πίνακας 21. Ενεργειακή κατανάλωση για κάθε τιμή πίεσης τροφοδοσίας που μελετήθηκε ..	76
Πίνακας 22. Τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας AEOLOS 3kW.....	77
Πίνακας 23. Καιρικά και τεχνικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν.	77
Πίνακας 25. Κύρια συμπεράσματα για την επίδραση παραμέτρων της διεργασίας στην απόδοση του συστήματος	80

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Επίδραση της αλατότητας του διαλύματος τροφοδοσίας στην απόρριψη αλατότητας και στην ανάκτηση νερού	60
Διάγραμμα 2. Επίδραση της αλατότητας εισόδου στις συγκεντρώσεις αλατότητας διηθήματος και συμπυκνώματος	62
Διάγραμμα 3. Επίδραση του ρυθμού ροής τροφοδοσίας στην ανάκτηση νερού και την απόρριψη αλατότητας	63
Διάγραμμα 4. Επίδραση του ρυθμού ροής τροφοδοσίας στην αλατότητα διηθήματος και συμπυκνώματος	65
Διάγραμμα 5. Επίδραση του ρυθμού ροής τροφοδοσίας στην συγκέντρωση του διηθήματος	66
Διάγραμμα 6. Επίδραση του ρυθμού ροής τροφοδοσίας στην συγκέντρωση του συμπυκνώματος	67
Διάγραμμα 7. Επίδραση του ρυθμού ροής τροφοδοσίας στην ειδική ενεργειακή κατανάλωση	69
Διάγραμμα 8. Επίδραση της θερμοκρασίας στην ανάκτηση νερού και την απόρριψη αλατότητας	70
Διάγραμμα 9. Επίδραση της θερμοκρασίας στην συγκέντρωση του διηθήματος	71
Διάγραμμα 10. Επίδραση της θερμοκρασίας στις συγκεντρώσεις των ιόντων του συμπυκνώματος	72
Διάγραμμα 11. Επίδραση της πίεσης στην ανάκτηση νερού και την απόρριψη αλατότητας ..	73
Διάγραμμα 12. Επίδραση της θερμοκρασίας στις συγκεντρώσεις αλατότητας διηθήματος και συμπυκνώματος	74
Διάγραμμα 13. Επίδραση της πίεσης τροφοδοσίας στην ενεργειακή κατανάλωση	75

1.

Εισαγωγή

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, τα αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής, εξαιτίας της καταχρηστικής ανθρώπινης συμπεριφοράς απέναντι στους πόρους του πλανήτη, γίνονται όλο και πιο εμφανή. Το κλίμα γίνεται θερμότερο και η συχνότητα των βροχοπτώσεων μεταβάλλεται, ενώ ταυτόχρονα γίνεται πιο έντονο το φαινόμενο της εξάτμισης των υδάτων και το λιώσιμο των παγετώνων, οδηγώντας στην αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Αυτή η κατάσταση επηρεάζει τη διαθεσιμότητα γλυκού νερού (Singh et al., 2014). Η ανεπάρκεια καθαρού νερού έχει σοβαρές επιπτώσεις στη βιωσιμότητα του περιβάλλοντος και στην ανθρώπινη υγεία. Η αύξηση του πληθυσμού σε συνδυασμό με την αύξηση των καταναλωτικών απαιτήσεων εντείνει το φαινόμενο μείωσης των αποθεμάτων νερού, διότι η βιομηχανική δραστηριότητα αυξάνεται ραγδαία για να καλύψει αυτές τις ανάγκες. Μόνο το 2.50% των αποθεμάτων νερού παγκοσμίως είναι γλυκό νερό, ενώ το μεγαλύτερο μέρος συναντάται σε δυσπρόσιτες περιοχές. Συμπερασματικά, μόνο το 0.01% του συνολικού νερού στον κόσμο μπορεί να αξιοποιηθεί, μεταξύ άλλων και για βιομηχανικές δραστηριότητες (Ihsanullah et al., 2021; Shehata et al., 2023).

Για τον λόγο αυτό, έρχεται στο προσκήνιο η ανάγκη μελέτης και ανάπτυξης τεχνολογιών επεξεργασίας κυρίως αλμυρού, αλλά και υφάλμυρου νερού, με στόχο την παραγωγή πόσιμου νερού προς κατανάλωση μέσω της αφαλάτωσης (Shalaby et al., 2022; Filippini et al., 2019). Τις τελευταίες δεκαετίες η αφαλάτωση χρησιμοποιείται ευρέως προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες για γλυκό νερό. Ο διαχωρισμός των διαλυμένων αλάτων από το θαλασσινό νερό επιτυγχάνεται με την αφαλάτωση (Kavitha et al., 2019). Η αφαλάτωση αποτελεί μία τεχνολογία που μπορεί να συμβάλλει στη διατήρηση των αποθεμάτων νερού. Οι πιο συνηθισμένες τεχνολογίες αφαλάτωσης είναι η πολυβάθμια εκτόνωση, η απόσταξη πολλαπλής επίδρασης και η αντίστροφη ώσμωση, αποτελώντας το 94% της συνολικής παραγωγής αφαλατωμένου νερού (Ihsanullah et al., 2021). Η αφαλάτωση με μεμβράνες και συγκεκριμένα με την αντίστροφη ώσμωση έχει πολλά πλεονεκτήματα, διότι μπορεί να επεξεργαστεί μεγάλες ποσότητες νερού με χαμηλό συνολικό κόστος, έχοντας, ωστόσο, υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις και αντιμετωπίζοντας προβλήματα απόθεσης και καθαρισμού των μεμβρανών. Παρ' όλα αυτά, η αντίστροφη ώσμωση αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο αφαλάτωσης σε παγκόσμιο επίπεδο (Shehata et al., 2023).

Ωστόσο, οι ενεργειακές απαιτήσεις αυτής της μεθόδου εκτιμώνται στο εύρος 3-10 kW για την παραγωγή 1 m³ γλυκού νερού. Το υψηλό κόστος και το πρόβλημα της περιβαλλοντικής μόλυνσης λόγω των ορυκτών καυσίμων καθιστούν μονόδρομο την αντικατάσταση των συμβατικών πηγών ενέργειας. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αφαλάτωσης μπορούν να μετριαστούν σε σημαντικό βαθμό ενσωματώνοντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως οι ανεμογεννήτριες (Shalaby et al., 2022; Filippini et al., 2019). Επιπλέον, το συνολικό κόστος της ενέργειας που καταναλώνεται από την αντίστροφη ώσμωση μπορεί να μειωθεί και έτσι η διεργασία να είναι οικονομικά πιο βιώσιμη (Okampro and Nwulu, 2021). Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνουν την ηλιακή, γεωθερμική, αιολική, καθώς και αξιοποιώντας τη βιομάζα και τον ωκεανό (Ihsanullah et al., 2021). Είτε απευθείας στο σύστημα αφαλάτωσης

είτε μετά από μετατροπή της ενέργειας άλλη μορφή, όπως η ηλεκτρική, πριν το σύστημα αφαλάτωσης στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών είναι εφικτοί τρόποι για την αντίστροφη ώσμωση. Το μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα προκύπτει από την σύζευξη φωτοβολταϊκών και συστημάτων αντίστροφης ώσμωσης (Jijakli et al., 2012).

Έτσι, έχοντας καταλήξει στο συμπέρασμα της αναγκαιότητας της μελέτης της αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με την αντίστροφη ώσμωση, καθώς και της χρήσης ΑΠΕ, η παρούσα εργασία συνεχίζει με το 2^ο κεφάλαιο, στο οποίο αναλύονται και συγκρίνονται οι σημαντικότερες μέθοδοι αφαλάτωσης, οι οποίες κατηγοριοποιούνται στις θερμικές και τις τεχνολογίες μεμβρανών. Η αρχή λειτουργίας, οι εφαρμογές και τα βασικά χαρακτηριστικά της κάθε κατηγορίας αναλύονται επίσης.

Στη συνέχεια, στα πλαίσια του 3^{ου} κεφαλαίου, μελετάται η αρχή λειτουργίας και οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης. Ακολουθεί η ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου, περιλαμβάνοντας τις μαθηματικές εξισώσεις και τις σχεδιαστικές παραμέτρους που απαιτούνται.

Το 4^ο Κεφάλαιο περιλαμβάνει την μαθηματική αποτύπωση του προβλήματος και παρουσιάζονται όλες οι απαιτούμενες μαθηματικές εξισώσεις για τον υπολογισμό των σημαντικότερων παραμέτρων, όπως, μεταξύ άλλων, ο ρυθμός ροής του νερού και του άλατος, η απόρριψη αλατότητας, η συγκέντρωση άλατος στο διήθημα. Καθορίζονται όλες οι παραδοχές του μοντέλου, ενώ γίνεται και αναφορά στις ενεργειακές απαιτήσεις όπως και στην μεθοδολογία υπολογισμού την καταναλισκόμενης ενέργειας ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης.

Στο 5^ο κεφάλαιο μελετάται η αξιοποίηση ΑΠΕ με στόχο την ενεργειακή τροφοδοσία ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στα αιολικά και φωτοβολταϊκά συστήματα.

Στο 6^ο κεφάλαιο επεξηγείται η υπολογιστική υλοποίηση του μαθηματικού μοντέλου στο πρόγραμμα Process Simulation and Modelling (PSM). Τα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου είναι η ποσότητα και οι ποιοτικές παράμετροι του θαλασσινού νερού, τεχνικά χαρακτηριστικά της μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης καθώς και παράμετροι λειτουργίας, όπως η ανάκτηση και η πίεση. Ως αποτελέσματα επιστρέφονται παράμετροι που εξηγήθηκαν στο 3^ο κεφάλαιο, όπως οι ποιοτικές παράμετροι του διηθήματος και του συμπυκνώματος, η απαιτούμενη ενέργεια και ο ρυθμός ροής όλων των ρευμάτων. Όλα τα αποτελέσματα αναφέρονται στο 7^ο κεφάλαιο και τα κυριότερα συμπεράσματα συνοψίζονται στο 8^ο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου για τη διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης ως μέθοδος αφαλάτωσης θαλασσινού νερού. Η καινοτομία της εργασίας έγκειται στη μελέτη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με σκοπό την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης.

2.

Αφαλάτωση

Η αφαλάτωση ως τρόπος λύσης της λειψυδρίας

Τεχνολογίες αφαλάτωσης

Σύγκριση τεχνολογιών αφαλάτωσης θαλασσινού νερού

Εφαρμογές της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση

Κεφάλαιο 2 – Αφαλάτωση

2.1 Η αφαλάτωση ως τρόπος λύσης της λειψυδρίας

Η αφαλάτωση θαλασσινού νερού μπορεί να λύσει το πρόβλημα της συνεχούς μείωσης αποθεμάτων γλυκού νερού σε παγκόσμια κλίμακα. Σε βιομηχανική κλίμακα η αφαλάτωση θαλασσινού νερού αντιπροσωπεύει το 58.9%, ενώ το 21.9% αφορά σε υφάλμυρο νερό (Curcio et al., 2015). Την τελευταία δεκαετία, η παραγωγή γλυκού νερού με τη μέθοδο της αφαλάτωσης αυξάνεται κατά 6.8% κάθε χρόνο, οδηγώντας στην αύξηση της παραγωγής 4.6 εκατομμυρίων m³ γλυκού νερού ετησίως (Tan et al., 2022).

Με τον όρο αφαλάτωση ορίζεται κάθε διεργασία μέσω της οποίας απομακρύνονται τα άλατα και οι προσμίξεις από το διάλυμα θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού. Με αυτόν τον τρόπο, το προς επεξεργασία διάλυμα διαχωρίζεται σε δύο διαλύματα, εκ των οποίων το ένα έχει χαμηλή συγκέντρωση σε άλας (διήθημα) και το άλλο έχει πολύ υψηλή συγκέντρωση σε άλας, το οποίο αποκαλείται συνήθως άλμη ή συμπύκνωμα (Curto, Franzitta and Guercio, 2021).

Οι τεχνολογίες μεμβρανών χρησιμοποιούνται ευρέως για την αφαλάτωση, καθώς απομακρύνουν τα άλατα από το διάλυμα (Ahmed, Khalil and Hilal, 2021). Συγκριτικά με όλες τις τεχνολογίες αφαλάτωσης, η αντίστροφη ώσμωση αποτελεί το 68.70% της συνολικής παραγωγής αφαλατωμένου νερού, ενώ η απόσταξη πολλαπλής επίδρασης ακολουθεί με 30.72%. Σε μικρότερο βαθμό χρησιμοποιούνται και άλλες τεχνολογίες, όπως η πολυβάθμια εκτόνωση και η ηλεκτροδιάλυση (Lin et al., 2021).

2.2 Τεχνολογίες αφαλάτωσης

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες αφαλάτωσης, οι θερμικές και οι τεχνολογίες μεμβρανών (Kavitha et al., 2019). Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνεται η απόσταξη πολλαπλής επίδρασης, η πολυβάθμια εκτόνωση και η απόσταξη θερμικής συμπίεσης ατμών. Στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνεται η αντίστροφη ώσμωση, η απόσταξη με μεμβράνες και η ηλεκτροδιάλυση (Abid et al., 2023; Shahid et al., 2023).

Πίνακας 1. Ταξινόμηση και διαχωρισμός των βασικών χαρακτηριστικών των θερμικών μεθόδων με τις τεχνολογίες αφαλάτωσης.

Ταξινόμηση	Θερμικές μέθοδοι	Τεχνολογίες μεμβρανών
Τεχνολογίες Αφαλάτωσης	MED, MSF, MVC	ED, RO
Μηχανισμός διαχωρισμού	Αλλαγή φάσης	Διάχυση
Κυρία πηγή ενέργειας	Θερμική	Ηλεκτρική
Κινητήρια δύναμη	Θερμότητα	Πίεση/Ηλεκτρισμός
Ειδική ενεργειακή κατανάλωση (SEC)	Υψηλή	Χαμηλή

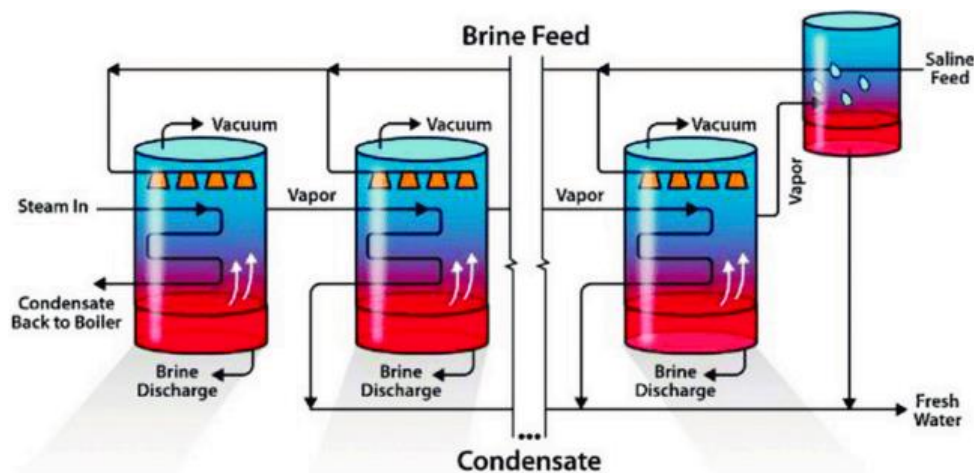
Και στις δύο περιπτώσεις απαιτείται η κατανάλωση ενέργειας, ώστε να λειτουργήσουν και να οδηγήσουν στην παραγωγή καθαρού νερού με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άλας. Εξαιτίας του υψηλού κόστους λειτουργίας χρησιμοποιούνται κυρίως για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού και σπανίως για υφάλμυρου (Do Thi et al., 2021).

2.2.1 Θερμικές διεργασίες

2.2.1.1 Πολυβάθμια εκτόνωση (Multi-Stage Flash Distillation)

Η αρχή λειτουργίας της πολυβάθμιας εκτόνωσης στηρίζεται στην εκτόνωση του νερού, εφόσον το υγρό διάλυμα γίνεται ατμός, μέσω πολλαπλών διαδοχικών σταδίων (Khawaji et al., 2008). Το θαλασσινό νερό θερμαίνεται χρησιμοποιώντας είτε κάποια εξωτερική πηγή θερμότητας ή ανακτημένη θερμότητα (Tan et al., 2022). Η θέρμανση γίνεται υπό συγκεκριμένη πίεση σε θερμοκρασία ελαφρώς μικρότερη του σημείου βρασμού και στη συνέχεια τροφοδοτείται σε στάδιο που βρίσκεται υπό πίεση, με αποτέλεσμα τον ξαφνικό βρασμό και την παραγωγή ατμού. Το εναπομείναν διάλυμα τροφοδοτείται στο επόμενο στάδιο, το οποίο λειτουργεί σε ακόμη χαμηλότερη πίεση επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία (Belessiotis et al., 2016). Κάθε στάδιο της εγκατάστασης λειτουργεί σε όλο και χαμηλότερες διαδοχικές πιέσεις (Krishna, no date; Curto, Franzitta and Guercio, 2021). Ο αριθμός των σταδίων κυμαίνεται από 4 έως και 40 (Tan et al., 2022). Οι παραγόμενοι υδρατμοί συμπυκνώνονται απελευθερώνοντας θερμότητα, η οποία σε κάθε στάδιο αυξάνει την θερμοκρασία του προς επεξεργασία θαλασσινού νερού (Khawaji et al., 2008). Για να πραγματοποιηθεί η εξάτμιση απαιτείται η απορρόφηση ενέργειας, με αποτέλεσμα να μειώνεται η θερμοκρασία της άλμης ή αλλιώς του συμπυκνώματος (Belessiotis et al., 2016).

Το 17.6% του παγκόσμιου δυναμικού αφαλάτωσης μέσω θερμικών τεχνολογιών το κατέχει η πολυβάθμια εκτόνωση (Krishna, no date; Curto, Franzitta and Guercio, 2021). Μπορεί να επεξεργαστεί θαλασσινό νερό περιεκτικότητας έως και 70000 mg/L και να οδηγήσει στην παραγωγή νερού με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε άλας. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί ότι οι υψηλή θερμοκρασία προκαλεί διάβρωση. Ένα ακόμη μειονέκτημα είναι ότι η πολυβάθμια εκτόνωση δεν μπορεί να συνδυαστεί με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που παρέχουν διαλείπουσα ενέργεια (Tan et al., 2022). Όσον αφορά στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα της πολυβάθμιας εκτόνωσης, η εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου υπό την υπόθεση ότι απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια ίση με 4 kWh/m³ είναι 28.3 g NO_x/m³, 23.4 kg CO₂/m³, 27.9 g SO_x/m³ και 2.1 g σωματιδιακής ύλης (PM₁₀)/m³.



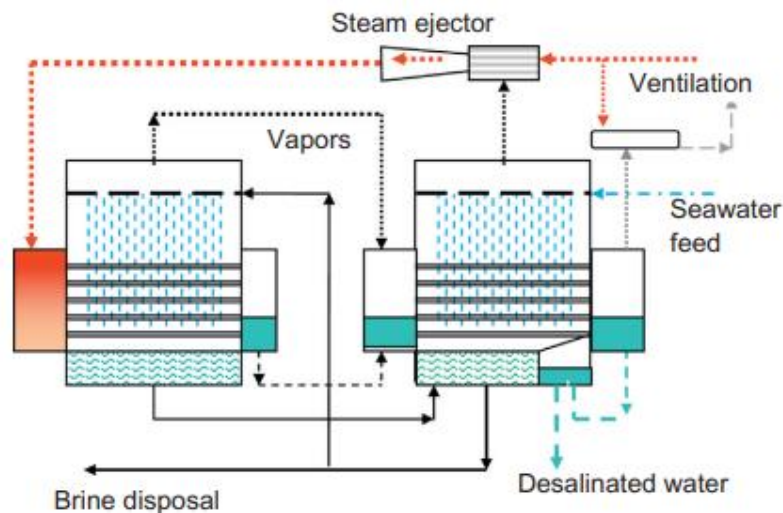
Εικόνα 2. Σχηματική αναπαράσταση των σταδίων της απόσταξης πολλαπλής επίδρασης (Tan et al., 2022)

Οι ενεργειακές απαιτήσεις συγκριτικά με την πολυβάθμια εκτόνωση είναι χαμηλότερες, αφού κυμαίνονται στο εύρος των 5.5-9.0 kWh/m³ (Belessiotis et al., 2016). Όσον αφορά στις εκπομπές αέριων ρύπων, οι εκπομπές έχουν υπολογιστεί 18.1 kg CO₂/m³, 21.4 g NO_x/m³, 26.5 g SO_x/m³ και 1 g PM₁₀/m³, δεδομένου ότι απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια ίση με 2 kWh/m³ (Ihsanullah et al., 2021; Tan et al., 2022).

2.2.1.3 Εξάτμιση με θερμική επανασυμπίεση ατμών

Η εξάτμιση με θερμική επανασυμπίεση ατμών (Thermal Vapor Compression Distillation) απαιτεί θερμική και ηλεκτρική ενέργεια. Χρησιμοποιείται είτε σε συνδυασμό με κάποια άλλη μέθοδο είτε μόνη της. Η θερμότητα για την εξάτμιση του νερού προέρχεται από την συμπίεση του ατμού (Likhachev and Li, 2013; Curto, Franzitta and Guercio, 2021).

Μείγμα ατμού που αποτελείται από ατμό που παράγεται σε λέβητα και μέρος του ατμού που παράγεται στον αποστακτήρα χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του διαλύματος τροφοδοσίας του αποστακτήρα. Μέρος του συμπυκνωμένου ατμού εισάγεται στον λέβητα, ενώ το υπόλοιπο αναμιγνύεται με το αφαλατωμένο νερό που προέρχεται από τον αποστακτήρα (Belessiotis et al., 2016). Η απαιτούμενη θερμότητα για την εξάτμιση παράγεται μέσω ενός συμπιεστή. Η χωρητικότητα των μονάδων αυτών είναι αρκετά μικρή (Likhachev and Li, 2013; Curto, Franzitta and Guercio, 2021).



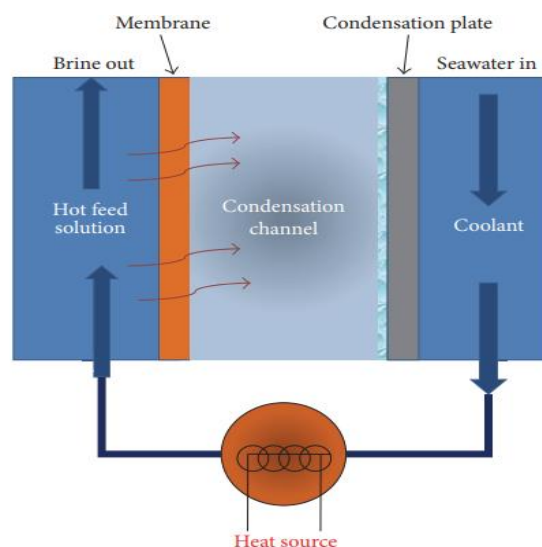
Εικόνα 3. Σχηματική αναπαράσταση 2 σταδίων της εξάτμισης με θερμική επανασυμπύεση ατμών (Belessiotis et al., 2016).

2.2.2 Τεχνολογίες μεμβρανών

2.2.2.1 Απόσταξη με μεμβράνες (Membrane Distillation)

Η απόσταξη με μεμβράνες βασίζεται σε υδρόφοβες μεμβράνες μέσω των οποίων μπορεί να περάσει το νερό σε μορφή ατμού. Θεωρητικά μπορούν να απομακρυνθούν όλες οι μη πτητικές ουσίες, δηλαδή ουσίες που δεν μετατρέπονται σε αέρια μορφή (Iain D. Stewart, 2021). Στην απόσταξη με μεμβράνη παρέχεται θερμότητα προκειμένου να διαχωριστεί το διάλυμα της τροφοδοσίας και του διηθήματος. Με αυτόν τον τρόπο η θερμότητα προκαλεί διαφορά πίεσης ατμών κατά μήκος της μεμβράνης, με αποτέλεσμα να εξατμίζεται το νερό της τροφοδοσίας και να διέρχεται από τους πόρους της μεμβράνης. Στη συνέχεια, συμπυκνώνεται στο διήθημα, το οποίο έχει χαμηλότερη θερμοκρασία (Ahmed, Khalil and Hilal, 2021). Η

Εικόνα 4 παρουσιάζει τη διεργασία της απόσταξης με μεμβράνες.

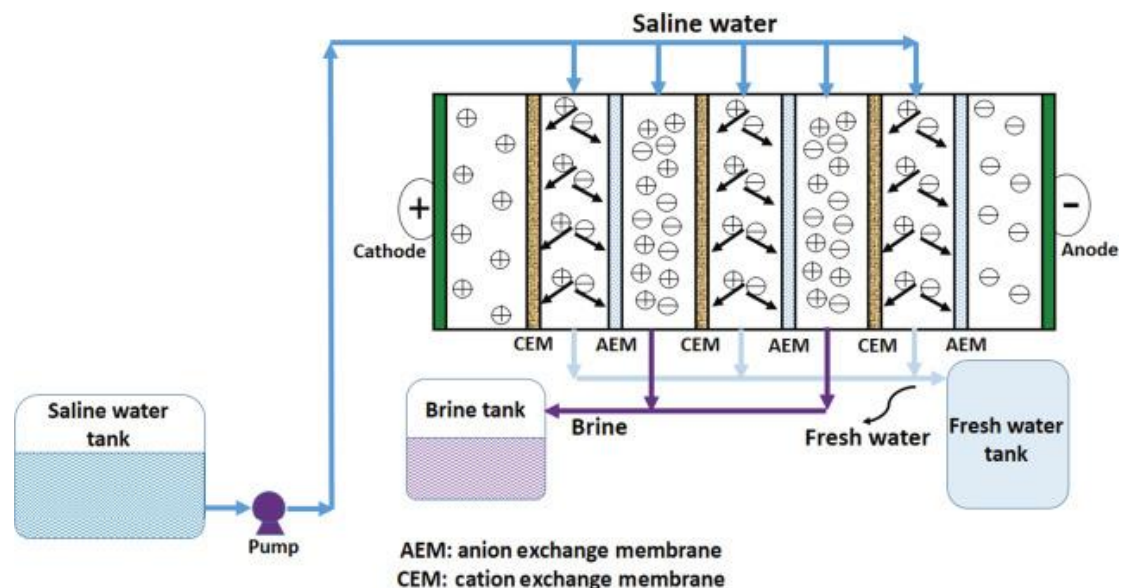


Εικόνα 4. Σχηματική αναπαράσταση της απόσταξης με μεμβράνες (Alhathal Alanezi et al., 2016)

Οι χαμηλές απαιτήσεις για θέρμανση, οι χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας σε σύγκριση με τις υπόλοιπες θερμικές τεχνολογίες και οι χαμηλότερες πιέσεις λειτουργίας σε σχέση με την αντίστροφη ώσμωση καθιστούν την συγκεκριμένη διεργασία σε πλεονεκτική θέση (Curto, Franzitta and Guercio, 2021; Ahmed, Khalil and Hilal, 2021). Ωστόσο, ο χαμηλός ρυθμός ροής του διαλύματος τροφοδοσίας και η υψηλή κατανάλωση ενέργειας εμποδίζουν την εφαρμογή της διεργασίας σε βιομηχανική κλίμακα (Ahmed, Khalil and Hilal, 2021). Γενικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία ραδιενεργών κι μη λυμάτων, αλμυρού και αλατούχου νερού καθώς και του συμπυκνώματος που προκύπτει από την αντίστροφη ώσμωση (Abid et al., 2023).

2.2.2.2 Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis)

Σε ένα σύστημα ηλεκτροδιάλυσης, γίνεται μεταφορά ιόντων, μέσω μιας ημιπερατής μεμβράνης, εξαιτίας της εφαρμογής ηλεκτρικού πεδίου. Παρότι είναι μια διαδεδομένη διαδικασία αφαλάτωσης, κατέχει μικρό ποσοστό στο συνολικό δυναμικό εγκαταστάσεων αφαλάτωσης. Η αρχή λειτουργίας της ηλεκτροδιάλυσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 5. Οι βιομηχανίες χρησιμοποιούν την συγκεκριμένη μέθοδο αποκλειστικά για αφαλάτωση διαλυμάτων χαμηλής αλατότητας, όπως το υφάλμυρο νερό. Η κύρια αιτία είναι ότι οι ενεργειακές απαιτήσεις της διαδικασίας αυξάνονται όσο αυξάνεται και η συγκέντρωση ιόντων στο διάλυμα (Krishna, no date).



Εικόνα 5. Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας της ηλεκτροδιάλυσης (Aghaeinejad-Meybodi & Ghasemzadeh, 2017)

2.2.2.3 Αντίστροφη ώσμωση (Reverse Osmosis)

Η αντίστροφη ώσμωση πραγματοποιείται με ημιπερατές μεμβράνες, οι οποίες επιτρέπουν τη διέλευση συγκεκριμένων μορίων. Η άσκηση πίεσης είναι η κινητήριος δύναμη για τη διήθηση του διαλύματος τροφοδοσίας και κατ' επέκταση την παραγωγή του διηθήματος (καθαρού νερού) μέσω της μεμβράνης. Οι διαλυμένες ουσίες, συμπεριλαμβανομένου του άλατος, κατακρατούνται στην μεμβράνη και απορρίπτονται. Τα βασικότερα της πλεονεκτήματα είναι οι χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις και ο μεγάλος βαθμός διαχωρισμού. Τα βασικότερα της μειονεκτήματα είναι η αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων όσο αυξάνεται η συγκέντρωση άλατος στο διάλυμα τροφοδοσίας και η αναγκαιότητα προ-επεξεργασίας αυτού (Ahmed, Khalil and Hilal, 2021; Curto, Franzitta and Guercio, 2021).

Στη συγκεκριμένη διεργασία, το συνολικό κόστος οφείλεται στην επένδυση σε μονάδες μεμβρανών και στην κατανάλωση ενέργειας λόγω της πίεσης που πρέπει να ασκηθεί, η οποία πρέπει να ξεπερνά την ωσμωτική πίεση. Το γεγονός ότι δεν απαιτεί την ύπαρξη πηγής θερμότητας και τη χρήση χημικών/ προσροφητικών μέσων για την πραγματοποίησή της αποτελεί πλεονέκτημα (Wimalawansa, 2013). Πλέον, αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνολογία για την αφαλάτωση συγκριτικά τόσο με τις τεχνολογίες μεμβρανών όσο και με τις θερμικές τεχνολογίες (Curto et al., 2021).

2.3 Σύγκριση των τεχνολογιών αφαλάτωσης θαλασσινού νερού

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι πιο σημαντικές παράμετροι των διεργασιών που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2.2. Προκειμένου να γίνει η σύγκριση των τεχνολογιών αφαλάτωσης, διερευνάται η αλατότητα του διαλύματος τροφοδοσίας, η κατανάλωση της ενέργειας, η χωρητικότητα και το κόστος παραγωγής νερού.

Πίνακας 2. Τεχνικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών αφαλάτωσης

Παράμετρος	Αλατότητα (mg/L)	Κατανάλωση ενέργειας (kWh/m ³)	Χωρητικότητα (m ³ /d)	Κόστος (€/m ³)	Πηγή
Πολυβάθμια εκτόνωση	-	21-59	73646	3.72	Mabrouk et al. (2010)
	70000	5.2	-	0.88	Youssef et al. (2014a)
	-	4-6	50000-70000	0.48-1.60	Thi et al. (2021)
Πολυβάθμια απόσταξη	-	15-57	600	0.93	Zhou & Tol (2005)
	45000	3.8	-	0.79	Youssef et al. (2014)
	-	1.5-2.5	5000-15000	0.48-0.93	Thi et al. (2021)
Εξάτμιση με θερμική επανασυμπύεση ατμών	-	1.5-2.5	-	0.80-0.88	Roy & Ragunath (2018)
	42000	11.1	-	0.84	Youssef et al. (2014)
	-	7-12	100-3000	1.83-2.38	Thi et al. (2021)
Ηλεκτροδιάλυση	-	1.0-3.5	81.6	-	Roy & Ragunath (2018)

	-	1.0-3.5	81.6	-	Roy & Ragunath (2018)
	6000	5.5	-	0.76	Youssef et al. (2014)
	-	2.6-5.5	2-145000	0.55-0.96	Thi et al. (2021)
Αντίστροφη ώσμωση	35000	3.0-6.0	80	0.18-0.65	Tzen & Papapetroub (2012)
	45000	8.2	-	0.69	Youssef et al. (2014)
	-	5-9	24000	0.52-0.51	Thi et al. (2021)

2.4 Εφαρμογές της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση

Η διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης χρησιμοποιείται για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Ως υγρά απόβλητα ορίζονται λύματα που προκύπτουν, μεταξύ άλλων, από υπονόμους αστικών ιστών, εκπλύματα χωματερών και υγειονομικών ταφών, λύματα ελαιοτριβείων, βυρσοδεψείων και γαλακτοβιομηχανιών. Μέσω της αντίστροφης ώσμωσης είναι δυνατή η ανάκτηση έως και 80% με την μεμβράνη να κατακρατεί σημαντικά μεγάλες ποσότητες διαλυμένων ουσιών. Η απόδοση ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης καθορίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την προ-επεξεργασία και την ποιότητα του διαλύματος τροφοδοσίας, καθώς και την ανθεκτικότητα της μεμβράνης και τον τακτικό έλεγχο για τυχόν αστοχίες. Η υδροφυλοποίηση της μεμβράνης μετριάζει την αστοχία της, ενώ όσο λιγότερο είναι το ποσοστό ανάκτησης, άρα και η ροή εξόδου, τόσο μικρότερη και η φθορά της (Kucera, 2010).

Επιπλέον, βρίσκει εφαρμογή στην συμπύκνωση χυμών, με αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους. Αρχικά, αποφεύγονται οι συντηρήσεις και οι αντικαταστάσεις εξαρτημάτων λόγω φθοράς μεγάλων θερμοκρασιών, μειώνονται οι απαιτήσεις ενέργειας και το αρχικό κόστος επένδυσης και αγοράς εξοπλισμού. Μέσω των μεμβρανών συντηρούνται καλύτερα οι αντιοξειδωτικές ιδιότητες των συστατικών. Η χρήση μεμβρανών αποτελεί μια καλή εναλλακτική στις παραδοσιακές μεθόδους φυγοκέντρησης και εξάτμισης κυρίως για τον διαχωρισμό πρωτεϊνών και την δημιουργία γαλακτοκομικών προϊόντων. Είναι δυνατό να κατακρατηθεί έως και το 70% του νερού που περιλαμβάνεται στο γάλα, χωρίς να υποβάλλεται σε θερμικές διαδικασίες, ενώ ταυτόχρονα διατηρούνται όλα τα θρεπτικά συστατικά. Επιπλέον, η συμπύκνωση του γάλατος πριν την μεταφορά του, μειώνει σημαντικά το κόστος μεταφοράς (Wenten & Khoiruddin, 2016).

Ωστόσο, η εφαρμογή της αντίστροφης ώσμωσης για την αφαλάτωση πηγών υδάτων, με στόχο την παραγωγή πόσιμου ή απιονισμένου νερού, βρίσκει πολλές εφαρμογές. Ήδη από την δεκαετία του 1970, η απαιτούμενη ενέργεια για την αφαλάτωση θαλάσσιου ύδατος έχει μειωθεί δραματικά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μονάδα αφαλάτωσης στο Sorek του Ισραήλ, η οποία είναι μια από τις μεγαλύτερες που υπάρχουν, με παραγωγική ικανότητα 624000 m³ πόσιμου νερού/ημέρα.

Αφαλάτωση μπορεί να γίνει και σε γεωθερμικά ύδατα, τα οποία θεωρούνται πολύτιμη πηγή νερού αν και έχουν υψηλή συγκέντρωση σε βόριο, το οποίο είναι πολύ επικίνδυνο για την υγεία του ανθρώπου. Μέσω της αντίστροφης ώσμωσης μπορεί να παραχθεί υψηλή ποιότητα νερού, αρκεί να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα, όπως η επανεπεξεργασία του διηθήματος, με σκοπό να απομακρυνθούν όλα τα στοιχεία βορίου που περιέχονται σε αυτά.

Από την άλλη μεριά, τα επιφανειακά ύδατα, τα οποία επίσης αξιοποιούνται για την παραγωγή πόσιμου νερού, συνήθως είναι μολυσμένα από παράσιτα λόγω των αρδεύσεων. Μέσω της αντίστροφης ώσμωσης κατακρατούνται όχι μόνο τα διαλυμένα στερεά, αλλά και τυχόν παράσιτα. Για παράδειγμα, πλέον, μέσω μια κοινής μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης μπορεί να επιτευχθεί έως και 99.8% απομάκρυνση παρασίτων.

Οι Z. Wang et al. (2021) επιχείρησαν την αφαλάτωση θαλασσινού νερού με μεμβράνη αντίστροφης ώσμωσης επιφάνειας 1.2 m^2 και πίεση λειτουργίας 0.4-0.8 MPa. Η επεξεργασία διαλύματος τροφοδοσίας συγκέντρωσης 2500-8500 mg/L οδήγησε σε ειδική κατανάλωση ενέργειας στο εύρος 1.8-3.8 kWh/m³. Επίσης, η αφαλάτωση θαλασσινού νερού με συγκέντρωση του διαλύματος τροφοδοσίας 22200 mg/L και την πίεση να φτάνει τα 6.5 MPa οδήγησε στην παραγωγή διηθήματος με ρυθμό ροής 43.8 m/h απαιτώντας την κατανάλωση ενέργειας ίση με 5 kWh/m³ (Luong et al., 2023). Τέλος, οι Fayyaz et al. (2023) μελέτησαν μια μονάδα αντίστροφης ώσμωσης συνολικής επιφάνειας 0.000279 m^2 και υπολόγισαν ότι απαιτείται κατανάλωση ενέργειας ίση με 4.95 kWh/m³ προκειμένου να παραχθεί πόσιμο νερό.

3.

Αντίστροφη ώσμωση ως μέθοδος αφαλάτωσης θαλασσινού νερού

Αρχή λειτουργίας

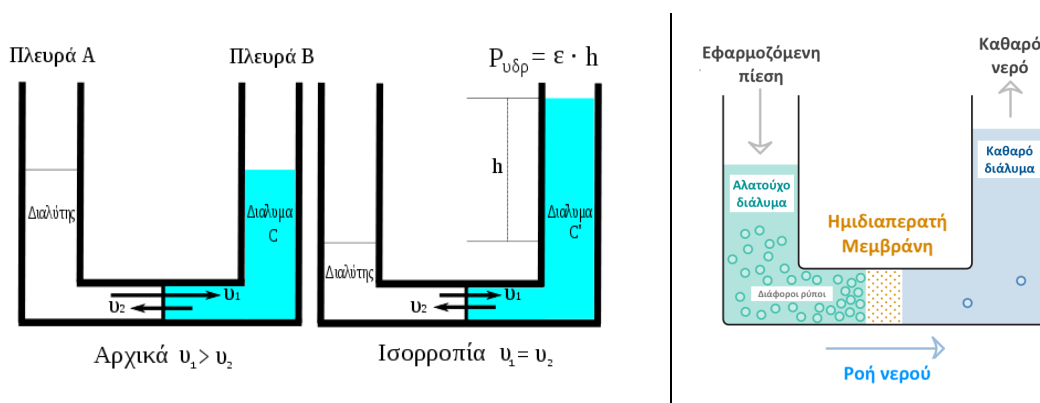
Παράμετροι της διεργασίας

Κεφάλαιο 3 – Αντίστροφη ώσμωση ως μέθοδος αφαλάτωσης θαλασσινού νερού

3.1 Αρχή λειτουργίας

Η αντίστροφη ώσμωση αποτελεί την πιο οικονομικά αποδοτική διεργασία για την επεξεργασία του θαλασσινού νερού σε σύγκριση με όλες τις υπόλοιπες διεργασίες, όπως αποδείχθηκε στο κεφάλαιο 2.3 (Kavitha *et al.*, 2019). Η επεξεργασία του θαλασσινού νερού με μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης οδηγεί στη διέλευση του νερού από την ημιπερατή μεμβράνη και την συγκράτηση των διαλυμένων ουσιών (Wimalawansa, 2013).

Ως ώσμωση ορίζεται το φαινόμενο της διέλευσης μορίων διαλύτη μέσω ημιπερατής μεμβράνης από το διάλυμα χαμηλότερης συγκέντρωσης (αραιότερο) προς το διάλυμα υψηλότερης συγκέντρωσης σε διαλυμένη ουσία (πυκνότερο). Η φυσική αυτή διαδικασία λαμβάνει χώρα έως ότου η συγκέντρωση να ισοσταθμιστεί στις δύο πλευρές της μεμβράνης. Η υψομετρική διαφορά των δύο επιφανειών των ρευστών αντιστοιχεί στην ωσμωτική πίεση του διαλύματος. Ακολουθεί η εικονική αναπαράσταση της ώσμωσης, όπου ως u_1 και u_2 ορίζονται οι ταχύτητες ροής από τον διαλύτη προς το διάλυμα και αντίστροφα, C και C' είναι η συγκέντρωση του διαλύματος πριν και μετά το πέρας της ώσμωσης και h η ωσμωτική πίεση.



Εικόνα 6. Εικονική αναπαράσταση της ώσμωσης (αριστερά) και της αντίστροφης ώσμωσης (δεξιά)

Όταν ασκείται πίεση, η οποία ξεπερνά την τιμή της ωσμωτικής πίεσης, στον θάλαμο που αρχικά φυλασσόταν το διάλυμα με υψηλή περιεκτικότητα στη διαλυμένη ουσία, πρόκειται για την αντίστροφη ώσμωση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το διάλυμα να περνάει από τον θάλαμο του διαλύματος προς τον θάλαμο του διαλύτη δια μέσου της μεμβράνης, η οποία κατακρατεί τις διαλυμένες ουσίες, συμπεριλαμβανομένου των ιόντων και μεγαλύτερων σωματιδίων. Ενδεικτικά, για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού ένα εύρος τιμών πίεσης είναι 5515.81-6894.76 kPa (Source Book of Alternative Technologies for Freshwater Augmentation in Latin America and the Caribbean, no date; Reverse Kucera, 2010).

Κατά καιρούς, πολλές μέθοδοι αφαλάτωσης έχουν εφαρμοστεί με στόχο την παραγωγή καθαρού νερού. Η αντίστροφη ώσμωση είναι η μόνη μέθοδος που είναι ικανή να παραγάγει μεγάλες ποσότητες νερού. Ωστόσο, η πίεση που πρέπει να ασκηθεί απαιτεί την κατανάλωση

πολλής ενέργειας (Polat & Dincer, 2018). Συνεπώς, οι αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις που φτάνουν έως και 4 kWh/m³ αποτελούν ένα σημαντικό μειονέκτημα σε συνδυασμό με την απόφραξη των μεμβρανών που απαιτεί τη χρήση χημικών ουσιών για τον καθαρισμό της ή την ολική αντικατάσταση. Παρόλα αυτά, εξακολουθεί να είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος αφαλάτωσης παγκοσμίως (Shehata et al., 2023). Η αφαλάτωση θαλασσινού νερού με αντίστροφη ώσμωση συνθετικού υλικού ενός σταδίου είναι ικανή να επιτύχει απομάκρυνση άλατος μεγαλύτερη από 99.30%. Συνήθως ο τύπος μεμβρανών που προτιμάται για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού είναι μεμβράνη διάταξης σπειροειδούς περιέλιξης (Wang et al., 2011). Στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται περιπτώσεις που έχουν μελετήσει την αντίστροφη ώσμωση για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού μαζί με τις βασικές παραμέτρους που εφαρμόστηκαν.

Πίνακας 3. Παράμετροι διεργασίας για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού

Παράμετρος	Τιμή για αφαλάτωση θαλασσινού νερού			
Τύπος μεμβράνης	Μεμβράνη αντίστροφης ώσμωσης συνθετικού υλικού	TFC μεμβράνη πολυαμιδίου διασταυρωμένης πλέξης	Μεμβράνη τριοξικής κυτταρίνης κοίλης πλέξης	Σύνθετη σπειροειδής μεμβράνη πολυαμιδίου
Ροή διηθήματος (m ³ /h)	-	1.16	2.5-2.8	35.0
Πίεση (psi)	800-1000	-	-	-
Συγκέντρωση διαλύματος τροφοδοσίας (mg/L)	10000-50000	-	-	-
Απόρριψη αλατότητας (%)	> 99.30	> 99.60-99.75	99.40-99.60	99.40-99.60
Επιθυμητή συγκέντρωση άλατος (mg/L)	< 500	< 500	< 500	< 500
Κόστος (€/m ³)	0.465-0.744	-	-	-
Πηγή	L. K. Wang et al. (2011)	Abid et al. (2023)	Abid et al. (2023)	Stover (2013)

*Το πόσιμο νερό, με βάση οδηγία του Π.Ο.Υ, πρέπει να έχει συγκέντρωση αλάτων <500 mg/L.

Για να γίνει η αντίστροφη ώσμωση μια οικονομικά πιο αποδοτική διαδικασία, απαιτούνται μελέτες στον τομέα της ανάκτησης της θερμότητας και της ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης

καυσίμου. Η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως οι ηλιακοί συλλέκτες και τα φωτοβολταϊκά, θεωρείται η βέλτιστη πρακτική, προκειμένου να υπάρχουν περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη (Shehata et al., 2023). Σημαντικό πρόβλημα για τις εγκαταστάσεις αντίστροφης ώσμωσης με εφαρμογή στην αφαλάτωση είναι το συμπύκνωμα. Μέθοδοι απόρριψης και διαχείρισής του είναι ακόμα υπό μελέτη. Η απόδοση μιας μονάδας αντίστροφης ώσμωσης εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα νερού στην είσοδο, τη διάταξη της και παραμέτρους της διεργασίας, όπως η ανάκτηση (Kucera, 2010).

3.2 Παράμετροι της διεργασίας

Σε βιομηχανική κλίμακα είναι συνήθης η λειτουργία διασταυρούμενης ροής για την αντίστροφη ώσμωση. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα τροφοδοσίας εισέρχεται στο σύστημα με συγκεκριμένο ρυθμό ροής και ποιότητα, η οποία μεταβάλλεται καθώς το ρεύμα διαπερνά τη μεμβράνη. Έτσι, με τη διέλευση μέσω της ημιπερατής μεμβράνης, το ρεύμα τροφοδοσίας χωρίζεται στο ρεύμα διηθήματος και στο ρεύμα συμπυκνώματος. Η πίεση λειτουργίας για τον συγκεκριμένο σκοπό κυμαίνεται στο εύρος 54.4–68.0 atm (Wang et al., 2011).

3.2.1 Ωσμωτική πίεση

Ως ωσμωτική πίεση, ορίζεται η ελάχιστη υδροστατική πίεση μεταξύ του διαλύματος τροφοδοσίας και διηθήματος που πρέπει να εφαρμοστεί σε ένα διάλυμα, ώστε να εξασφαλιστεί η ροή του διαλύματος τροφοδοσίας προς το διάλυμα του διηθήματος. Η πίεση που ασκείται κατά την αντίστροφη ώσμωση πρέπει να είναι μεγαλύτερη της ωσμωτικής και εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος της διαλυμένης ουσίας. Επομένως, η ωσμωτική πίεση είναι η ελάχιστη υδροστατική πίεση μεταξύ του διαλύματος τροφοδοσίας και διηθήματος που πρέπει να εφαρμοστεί σε ένα διάλυμα, ώστε να εξασφαλιστεί η ροή του διαλύματος τροφοδοσίας προς το διάλυμα του διηθήματος (Curcio et al., 2015). Η τιμή της εξαρτάται από τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του διαλύματος τροφοδοσίας (Voet, Voet and Pratt, 2006; Saleh and Gupta, 2016).

Η ωσμωτική πίεση εξαρτάται από τη συγκέντρωση των σωματιδίων διαλυμένης ουσίας και μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση van't Hoff (Gaublomme et al., 2020):

$$\Delta\pi = \sum_j (C_{m,j} - C_{p,j}) \cdot i \cdot R \cdot T \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

Όπου:

- C_m = συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας j πλησίον της μεμβράνης στη μεριά της τροφοδοσίας (mg/L)
- C_p = συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας j στο διήθημα (mg/L)
- R = σταθερά των αερίων (J/mol/K)
- T = θερμοκρασία (K)
- i = σταθερά van't Hoff

Η σταθερά van't Hoff θεωρείται ίση με 1 για τα ιόντα (Gaublomme et al., 2020). Συνήθως η τιμή της ωσμωτικής πίεσης για θαλασσινό νερό είναι περίπου 2.3 MPa (Curcio et al., 2015).

3.2.2 Ροή τροφοδοσίας και διηθήματος

Η ροή του διαλύτη, J_w (m/h), εξαρτάται κυρίως από την διαφορά πίεσης της μεμβράνης, ΔP (bar), από την διαφορά ωσμωτική πίεσης, $\Delta \pi$ (bar) (L. K. Wang et al., 2011). Υπολογίζεται από την εξίσωση (2):

$$J_w = P_m \cdot (\Delta P - \Delta \pi) \quad (2)$$

Όπου P_m (m/h/bar) είναι ο συντελεστής διαπερατότητας του διαλύτη, οποίος είναι μοναδικός για κάθε μεμβράνη και μεταβάλλεται ανάλογα με την θερμοκρασία και το pH.

Η ροή της διαλυμένης ουσίας, J_s (mg/m²/h), εξαρτάται από τη διαφορά συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας στην τροφοδοσία, $C_{m,j}$ (mg/L), και το διήθημα, $C_{p,j}$ (mg/L). Ο υπολογισμός τη γίνεται μέσω της εξίσωσης (3).

$$J_s = P_s \cdot (C_{m,j} - C_{p,j}) \quad (3)$$

Η σταθερά P_s (m/h) αντιπροσωπεύει τη διαπερατότητα της διαλυμένης ουσίας. Παρατηρώντας τις εξισώσεις (2) και (3), είναι εμφανές πως η ροή του διαλύτη και της διαλυμένης ουσίας είναι ανεξάρτητες η μία από την άλλη, αφού επηρεάζονται μόνο από την βαθμίδα χημικού δυναμικού (Wang et al., 2011). Μπορούν να συσχετιστούν μέσω της εξίσωσης (4), η οποία λαμβάνει υπόψη ότι η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας πλησίον της μεμβράνης από την πλευρά του διηθήματος είναι ίδια με την συγκέντρωση στο σημείο εξόδου στο διήθημα (Chen & Qin, 2019).

$$J_s = C_p \cdot J_w \quad (4)$$

Ως ρυθμός ροής, Q (m³/h), χαρακτηρίζεται η ποσότητα του διαλύματος που διέρχεται σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, J (m/h), διαμέσου μιας δεδομένης επιφάνειας της μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης, A (m²).

Ο ρυθμός ροής τροφοδοσίας ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης αποτελεί σχεδιαστική παράμετρο και εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από την ποιότητα του διαλύματος τροφοδοσίας. Μεγαλύτερη ροή συνεπάγεται μεγαλύτερη καταπόνηση της μεμβράνης και άρα ταχύτερη αστοχία αυτής. Συνεπώς, όσο χαμηλότερη η ποιότητα του ρευστού εισόδου τόσο χαμηλότερη πρέπει να είναι και η ροή (Gaublomme et al., 2020).

Ο υπολογισμός του ρυθμού ροής του διηθήματος, Q_p (m³/h), γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση (5):

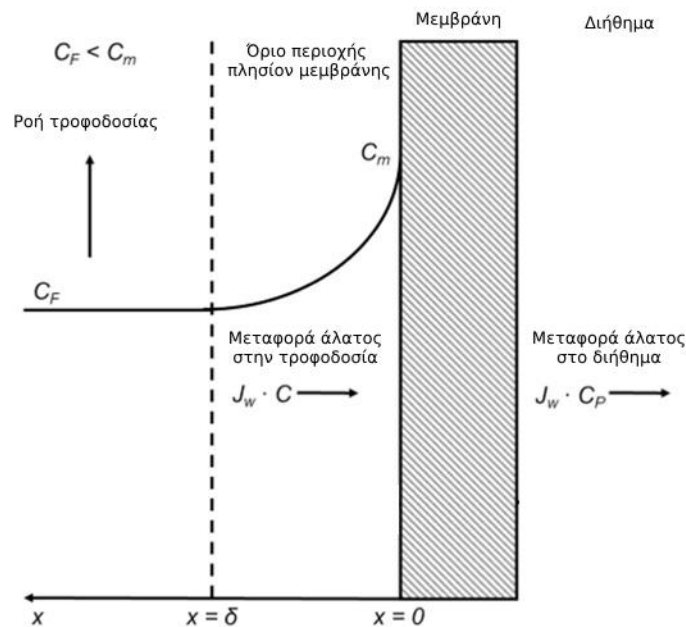
$$Q_p = J_w \cdot A \quad (5)$$

3.2.3 Πόλωση συγκέντρωσης

Η πόλωση συγκέντρωσης είναι ένα φαινόμενο που λαμβάνει χώρα κοντά στην επιφάνεια της μεμβράνης, όπου η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας είναι υψηλότερη σε σχέση με αυτήν στο διάλυμα τροφοδοσίας (Song, 1995). Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η αύξηση της συγκέντρωσης των στοιχείων που κατακρατούνται πλησίον της μεμβράνης. Συνεπώς, η πόλωση συγκέντρωσης οδηγεί στη μείωση της ροής του διαλύματος τροφοδοσίας διαμέσου της μεμβράνης, στην οποία η συγκέντρωση κατακρατημένων ουσιών είναι αυξημένη. Το φαινόμενο αυτό περιγράφεται στην Εικόνα 7. Η σχέση που περιγράφει την πόλωση συγκέντρωσης είναι η εξής (Saleh and Gupta, 2016):

$$\frac{(C_{m,j}-C_{p,j})}{(C_{f,j}-C_{p,j})} = e^{\frac{J_w}{k_j}} \quad (6)$$

Όπου k_j είναι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας του ιόντος j (m/h).



Εικόνα 7. Πόλωση συγκέντρωσης κατά την προσπάθεια διέλευσης του διαλύματος μέσω της μεμβράνης.

3.2.4 Ανάκτηση νερού

Με τον όρο ανάκτηση νερού χαρακτηρίζεται το ποσοστό του όγκου του διαλύματος τροφοδοσίας που διαπερνά την μεμβράνη αποτελώντας το διήθημα (Qasim et al., 2019). Αυτό σημαίνει ότι αντιπροσωπεύει το κλάσμα του διαλύματος τροφοδοσίας που διαπερνά τη μεμβράνη (Chen & Qin, 2019). Η ανάκτηση, R (%), υπολογίζεται ως εξής:

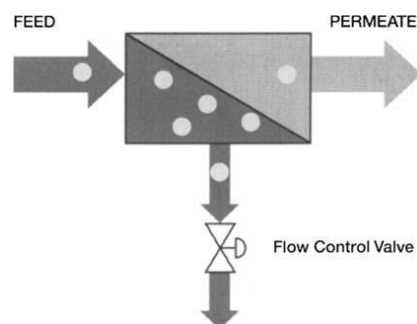
$$R = \frac{Q_p}{Q_f} * 100\% \quad (7)$$

Όπου:

- Q_p = ρυθμός ροής διηθήματος (m^3/h)
- Q_f = ρυθμός ροής διαλύματος τροφοδοσίας (m^3/h)

Το εύρος τιμών είναι συνήθως μεταξύ 50% και 85%. Ένα σύστημα με 85% ανάκτηση μεταφράζεται ως εξής: Στα 100 gpm (gallons per minute) διαλύματος τροφοδοσίας, τα 85 gpm θα διαπεράσουν την μεμβράνη και θα είναι το “καθαρό” διάλυμα, ενώ τα 15 gpm θα κατακρατηθούν από την μεμβράνη ως συμπύκνωμα. Με την έννοια της ανάκτησης μπορεί να συσχετιστεί ο βαθμός συμπύκνωσης. Για 50%, 75% και 80% ανάκτηση, ο βαθμός συμπύκνωσης ισούται με 2, 4 και 5, αντίστοιχα. Θεωρείται ότι η μεμβράνη κατακρατάει όλες τις διαλυμένες ουσίες. Βαθμός συμπύκνωσης ίσος με 4 σημαίνει ότι μετά το τέλος της αντίστροφης ώσμωσης, το συμπύκνωμα θα έχει όγκο ίσο με το $\frac{1}{4}$ του αρχικού όγκου του διαλύματος στην τροφοδοσία.

Όσο μεγαλύτερη είναι η ανάκτηση, τόσο λιγότερο άλας απορρίπτεται και συνεπώς τόσο χαμηλότερης ποιότητας θα είναι και το διήθημα. Αυτό εξηγείται με το ακόλουθο παράδειγμα. Έστω ότι η ανάκτηση είναι στο 50%, ο βαθμός συμπίεσης στο διάλυμα της εισόδου θα είναι 2 και συνεπώς η συγκέντρωση του θα είναι 200 ppm. Μετά την διήθηση από την ίδια μεμβράνη η συγκέντρωση των ρύπων θα είναι $0.02 \cdot 200 \text{ ppm} = 4 \text{ ppm}$. Στην πράξη, η ανάκτηση καθορίζεται από την βάννα ελέγχου ροής (Εικόνα 8). Όσο περισσότερο κλείνει, τόσο μεγαλώνει και η πίεση, με αποτέλεσμα περισσότερο νερό να διαπερνά την μεμβράνη και άρα να αυξάνεται και η τιμή της ανάκτησης.



Εικόνα 8. Σύστημα RO με βάννα ελέγχου ροής.

Η τιμή της ανάκτησης πρέπει να καθορίζεται κατά την σχεδίαση της αντίστροφης ώσμωσης, ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη μεμβράνη στην οποία θα υπάρχει ισορροπία μεταξύ του ρυθμού ροής του συμπυκνώματος και της ποιότητας του διηθήματος. Υψηλή τιμή ανάκτησης οδηγεί μεν σε μικρότερο ρυθμό ροής του συμπυκνώματος, παράγοντας όμως νερό χαμηλότερης ποιότητας.

Μεγαλύτερη ανάκτηση από την τιμή που θα οριστεί κατά την διαδικασία σχεδιασμού, οδηγεί σε αστοχία ή/και καταστροφή της μεμβράνης, ενώ μια μικρότερη τιμή έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες τιμές όγκου του συμπυκνώματος που απορρίπτεται (Kucera, 2010; Qasim et al., 2019).

3.2.5 Απόρριψη διαλυμένης ουσίας

Με τον όρο απόρριψη διαλυμένης ουσίας ή άλατος περιγράφεται το ποσοστό των διαλυμένων ουσιών που κατακρατείται από την μεμβράνη. Για παράδειγμα, μια μεμβράνη με βαθμό απόρριψης πυριτίου 98% οδηγεί στην παραγωγή διηθήματος με 2% διαλυμένες ουσίες. Η απόρριψη αλατότητας (SR) υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (8) (Qasim et al., 2019).

$$SR = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) * 100\% \quad (8)$$

Όπου:

- C_f = η συγκέντρωση του διαλύματος τροφοδοσίας σε συγκεκριμένο συστατικό (mg/L)
- C_p = η συγκέντρωση του διηθήματος σε συγκεκριμένο συστατικό (mg/L)

Η συγκεκριμένη παράμετρος χρησιμοποιείται προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση μίας μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης (Alsarayreh et al., 2020a).

Η διέλευση άλατος (SP) είναι το ακριβώς αντίθετο από την απόρριψη αλατότητας και αντιπροσωπεύει το ποσοστό που διαπερνά την μεμβράνη (Qasim et al., 2019).

$$SP = 100\% - SR \quad (9)$$

Συνήθως η απόρριψη καθορίζεται από την ποιότητα του διαλύματος εισόδου και την μεμβράνη. Η απόρριψη συγκεκριμένων στοιχείων καθορίζεται από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Ιοντικό φορτίο: Τα πολυμερή ιόντα κατακρατούνται ευκολότερα από τα μονομερή.
- Βαθμός διάστασης: Όσο μεγαλύτερος ο βαθμός διάστασης, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόρριψη. Για παράδειγμα, τα ασθενή οξέα απορρίπτονται πιο εύκολα σε υψηλό pH.
- Μοριακό βάρος: Όσο μεγαλύτερο το μοριακό βάρος, τόσο μεγαλύτερη η απόρριψη.
- Πόλωση: Όσο μεγαλύτερη η πόλωση τόσο μικρότερη η απόρριψη.

Η απόρριψη των αερίων είναι μηδενική. Αυτό συνεπάγεται ότι η συγκέντρωση των αέριων ρύπων θα είναι ίδια τόσο στο διάλυμα εισόδου όσο και στο διήθημα και στο απορριπτέο συμπύκνωμα. Στα συστήματα αντίστροφης ώσμωσης που λειτουργούν σε ουδέτερο pH εντοπίζεται διοξείδιο του άνθρακα. Μιας και τα αέρια δεν κατακρατούνται από τις μεμβράνες, μια συνήθης πρακτική είναι η προσθήκη καυστικής σόδας (NaOH) στην ροή τροφοδοσίας. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται το pH και το διοξείδιο του άνθρακα μετατρέπεται σε διττανθρακικό οξύ (HCO_3^-), το οποίο είναι δυνατό να κατακρατηθεί από την μεμβράνη (Kucera, 2010).

3.2.6 Ποιότητα τροφοδοσίας

Η ποιότητα του θαλασσινού νερού είναι πολύ σημαντική για την μοντελοποίηση του συστήματος αντίστροφης ώσμωσης. Στον πίνακα που ακολουθεί καταγράφεται η ποιότητα του θαλασσινού νερού σύμφωνα με επιστημονικές δημοσιευμένες μελέτες, οι οποίες έχουν ερευνήσει την αφαλάτωσή του μέσω της αντίστροφης ώσμωσης.

Τα πιο συνηθισμένα κατιόντα είναι το ασβέστιο, μαγνήσιο, νάτριο, κάλιο, ενώ στα ανιόντα συμπεριλαμβάνονται το ανθρακικό οξύ, χλώριο, θειικά ιόντα και νιτρικά ιόντα. Τα ολικά διαλυμένα στερεά περιλαμβάνουν τα ανόργανα άλατα και την οργανική ύλη που υπάρχει στο διάλυμα τροφοδοσίας (WHO 2003; Altaee, Alanezi and Hawari, 2018).

Πίνακας 4. Παράμετροι ποιότητας θαλασσινού νερού

Παράμετρος ποιότητας / Πηγή	(Al-Kaabi et al., 2021)	(Ruiz- García, Nuez and Khayet, 2023)	(Leparc et al., 2007)	(Sadhvani, Veza and Santana, 2005)	(Ludwig, 2022)	(Kim and Hong, 2023)	(Alsarayreh et al., 2020b)	(Ortega Méndez et al., 2012)	(Oh et al., 2009)	(Quist- Jensen et al., 2016)
pH	8.04-8.36		8.07		8.10-8.30	7.96-8.08	8.24	6.40		
Νάτριο (mg/L)	12920- 18810	9900	10945	11415	11067- 15012	13120- 13948	12549	23730.4	10800	10800
Χλώριο (mg/L)	21410- 31940	17377	20900	20800	19866- 27105	25879- 26588	22918	38340	19439	19400
Ασβέστιο (mg/L)	252.7-519.7	429.67	441	450	423.2-580.0	505-561	485.0	67.2	411.0	
Μαγνήσιο (mg/L)	1574-2358	1342.85	1371	1520	1316-1800	1773-2021	1649	35.1	1290	1290
Ενώσεις θείου (mg/L)	2947-4606	2653.45	2965	3110	2781-3631	2545-2776	3220	179.5	2701	2708
Διττανθρακικά (mg/L)		169.6	161	250	107.5-200.0	149-156	153.0	11.3	145.0	
Σίλικα (mg/L)		44.5	0.2	5		0.2	1.4	<1.0	2.9	
Κάλιο (mg/L)	24.7-236.4	320	410	450	409.1-600.0	467-579	464.0	29.1		392.0
Στρόντιο (mg/L)							5.32			8.10
Βάριο (mg/L)							0.010			0.021
Βρώμιο (mg/L)					69.0-84.8		78.29			
Νιτρικό ανιόν (mg/L)			0.2		2.3-0.3		1.3	85.7		
Θερμοκρασία (°C)	18-22				25		25			
Ολικός οργανικός άνθρακας (mg/L)	0.38-3.00		0.65			1.57-2.7	3.00			
Φθόριο (mg/L)			1.55			1.55				
Φωσφορικά (mg/L)			0.2			0.2				

4.

Μοντελοποίηση της αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με αντίστροφη ώσμωση

Παραδοχές μοντέλου

Μαθηματικές εξισώσεις μοντέλου

Ενεργειακές απαιτήσεις

Κεφάλαιο 4 – Μοντελοποίηση της αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με αντίστροφη ώσμωση

Τα τελευταία χρόνια η διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης εφαρμόζεται ευρέως για την αφαλάτωση θαλασσινού και υφάλμυρου νερού με σκοπό την παραγωγή φρέσκου νερού για διάφορους σκοπούς, όπως ως πόσιμο νερό, για γεωργικές καλλιέργειες είτε για βιομηχανικές χρήσεις (Al-Obaidi et al., 2018a). Συνήθως η απόρριψη αλάτων φτάνει έως και 99%, ενώ η ανάκτηση νερού μπορεί να φτάσει έως και 40%. Ωστόσο, είναι απαραίτητη η διερεύνηση της διεργασίας ως προς την απόδοση, την κατανάλωση ενέργειας και την απομάκρυνση των ιόντων από το θαλασσινό νερό (Al-Obaidi et al., 2019; Chen & Qin, 2019). Για αυτό το λόγο, επιχειρείται η μοντελοποίηση ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης με στόχο την πρόβλεψη της απόδοσής του, δηλαδή της ποιότητας του διηθήματος και του συμπυκνώματος και των ενεργειακών απαιτήσεων. Το μοντέλο διαλύματος-διάχυσης (solution-diffusion) είναι ευρέως διαδεδομένο για την πρόβλεψη της απόδοσης μιας μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης (Wijmans and Baker, 1995).

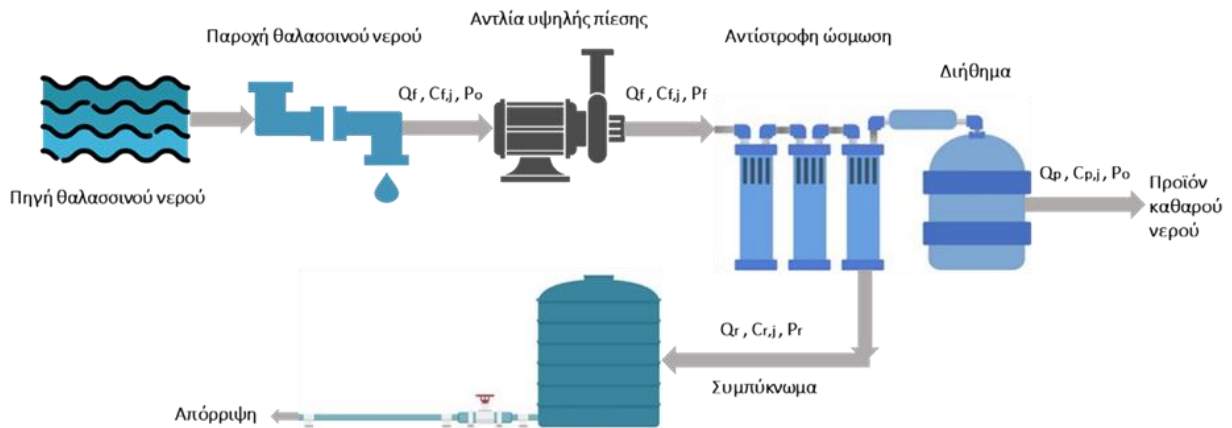
Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται και αναλύονται όλες οι παραδοχές, οι μαθηματικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν και η συλλογιστική πορεία που ακολουθήθηκε για τη μοντελοποίηση του συστήματος αντίστροφης ώσμωσης με βάση το μοντέλο διαλύματος-διάχυσης.

4.1 Παραδοχές μοντέλου

Η μοντελοποίηση του συστήματος απαιτεί να γίνουν συγκεκριμένες παραδοχές. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι:

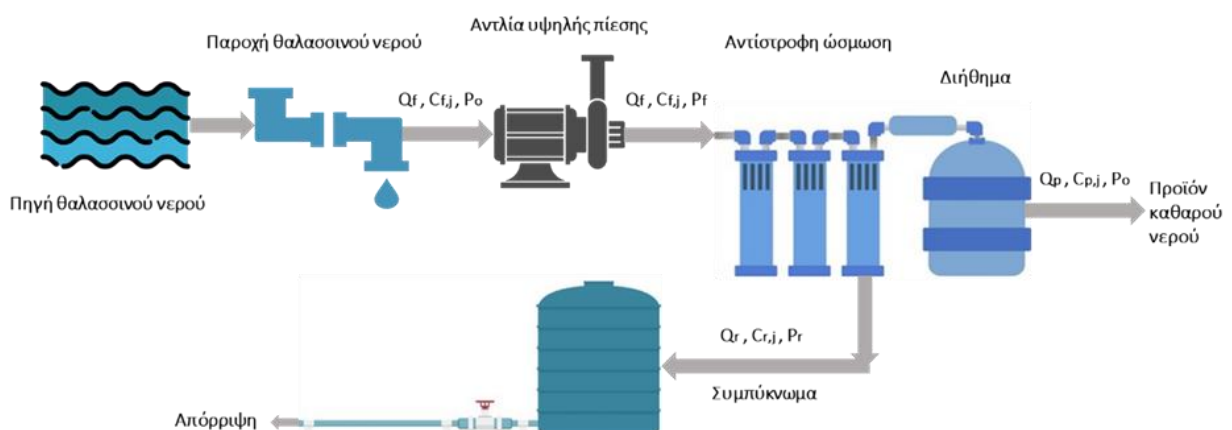
- Η μεμβράνη θεωρείται επίπεδη και μη πορώδης.
- Η διεργασία βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.
- Η μεταφορά των διαλυμένων ουσιών είναι ανεξάρτητη από τη μεταφορά του διαλύτη.
- Η διαδικασία είναι ισόθερμη. Η θερμοκρασία λειτουργίας επιλέγεται να είναι οι 25°C.
- Ο ρυθμός ροής στην σπειροειδή κατεύθυνση στην τροφοδοσία είναι αμελητέος (μονοδιάστατο μοντέλο).
- Η διαχυτότητα μιας διαλυμένης ουσίας θεωρείται ότι είναι ανεξάρτητη από την συγκέντρωση του διαλύματος και της πίεσης.
- Η πτώση πίεσης στην πλευρά του διηθήματος είναι αμελητέα και η πίεση σε αυτήν την πλευρά θεωρείται ατμοσφαιρική.
- Το διάλυμα θεωρείται ιδανικό, επομένως οι συντελεστές ενεργότητας δεν λαμβάνονται υπόψη.
- Θεωρείται μια γραμμική σχέση μεταξύ ωσμωτικής πίεσης και συγκέντρωσης (Oh et al., 2009; Gaublomme et al., 2020; Kucera, 2010).

Μια σχηματική αναπαράσταση του συστήματος αντίστροφης ώσμωσης παρουσιάζεται στην



Εικόνα 9. Όπως φαίνεται, το θαλασσινό νερό διοχετεύεται και αναγκάζεται να περάσει μέσω της μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης μέσω αντλίας υψηλής πίεσης, της οποίας η πίεση κυμαίνεται μεταξύ 55-82 bar. Το μεγαλύτερο μέρος των διαλυμένων ουσιών αναμένεται να κατακρατηθεί από την μεμβράνη και να απορριφθεί, δηλαδή να καταλήξει στο συμπύκνωμα. Το διήθημα αναμένεται να έχει χαμηλή συγκέντρωση σε διαλυμένα στερεά, ενώ το συμπύκνωμα θα περιέχει όλα τα απορριφθέντα άλατα (Kondili, 2012).

Όσον αφορά στην άσκηση πίεσης στο σύστημα, η αντλία υψηλής πίεσης εξασφαλίζει την παροχή του ρεύματος τροφοδοσίας στη μεμβράνη με υψηλή πίεση, P_f (bar), ορίζοντάς την ως πίεση τροφοδοσίας. Το διήθημα εξέρχεται από την μεμβράνη σε σχεδόν ατμοσφαιρική πίεση, P_p (bar), ενώ το συμπύκνωμα εξέρχεται με πίεση P_r (bar), η τιμή της οποίας θα είναι της ίδιας τάξης με την πίεση τροφοδοσίας (Aumesquet-Carreto et al., 2022).



Εικόνα 9. Σχηματική αναπαράσταση μιας μονάδας αντίστροφης ώσμωσης

Ακολουθεί η καταγραφή των μαθηματικών εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση του συστήματος αντίστροφης ώσμωσης για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού.

4.2 Μαθηματικές εξισώσεις του μοντέλου

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, το ρεύμα τροφοδοσίας που εισέρχεται στη μεμβράνη χωρίζεται σε δύο επιμέρους ρεύματα, στο ρεύμα του διηθήματος και του συμπυκνώματος. Σε όλες τις εξισώσεις, η τροφοδοσία θα συμβολίζεται ως “f”, το διήθημα ως “p” και το συμπύκνωμα ως “r”. Τα ισοζύγια μάζας βασίζονται στην αρχή διατήρησης της μάζας και οι εξισώσεις που τα περιγράφουν είναι οι εξισώσεις (10) και (11) (Kucera, 2010).

Ολικό ισοζύγιο μάζας:

$$Q_f = Q_r + Q_p \quad (10)$$

Ισοζύγιο μάζας συγκεκριμένης διαλυμένης ουσίας j:

$$Q_f C_{f,j} = Q_r C_{r,j} + Q_p C_{p,j} \quad (11)$$

Όπου:

- Q_f = ρυθμός ροής τροφοδοσίας (m^3/h)
- Q_r = ρυθμός ροής συμπυκνώματος (m^3/h)
- Q_p = ρυθμός ροής διηθήματος (m^3/h)
- $C_{f,j}$ = συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας στην τροφοδοσία (mg/L)
- $C_{r,j}$ = συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας στο συμπύκνωμα (mg/L)
- $C_{p,j}$ = συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας στο διήθημα (mg/L)

Η συγκέντρωση του διαλύματος τροφοδοσίας και ο ρυθμός ροής τροφοδοσίας ορίζονται με βάση το θαλασσινό νερό που πρόκειται να επεξεργαστεί και έχοντας υπόψη τις τεχνικές προδιαγραφές για τη μεμβράνη.

Όσον αφορά στον ρυθμό ροής των δύο ρευμάτων εξόδου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (12) για να υπολογιστεί ο ρυθμός ροής του διηθήματος ως εξής:

$$Q_p = J_w \cdot A \quad (12)$$

Όπου J_w (m/h) είναι η ροή του διαλύτη, δηλαδή του θαλασσινού νερού, και A (m^2) η επιφάνεια της μεμβράνης (Chen & Qin, 2019). Η ροή του διαλύτη ορίζεται ως η μάζα (ή όγκος) διηθήματος που διαπερνά την επιφάνεια της μεμβράνης σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (Fane, Tang and Wang, 2011) και ο υπολογισμός της γίνεται με βάση την εξίσωση (13).

$$J_w = P_m \cdot (\Delta P - \Delta \pi) \quad (13)$$

Η διαφορά πίεσης, ΔP (bar), υπολογίζεται από τη διαφορά της πίεσης στην πλευρά της τροφοδοσίας και του διηθήματος. Η διαφορά ωσμωτικής πίεσης υπολογίζεται από την εξίσωση 1, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.2.1. Ο συντελεστής διαπερατότητας νερού, P_m (m/h/bar), αναφέρεται στην διαχωριστική ικανότητα της μεμβράνης, η οποία ευθύνεται και για την κατακράτηση του άλατος, επιτρέποντας την διέλευση του καθαρού νερού (Fane, Tang and Wang, 2011). Θεωρήθηκε ότι ισούται με 0.001122 m/h/bar για το άλας NaCl και αυτή η τιμή χρησιμοποιήθηκε και για τα υπόλοιπα ιόντα του θαλασσινού νερού λαμβάνοντας υπόψη

βιβλιογραφικές πηγές, στις οποίες χρησιμοποιήθηκε η ίδια μεμβράνη αντίστροφης ώσμωσης με αυτήν που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία (Al-Obaidi et al., 2019).

Επιπλέον, πρέπει να προβλεφθούν οι συγκεντρώσεις των διαλυμένων ουσιών στο διήθημα και στο συμπύκνωμα. Για αυτό ορίζεται η ροή άλατος, J_s (g/m²/h), ως η μάζα (ή όγκος) άλατος που διαπερνά την επιφάνεια της μεμβράνης σε μια συγκεκριμένη χρονική διάρκεια, αποτελώντας το διήθημα (Fane, Tang and Wang, 2011). Ο υπολογισμός της γίνεται για κάθε ιόν ξεχωριστά, περιλαμβάνει τον συντελεστή διαπερατότητας άλατος, P_s (m/h), και πραγματοποιείται μέσω της σχέσης (14). Η τιμή του συντελεστή διαπερατότητας άλατος λαμβάνεται ίση με $6.297624 \cdot 10^{-5}$ m/h (Al-Obaidi et al., 2019). Συσχετίζεται με τον ρυθμό ροής του διαλύτη μέσω της σχέσης (15).

$$J_s = P_s \cdot (C_{m,j} - C_{p,j}) \quad (14)$$

$$J_s = J_w \cdot C_{p,j} \quad (15)$$

Συνεπώς συνδυάζοντας τις εξισώσεις (14) και (15), μπορεί να υπολογιστεί η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στο διήθημα ως εξής:

$$C_{p,j} = \frac{P_s \cdot C_{m,j}}{J_w + P_s} \quad (16)$$

Το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης εξηγήθηκε μέσω της εξίσωσης (6), η οποία μέσω της εξίσωσης (14) οδηγεί στον υπολογισμό της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας j κοντά στη μεμβράνη μέσω της εξίσωσης (17).

$$C_{m,j} = \frac{C_{f,j} \cdot e^{\frac{J_w}{k_j}} \cdot (J_w + P_s)}{J_w + P_s \cdot e^{\frac{J_w}{k_j}}} \quad (17)$$

Όπου k_j είναι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας του κάθε ιόντος και υπολογίζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης (Hadadian et al., 2021):

$$k_j = \frac{Sh \cdot D_s}{d_h} \quad (18)$$

Όπου Sh είναι ο αριθμός Sherwood, D_s η διαχυτότητα ιόντος (m²/h) και d_h η υδραυλική διάμετρος (m). Η αδιάστατη τιμή Sherwood υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (19).

$$Sh = 0.065 \cdot Re^{0.875} \cdot Sc^{0.25} \quad (19)$$

Όπου Re είναι ο αριθμός Reynolds και Sc ο αριθμός Schmidt. Ο υπολογισμός των αδιάστατων αριθμών Reynolds και Schmidt γίνεται μέσω των σχέσεων (20) και (21), αντίστοιχα.

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d_h}{\mu} \quad (20)$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho \cdot D_s} \quad (21)$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του διαλύματος τροφοδοσίας (kg/m³), μ το ιξώδες του διαλύματος τροφοδοσίας (kg/m/h) και u η ταχύτητα διασταυρούμενης ροής (m/h). Η πυκνότητα και το ιξώδες του διαλύματος τροφοδοσίας λαμβάνεται ίση με 997 kg/m³ και 3.29148 kg/m/h,

αντίστοιχα. Η υδραυλική διάμετρος και η ταχύτητα διασταυρούμενης ροής υπολογίζονται μέσω των εξισώσεων (22) και (23), αντίστοιχα (Sayyad, Kamthe and Sarvade, 2022):

$$d_h = \frac{4 \cdot \varepsilon}{\frac{2}{h} + (1-\varepsilon) \cdot \frac{4}{d_f}} \quad (22)$$

$$u = \frac{Q_f}{b \cdot h \cdot \varepsilon \cdot n} \quad (23)$$

Όπου ε είναι το πορώδες, h το ύψος καναλιού διαχωριστικού τροφοδοσίας (m), d_f το πάχος νήματος (m), b το πάχος του περιβλήματος (m) και n ο αριθμός των περιβλημάτων σε μία μονάδα. Προκειμένου να γίνουν οι παραπάνω υπολογισμοί, πρέπει να βρεθεί το πορώδες (εξ. (24)) που εξαρτάται από τις σχέσεις (25) και (26).

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{sp}}{V_{total}} \quad (24)$$

$$V_{sp} = 0.5 \cdot \pi \cdot d_f^2 \cdot l_m \quad (25)$$

$$V_{total} = l_m^2 \cdot \sin\theta \quad (26)$$

Όπου V_{sp} ο όγκος διαχωριστικού στην τροφοδοσία (m^3), V_{total} ο συνολικός όγκος καναλιού τροφοδοσίας (m^3), l_m το μήκος ανοίγματος (m) και θ η γωνία διαχωριστικού ($^\circ$).

Υπάρχουν πολλά υλικά μεμβρανών με τις δύο σημαντικότερες να είναι οι μεμβράνες οξικής κυτταρίνης και οι πολυαμιδικές (Wes Byrne, 1995). Ο συντελεστής διαπερατότητας νερού εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από το υλικό της μεμβράνης και το πάχος. Για μεμβράνες από οξική κυτταρίνη η σταθερά κυμαίνεται στο εύρος 10^{-4} - $5 \cdot 10^{-4}$ $kg/m^2/s/atm$. Από την άλλη μεριά, ο συντελεστής διαπερατότητας άλατος κυμαίνεται στο εύρος 10^{-7} - $6 \cdot 10^{-7}$ m/s (Wang et al., 2011).

Στην παρούσα διπλωματική επιλέγεται η χρήση της μεμβράνης TM820M-400 από την Toray, διότι είναι κατάλληλη για χρήση με θαλασσινό νερό, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζει υψηλά επίπεδα απόρριψης άλατος. Ανήκει στην κατηγορία των πολυαμιδικών μεμβρανών, λεπτού φιλμ με σπειροειδής πλέξη. Τα χαρακτηριστικά της παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (Sayyad, Kamthe and Sarvade, 2022).

Πίνακας 5. Τεχνικά χαρακτηριστικά και διαστάσεις μεμβράνης TM820M-400 από την Toray (<https://pureaqua.com/content/pdf/toray-tm820m-400-membrane.pdf>)

Τεχνικά χαρακτηριστικά και διαστάσεις	Τιμή
Προμηθευτής	Toray membrane
Υλικό και διάταξη μεμβράνης	Σύνθετο στοιχείο σπειροειδούς περιέλιξης λεπτού φιλμ πολυαμιδίου
Ονομαστική επιφάνεια μεμβράνης (m^2)	37.2
Απόρριψη αλατότητας (%)	99.8
Ελάχιστη απόρριψη αλατότητας (%)	99.5
Μέγιστος ρυθμός ροής τροφοδοσίας (m^3/h)	19.2
Ελάχιστος ρυθμός ροής τροφοδοσίας (m^3/h)	3.6
Ρυθμός ροής διηθήματος (m^3/h)	1.10
Ελάχιστος ρυθμός ροής διηθήματος (m^3/h)	0.88
Μέγιστη πίεση τροφοδοσίας (bar)	83

Μέγιστη θερμοκρασία διαλύματος τροφοδοσίας (°C)	45
Εύρος pH	2-11
Μήκος (m)	1.016

Η παγκόσμια σταθερά των αερίων είναι 8.315 J/mol/K (Perry's Chemical Engineers' Handbook, 2008). Τέλος, η απόδοση της μεμβράνης μπορεί να αξιολογηθεί με βάση την απόρριψη των διαλυμένων ουσιών από το θαλασσινό νερό μέσω της εξίσωσης (8). Η ανάκτηση που συνδέει τον ρυθμό ροής τροφοδοσίας και διηθήματος δίνεται από την εξίσωση (7).

4.3 Ενεργειακές απαιτήσεις

Η αφαλάτωση θαλασσινού νερού με την αντίστροφη ώσμωση έχει βελτιστοποιηθεί σε σημαντικό βαθμό από τη δεκαετία του 1970 έως σήμερα σχετικά με την ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος. Ενδεικτικά, η κατανάλωση ενέργειας ισούταν με 20 kWh/m³ το 1970, ενώ πλέον έχει μειωθεί έως και τις 2 kWh/m³ με 50% ανάκτηση (Mazlan et al., 2016).

Στις μέρες μας, οι μονάδες αντίστροφης ώσμωσης καταναλώνουν περισσότερο από 200 εκατομμύρια kWh κάθε μέρα παγκοσμίως. Η πλειοψηφία απαιτεί περίπου 3 - 10 kWh για να παραχθεί 1 m³ γλυκού νερού. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας δαπανάται για την αύξηση της πίεσης, ώστε να περάσει ο διαλύτης από την ημιπερατή μεμβράνη (Shalaby et al., 2022).

Ο υπολογισμός των ενεργειακών απαιτήσεων ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης είναι σημαντικός, καθώς με αυτόν τον τρόπο μπορεί να επιλεγεί ο οικονομικότερος τρόπος ενεργειακού εφοδιασμού. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας, SEC (kWh/m³), είναι η πιο σημαντική παράμετρος, ώστε να χαρακτηριστεί η απόδοση μιας μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης. Εξαρτάται από την διαφορά πίεσης, τον ρυθμό ροής του διαλύματος τροφοδοσίας, τον χρόνο διήθησης και την απόδοση της αντλίας (Al-Obaidi et al., 2023; Sayyad et al., 2022). Υπολογίζεται ως εξής:

$$SEC = \frac{\Delta P \cdot 10^5 \cdot Q_f \cdot \text{time}}{\varepsilon_p \cdot 10^3 \cdot 3600} \quad (27)$$

Η ανάκτηση νερού δίνεται από την εξίσωση (7), γνωρίζοντας τον ρυθμό ροής τροφοδοσίας και διηθήματος. Η απόδοση της αντλίας υψηλής πίεσης (ε_p) θεωρήθηκε ίση με 0.85 (Al-Obaidi et al., 2019). Οι συνήθεις αντλίες που χρησιμοποιούνται για ρυθμούς ροής τροφοδοσίας μικρότερες των 180 m³/h ονομάζονται αντλίες παλινδρόμησης, οι οποίες έχουν απόδοση μεγαλύτερη από 85% και για αυτό επιλέγονται για εφαρμογές σε μονάδες αφαλάτωσης μέσω αντίστροφης ώσμωσης (Ye et al., 2009). Διατηρώντας την πίεση λειτουργίας του συστήματος σταθερή, παραμένει σταθερή η κατανάλωση ενέργειας. Όσο υψηλότερη η ανάκτηση, τόσο μεγαλύτερη η ειδική κατανάλωση ενέργειας, διότι απαιτείται υψηλότερη πίεση λειτουργίας του συστήματος (Al-Obaidi et al., 2023). Οι Karimanzira et al. (2020) χρησιμοποιούν την παρακάτω σχέση για να υπολογίσουν την απαιτούμενη ισχύς της αντλίας W_p (kW):

$$W_p = Q_f \cdot SEC \quad (28)$$

Η ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια που πρέπει να προσφερθεί στο σύστημα είναι εκείνη με την οποία η διαφορά πίεσης υπερβαίνει την ωσμωτική πίεση. Μόνο με αυτόν τον τρόπο ο διαχωρισμός διαλύματος-διαλυμένης ουσίας είναι εφικτός (Wang et al., 2021). Μέσω της αφαλάτωσης είναι εφικτή η παραγωγή νερού για βιομηχανικές και γεωργικές χρήσεις, καθώς και ως πόσιμο νερό (Kavitha et al., 2019). Η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή 1 m³ καθαρού νερού από την αφαλάτωση θαλασσινού νερού κυμαίνεται στο εύρος των 2.58 - 8.50 kWh/m³, καταναλώνοντας συνολικά το 0.4% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρισμού (Tan et al., 2022). Ωστόσο, το υψηλό κόστος για την παραγωγή καθαρού νερού καθιστά αναγκαία την εύρεση λύσεων για τη μείωσή του (Tan et al., 2022). Συνεπώς, η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αξίζει να διερευνηθεί για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων χωρίς να καταναλώνονται ορυκτά καύσιμα.

5.

Αφαλάτωση θαλασσινού νερού με αντίστροφη ώσμωση και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Εισαγωγικά στοιχεία

Χρήση αιολικής ενέργειας

Χρήση ηλιακής ενέργειας

Κεφάλαιο 5 – Αφαλάτωση θαλασσινού νερού με αντίστροφη ώσμωση και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

5.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Η λειψυδρία σε πολλές περιοχές του κόσμου και η παγκόσμια δημογραφική ανάπτυξη καθιστούν την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού μια αποτελεσματική λύση για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης για γλυκό νερό. Ταυτόχρονα, η επιτακτική ανάγκη για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έχει ωθήσει στην αναζήτηση πιο βιώσιμων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας (Guarino et al., 2023). Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει επιστημονικές μελέτες σχετικά με τη χρήση ΑΠΕ, όπως η αιολική, η γεωθερμική και η ηλιακή ενέργεια, και την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των συστημάτων αντίστροφης ώσμωσης (Filippini et al., 2019).

Ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ορίζονται οι φυσικές και ανεξάντλητες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένου της αιολικής, της ηλιακής και της υδροηλεκτρικής. Συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, στη διαφοροποίηση του ενεργειακού εφοδιασμού και στην αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο (www.europarl.europa.eu). Όσον αφορά στα φωτοβολταϊκά, η χρήση τους έχει σημαντικά πλεονεκτήματα, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία (Filippini et al., 2019). Συνεπώς, τα φωτοβολταϊκά κυριαρχούν (Filippini et al., 2019).

Τα φωτοβολταϊκά και τα αιολικά συστήματα αποτελούν τις πιο συνήθεις λύσεις παροχής πράσινης ενέργειας σε μονάδες αντίστροφης ώσμωσης, αφού δεν εκπέμπουν ρύπους κατά την λειτουργία τους όντας φιλικές προς το περιβάλλον (Leijon et al., 2020; Rahimi et al., 2021a). Ωστόσο, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη τα ακραία καιρικά φαινόμενα και η μεταβλητότητα της διαθέσιμης ενέργειας από ΑΠΕ (Shalaby et al., 2022). Συνήθως συνδυάζονται ΑΠΕ με κάποια παράλληλη σύνδεση σε τοπικό δίκτυο ή για μικρές μονάδες με κάποια μηχανή ορυκτού καυσίμου (γεννήτρια).

Μια έρευνα που έγινε σε μικρής κλίμακας μονάδων αντίστροφης ώσμωσης οδήγησε στην εκτίμηση κόστους της εφαρμογής α) ανεμογεννητριών-δικτύου, β) φωτοβολταϊκών-δικτύου, γ) δικτύου, καταλήγοντας ότι το κόστος παραγωγής νερού ανέρχεται σε 1.8 €/m³, 1.9 €/m³ και 1.3 €/m³, αντίστοιχα (Rashidi et al., 2022). Από οικονομικής πλευράς, μια έρευνα που έγινε συγκρίνοντας διαφορετικές μονάδες αφαλάτωσης στο Aguba, ένα νησί της Καραϊβικής, ενεργειακά τροφοδοτούμενες από α) δίκτυο, β) ανεμογεννήτριες και γ) φωτοβολταϊκά, κατέληξε στο ότι ο άνεμος και έπειτα η ηλιακή ενέργεια είναι οι λιγότερο κοστοβόρες πηγές ενέργειας.

5.2 Χρήση αιολικής ενέργειας

Η αιολική ενέργεια αποτελεί ιδανική επιλογή για την παροχή ενέργειας σε μονάδες αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωσης, ειδικά σε περιοχές με αρκετά υψηλό αιολικό δυναμικό. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα τόσο της αιολικής όσο και της ηλιακής ενέργειας είναι

ότι μπορούν να παρέχουν ενέργεια σε μονάδες αφαλάτωσης που βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές χωρίς ή με δύσκολη πρόσβαση στο δίκτυο ρεύματος. Ο άνεμος δημιουργείται από την διαφορά ατμοσφαιρικής πίεσης η οποία οφείλεται στην ηλιακή ενέργεια. Αυτή οφείλεται για την ανομοιόμορφη θέρμανση του πλανήτη φαινόμενο το οποίο με την σειρά του δημιουργεί διαφορά πίεσης. Τα θερμότερα σημεία έχουν χαμηλότερη πίεση και τα ψυχρότερα μεγαλύτερη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ώθηση μορίων αέρα από τα ψυχρά στα θερμά. Η κίνηση αυτή των μορίων του αέρα ονομάζεται άνεμος. Η μετατροπή της ηλιακής σε κινητική ενέργεια λαμβάνει χώρα στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, περίπου 12 km μακριά από την επιφάνεια της θάλασσας. Μάλιστα, με την εικασία ότι μόνο το 1% αυτής της κινητικής ενέργειας φτάνει εν τέλει στα κατώτερα στρώματα, το παγκόσμιο αιολικό δυναμικό φτάνει την τιμή των 10 TW, η οποία είναι ικανή να καλύψει πλήρως όλες τις ενεργειακές απαιτήσεις.

Ωστόσο, είναι απαραίτητη η λήψη μέτρων και κατάλληλων μετατροπών στη μονάδα λόγω της ασυνεχούς παροχής ενέργειας από ΑΠΕ και της μεταβλητότητας των περιβαλλοντικών συνθηκών (Dehmas et al., 2011).

5.2.1 Περιγραφή ανεμογεννήτριας

Μια ανεμογεννήτρια μετατρέπει την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική χρησιμοποιώντας την αεροδυναμική δύναμη από τα πτερύγια του ρότορα, τα οποία λειτουργούν και μοιάζουν όπως αυτά ενός αεροπλάνου ή ελικοπτέρου. Καθώς ο άνεμος ρέει κατά μήκος της λεπίδας, η πίεση του αέρα από τη μία πλευρά μειώνεται. Η διαφορά πίεσης στις δύο αυτές πλευρές είναι υπεύθυνη για την περιστροφή της λεπίδας και κατ' επέκταση του ρότορα. Τέλος, ο ρότορας συνδέεται με τη γεννήτρια με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι η απευθείας σύνδεση της τουρμπίνας με την γεννήτρια, ενώ ο δεύτερος απαιτεί την χρήση κιβωτίου ταχυτήτων και άξονα (μικρότερης κλίμακας εφαρμογές). Αυτή η μετατροπή της αεροδυναμικής δύναμης στην περιστροφή μιας γεννήτριας δημιουργεί ηλεκτρισμό (<https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work>).

5.2.2 Σύστημα ανεμογεννήτριας - αντίστροφης ώσμωσης (Wind – RO)

Ο σχεδιασμός ενός αιολικού πάρκου για την παροχή ενέργειας μιας μονάδας αντίστροφης ώσμωσης απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και ιδιαίτερη έμφαση σε παράγοντες όπως:

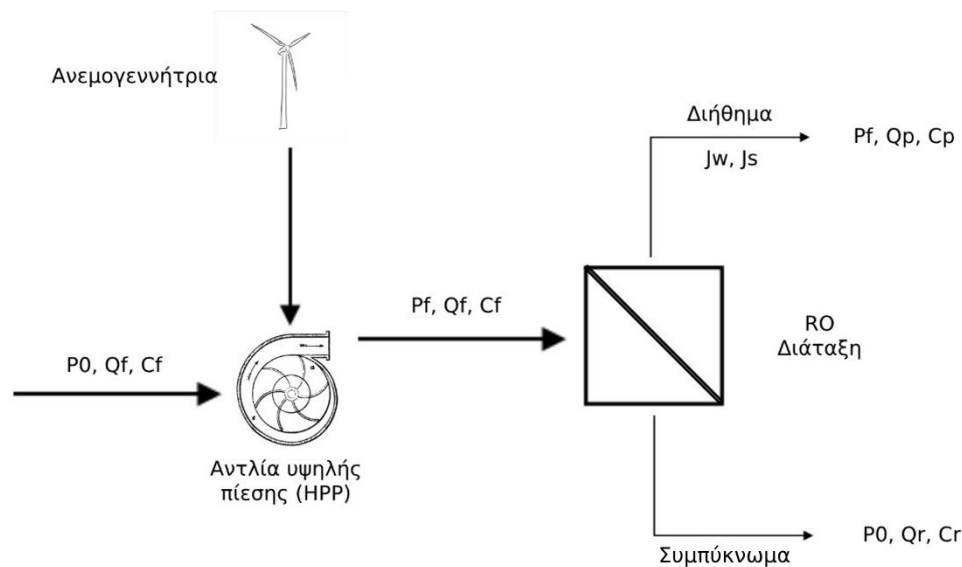
1. Ταχύτητα ανέμου

Αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς παραμέτρους για την μελέτη και ανάπτυξη αιολικών συστημάτων με στόχο την παραγωγής ενέργειας. Περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό αποτελούν εξαιρετική επιλογή για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών και αιολικών πάρκων, αρκεί οι ταχύτητες ανέμου να είναι εντός των ορίων που ορίζει ο κατασκευαστής για την εκάστοτε ανεμογεννήτρια.

2. Γεωγραφική κλίση

Είναι σημαντική παράμετρος που καθορίζει και την ποσότητα ισχύος που εξάγεται από την τουρμπίνη. Όσο μεγαλύτερη η γεωγραφική κλίση τόσο πιο υψηλό το κόστος της εγκατάστασης.

3. Απόσταση από κατοικημένες περιοχές
Ηχορύπανση από τις τουρμπίνες και οι αλλαγές στο μικρόκλιμα εξαιτίας της μεταβολής ροής αέρα είναι μερικοί παράγοντες που αποτρέπουν την εγκατάσταση ανεμογεννητριών κοντά σε κατοικημένες περιοχές.
4. Απόσταση από θάλασσες, ποτάμια και λίμνες
Εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής και της απρόβλεπτης συμπεριφοράς του καιρού, οι πλημμύρες αποτελούν μεγάλη απειλή για τις αιολικές εγκαταστάσεις πλησίον υδροβιότοπων.
5. Απόσταση από αεροδρόμια
Η λειτουργία των ανεμογεννητριών πλησίον αεροδρομίων εμποδίζει την ορθή λειτουργεί των ραντάρ που χρησιμοποιούνται κατά κόρων στους αεροδιαδρόμους.
6. Απόσταση από προστατευόμενες περιοχές
Οπτική όχληση και αλλοίωση της φυσική χλωρίδας και πανίδας της περιοχής (Razeghi et al., 2023).



Εικόνα 10. Σχηματική απεικόνιση μονάδας αντίστροφης ώσμωσης ενεργειακά τροφοδοτούμενη από ανεμογεννήτρια.

Για να είναι η αιολική ενέργεια μια αξιόπιστη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, απαιτείται η πρόβλεψη της παραγόμενης ισχύος, P (W). Αυτή υπολογίζεται μέσω του τύπου (Karimanzira, 2020; Sohoni et al., 2016):

$$P = N_R \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_w \cdot C_p \cdot u^3 \quad (29)$$

Όπου:

- ρ =Πυκνότητα αέρα (kg/m^3)
- A_w =Εμβαδόν κάλυψης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας (m^2)
- C_p =Συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας (ίδιο με απόδοση ανεμογεννήτριας)
- u =Ταχύτητα ανέμου (m/s)
- N_R =Αριθμός ανεμογεννητριών

Όσον αφορά στην ταχύτητα u του ανέμου, υπάρχουν δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη υπάρχουν ετήσιες ωριαίες μετρήσεις ενώ στην δεύτερη χρησιμοποιείται κάποια δεδομένη κατανομή πυκνότητας πιθανότητας. Τέλος, ο λόγος της διαθέσιμης προς την τεχνικά εκμεταλλεύσιμη ισχύ ονομάζεται συντελεστής ισχύος C_p και εξαρτάται από τον εκάστοτε εξοπλισμό και τύπο ανεμογεννήτριας. Ο συντελεστής αυτός δεν μπορεί να ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο, που ονομάζεται Betz, και συνεπώς η μέγιστη τιμή είναι $C_p=0.5926$ (Δ. Ασημακόπουλος et al., 2023).

5.3 Χρήση ηλιακής ενέργειας

Η χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων αποτελεί μια πιο περιβαλλοντικά φιλική επιλογή σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα. Η λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Τα φωτόνια προσπίπτουν και ionίζουν μια ημι-αγώγιμη επιφάνεια κάνοντας τα εξωτερικά ηλεκτρόνια να απελευθερωθούν από τους ατομικούς τους δεσμούς. Εξαιτίας της δομής του ημι-αγώγιμου υλικού, τα ηλεκτρόνια ωθούνται προς μια κατεύθυνση δημιουργώντας έτσι μια ροή ηλεκτρικού ρεύματος.

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών δεν μπορεί να ξεπεράσει το 30%. Το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε θερμική, η οποία παραμένει στα φωτοβολταϊκά πλαίσια με αποτέλεσμα να αυξάνεται κατά πολύ η θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους (Gao, Zhang and Hua, 2023). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία χρησιμοποιούνται ευρέως για τη λειτουργία συστημάτων αφαλάτωσης (Kabeel & Abdelgaied, 2019).

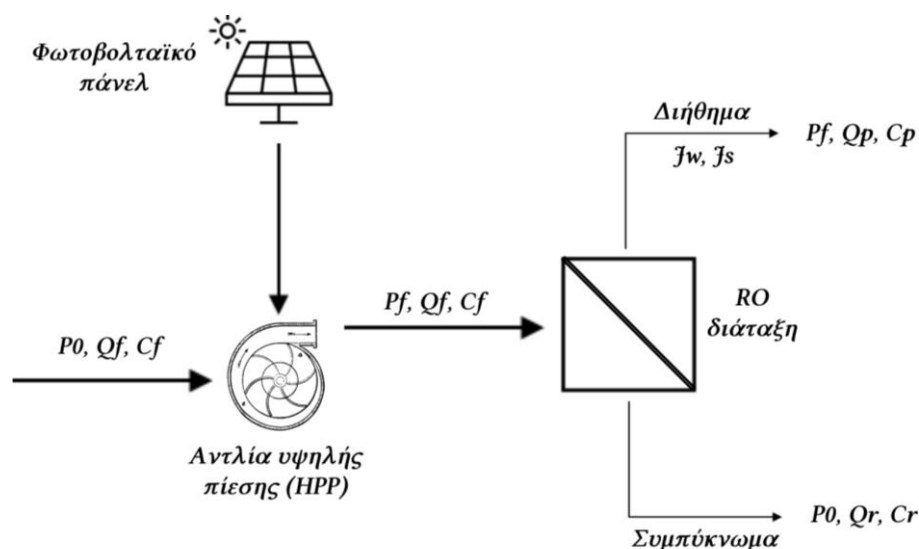
5.3.1 Περιγραφή φωτοβολταϊκού

Οι Φ/Β επιφάνειες όπως αναφέρθηκε μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μικρότερη Φ/Β μονάδα ονομάζεται κυψέλη και είναι ικανή να παράξει 1-2 Watt. Οι κυψέλες κατασκευάζονται από διάφορα ημιαγώγιμα υλικά τα οποία συνήθως είναι μικρότερα σε πάχος από μια ανθρώπινη τρίχα. Για να προστατευθούν από τα διάφορα καιρικά φαινόμενα στα οποία θα εκτεθούν κατά την διάρκεια της ζωής τους, χρησιμοποιούνται συνδυασμοί γυαλιού και πλαστικού σαν εξωτερικό κάλυμμα. Ο συνδυασμός πολλών κυψελών μαζί δημιουργεί τα πάνελ, τα οποία και αυτά με την σειρά τους αν συνδεθούν μεταξύ τους δημιουργούν συστοιχίες. Ο κύριος λόγος που γίνονται οι παραπάνω συνδεσμολογίες είναι για να αυξηθεί η παραγόμενη ισχύς και να μπορούν να καλύψουν μικρές και μεγάλες ηλεκτρικές απαιτήσεις. Τέλος, σε ένα Φ/Β σύστημα πέρα από τις συστοιχίες υπάρχει και εξοπλισμός όπως βάσεις στήριξης των πάνελ και συσκευές εναλλαγής συνεχούς ρεύματος (DC) σε εναλλασσόμενο (AC)

για να μπορέσει να αξιοποιηθεί από τα νοικοκυριά (<https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>).

5.3.2 Σύστημα φωτοβολταϊκού - αντίστροφης ώσμωσης (PV – RO)

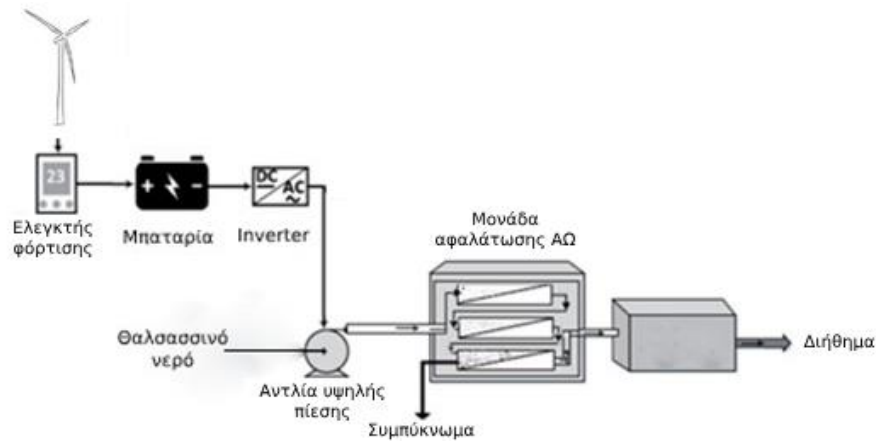
Στην παρούσα διπλωματική εργασία ως μοναδική μέθοδος τροφοδοσίας και παραγωγής ενέργειας έχουν επιλεγθεί τα φωτοβολταϊκά πάνελ, αφού αποτελούν και την συνηθέστερη πράσινη επιλογή ενέργειας σε συστήματα RO (Leijon et al., 2020). Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η ίδια διάταξη RO με πηγή τροφοδοσίας το Φ/Β πάνελ.



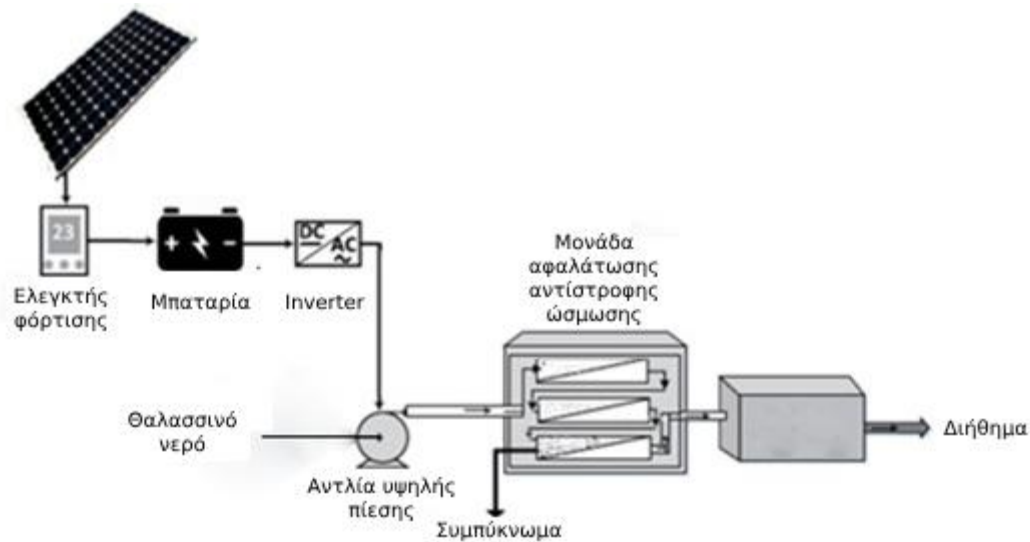
Εικόνα 11. Διάταξη αντίστροφης ώσμωσης με πηγή ενέργειας τη χρήση φωτοβολταϊκού

Είναι σύνηθες, σε πολλές εφαρμογές, όπως ακριβώς συναντάται και στα papers που παρουσιάζονται στον πίνακα 7, να χρησιμοποιούνται συσκευές όπως μπαταρίες, μετατροπέας και ελεγκτές φόρτισης. Αυτό συμβαίνει τόσο για τα Φ/Β όσο και για τις ανεμογεννήτριες. Μερικά ενδεικτικά τέτοια συστήματα παρουσιάζεται στις Εικόνες 12 και 13.

Ο ελεγκτής φόρτισης είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο της στάθμης της μπαταρίας και την φόρτιση αυτής. Ελέγχοντας την τάση και την ένταση παρέχει ενέργεια στην μονάδα αφαλάτωσης ενώ αν υπάρχει περίσσεια προνοεί και την αποθηκεύει στην μπαταρία. Η μπαταρία με την σειρά της αποθηκεύει την περίσσεια ενέργεια ώστε να αξιοποιηθεί σε περιόδους που δεν υπάρχει επαρκής ηλιακή ενέργεια. Τέλος, ο μετατροπέας ή εναλλάκτης χρησιμοποιείται για την μετατροπή του συνεχόμενου ρεύματος σε εναλλασσόμενο, ώστε να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί από τις συσκευές της μονάδας αφαλάτωσης (Rahimi et al., 2021).



Εικόνα 12. Σύστημα αντίστροφης ώσμωσης, ενεργειακά τροφοδοτούμενο από ανεμογεννήτρια με παράλληλη χρήση μπαταρίας, μετατροπέα και ελεγκτή φόρτισης



Εικόνα 13. Σύστημα αντίστροφης ώσμωσης, ενεργειακά τροφοδοτούμενο από Φ/Β, με παράλληλη χρήση μπαταριών, μετατροπέα και ελεγκτή φόρτισης

Ο αριθμός των Φ/Β πάνελ που χρειάζονται για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης υπολογίζεται ως εξής (Rahimi et al., 2021):

$$N_{PV} = SEC \cdot \frac{Q_p}{\eta_r T_c A_{PV}} \cdot I \quad (30)$$

Όπου:

- I =Μέση ημερήσια ηλιοφάνεια ($\text{kWh/m}^2/\text{ημέρα}$)
- N_{PV} =Αριθμός Φ/Β πάνελ
- A_{PV} =Επιφάνεια Φ/Β (m^2)
- η_r =Ονομαστική απόδοση ηλιακών κυψελών (%)
- T_c =Συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας (%)

Ο συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας, T_c (%), υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης 31, ως εξής:

$$T_c = (1 - \beta \cdot (T_{cell} - 25)) \quad (31)$$

Όπου:

- β =Συντελεστής θερμοκρασίας της απόδοσης (%)
- T_{cell} =Θερμοκρασία φωτοβολταϊκού κελιού (K)

Τέλος, η θερμοκρασία του κελιού, T_{cell} (°C), υπολογίζεται ως εξής:

$$T_{cell} = T_{amb} + \left(\frac{9.5}{5.7+3.8V_w} \right) \cdot \left(G \cdot \frac{T_{NOCT}-20}{800} \right) \quad (32)$$

Όπου:

- G =Ροή ηλιακής ακτινοβολίας (W/m²)
- T_{NOCT} = Ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας κυψέλης (°C)
- T_{amb} =Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)
- V_w =ταχύτητα ανέμου (m/s)

Πίνακας 6. Τιμές βασικών παραμέτρων για την συνδεσμολογία ανεμογεννητριών με μονάδες αντίστροφης ώσμωσης

Παράμετρος / Πηγή	Dehmas et al. (2011)	Mito et al.(2023)	Peñate et al. (2011)		Carta and Cabrera (2021)			Rosales-Asensio et al. (2019)		Zejli et al. (2004)	Bognar et al. (2013)
Διάταξη	RO-WT	RO-WT	RO-WT		RO-Μπαταρία-WT			RO-WT	RO-WT	RO-WT-grid	RO-WT
Παροχή διηθήματος (m ³ /d)	5000	76.8	1x1000	2x400, 1x200	1000	1500	5000	5211	5671	1200	200–600
Αλατότητα (mg/L)	-	35000	38170		-	-	-	13027		-	-
Επιφάνεια ανεμογεννήτριας (m ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SEC (kWh/m ³)	-	2.34	1.93	1.99	-	-	-	-	-	5	4.3
Ισχύς ανεμογεννήτριας (kW)	200 (5 τουρμπίνες)	30	100, 225, 300		-	-	-	660		770	275
Κόστος νερού (\$/m ³)	-	-	-		2.23, 2.41	2.59, 2.80	3.77, 4.70	0.86	0.84	1.5	2.06
Διάρκεια ζωής (έτη)	25	-	-		25			20		20	-

Πίνακας 7. Τιμές βασικών παραμέτρων για την συνδεσμολογία Φ/Β με μονάδες αντίστροφης ώσμωσης

Παράμετρος / Πηγή	Monjezi et al. (2020)	Alsheghri et al. (2015)	Rahimi et al. (2021)	Thomson & Infield (n.d.)	Scrivani (2005)	Mohamed et al. (2008)	Ajiwiguna et al. (2021)
Διάταξη	PV-RO	PV-RO	PV-grid-RO	PV-RO	PV-Diesel-RO	PV-RO	PV-RO
Παροχή διηθήματος (m ³ /d)	5	200	1000	3	67.68	0.35	1,000
Αλατότητα (mg/L)	29157	48761	45000	-	-	-	-
Επιφάνεια φωτοβολταϊκού (m ²)	18.1-19.3	5.038	-	-	-	-	-
SEC (kWh/m ³)	4.15-4.27	6.99	5.5	-	4.86	4.6	2.4
Ισχύς φωτοβολταϊκού (kW)	-	720	-	2.4	125	0.846	2379
Κόστος νερού (\$/m ³)	-	0.825	1.10-1.11	2.44	-	7.8	2.69
Διάρκεια ζωής (έτη)	-	30	25	20	-	-	25

6.

Ανάλυση και προσομοίωση του μαθηματικού μοντέλου

Περιβάλλον προσομοίωσης – PSM Tool

Ανάλυση βημάτων προσομοίωσης

Κεφάλαιο 6 – Ανάλυση και προσομοίωση του μαθηματικού μοντέλου

6.1 Περιβάλλον προσομοίωσης – Process Simulation and Modelling (PSM) Tool

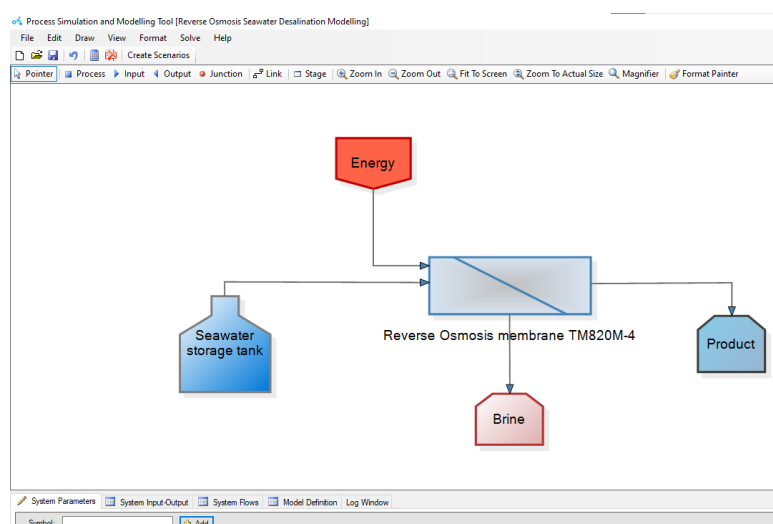
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσομοίωση του μαθηματικού μοντέλου που αναπτύχθηκε στο 3^ο κεφάλαιο χρησιμοποιώντας το εργαλείο Process Simulation and Modelling (PSM), το οποίο έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια ερευνητικού ευρωπαϊκού προγράμματος. Η γλώσσα προγραμματισμού του PSM είναι Visual Basic και C#. Πρέπει να σημειωθεί πως η προσομοίωση του συστήματος στο PSM επιτρέπει τη δυναμική μοντελοποίηση, καθώς είναι εφικτή η αλλαγή των παραμέτρων της διεργασίας και η αξιολόγηση της απόδοσής του.

6.2 Ανάλυση βημάτων προσομοίωσης

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα της προσομοίωσης και αναλύεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον προσομοίωσης του PSM.

Βήμα 1^ο: Αρχικά, διατυπώνεται το πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί, δηλαδή η πρόβλεψη της απόδοσης ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού. Συνεπώς, η ποιότητα του διηθήματος και του συμπυκνώματος, καθώς και οι ενεργειακές απαιτήσεις για τη λειτουργία του συστήματος πρέπει να εκτιμηθούν.

Βήμα 2^ο: Στη συνέχεια, πρέπει να καθοριστούν τα όρια του συστήματος που πρόκειται να μελετηθεί και να κατασκευαστεί το διάγραμμα ροής στο PSM, όπως φαίνεται στην Εικόνα 14. Επιπλέον, σε αυτό το βήμα ορίζεται η παράμετρος της ενέργειας που θα πρέπει να τροφοδοτηθεί στο σύστημα.

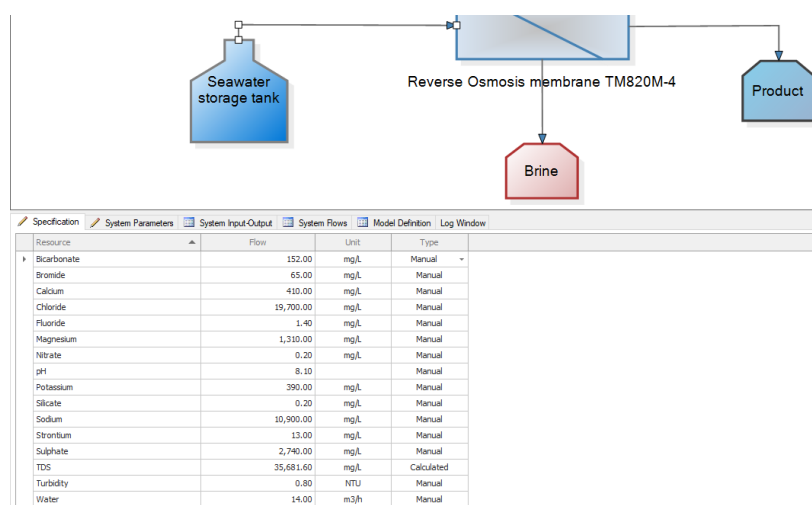


Εικόνα 14. Διάγραμμα ροής του συστήματος αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με αντίστροφη ώσμωση στο περιβάλλον προσομοίωσης PSM Tool

Βήμα 3^ο: Ο τύπος της μεμβράνης επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψη τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του θαλασσινού νερού. Όπως προαναφέρθηκε, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η μεμβράνη TM820M-400¹, η οποία έχει κατασκευαστεί για να επεξεργάζεται θαλασσινό νερό και αναφέρεται ότι η απόρριψη αλατότητας φτάνει έως και 99.8%. Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται όλα τα χαρακτηριστικά της.

Βήμα 4^ο: Καθορίζονται οι διαλυμένες ουσίες που συναντώνται σε θαλασσινό νερό και η συγκέντρωσή τους στο διάλυμα τροφοδοσίας. Η ποιότητα νερού τροφοδοσίας καθορίστηκε επίσης μέσω βιβλιογραφικής έρευνας (Πίνακας 4).

Βήμα 5^ο: Επιλέγεται ο ρυθμός ροής της τροφοδοσίας.



Εικόνα 15. Σύσταση θαλασσινού νερού και ρυθμός ροής ως διάλυμα τροφοδοσίας

Βήμα 6^ο: Σε αυτό το σημείο ορίζονται όλες οι παράμετροι της διεργασίας που αναλύθηκαν στα κεφάλαια 3 και 4, είτε η τιμή τους είναι γνωστή είτε άγνωστη, δηλαδή να απαιτείται η επίλυση εξισώσεων για τον υπολογισμό της. Όπως φαίνεται, ορίζεται στο PSM οι μονάδες μέτρησης και μία σύντομη περιγραφή για κάθε παράμετρο.

¹ <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Toray-TM820M-400-Sea-Water-RO-Element-L.pdf>

Specification Process Parameters Node Input-Output System Parameters System Input-Output System Flows Model Definition					
Symbol:					
Symbol	Is Read...	Value	Unit	Description	Del
l	<input checked="" type="checkbox"/>	0.965	m	length of envelope	X
b	<input checked="" type="checkbox"/>	0.859	m	width of envelope	X
n	<input checked="" type="checkbox"/>	1	number	number of envelopes in 1 module	X
h	<input checked="" type="checkbox"/>	0.0007	m	Πάχος οπισσάτη τροφοδοσίας	X
df	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00034	m	Πάχος νήματος	X
lm	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00327	m	Μήκος πλέγματος	X
B	<input checked="" type="checkbox"/>	105	degrees	Γωνία οπισσάτη	X
Module_width	<input checked="" type="checkbox"/>	0.20066	m	Πλάτος μεμβράνης	X
Module_length	<input checked="" type="checkbox"/>	1.016	m	Μήκος μεμβράνης	X
motor_efficiency	<input checked="" type="checkbox"/>	0.5	number	Απόδοση μοτέρ	X
pump_efficiency	<input checked="" type="checkbox"/>	0.8	number	Απόδοση αντλίας	X
Ps	<input checked="" type="checkbox"/>	0.054	m/h	Διαπερατότητα άλατος - Salt permeability	X
Pm	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00182	m/h/bar	Συντελεστής διαπερατότητας νερού - Water permeability	X
i	<input checked="" type="checkbox"/>	1	αριθμός	Παράμετρος για ιόντα	X
T	<input checked="" type="checkbox"/>	296.98	K	Θερμοκρασία	X
R	<input checked="" type="checkbox"/>	0.0083145	J/mol/K	Παγκόσμιο σταθερά αερίων	X
μ	<input checked="" type="checkbox"/>	3.29148	kg/m/h	Δυναμικό ιξώδες του διαλύματος	X
ρ	<input checked="" type="checkbox"/>	997	kg/m3	Πυκνότητα του διαλύματος	X
A	<input checked="" type="checkbox"/>	40.9	m2	Επιφάνεια μεμβράνης	X
Tol	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00001	number	Ανοχή στην επαναληπτική μέθοδο	X
Recovery	<input checked="" type="checkbox"/>	0.8275	number	Ανάκτηση	X
Pp	<input checked="" type="checkbox"/>	3.05	bar	Πίεση διηθήματος	X
PF	<input checked="" type="checkbox"/>	8.54	bar	Πίεση τροφοδοσίας	X
MaxIter	<input checked="" type="checkbox"/>	100,000	number	Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων	X

Feed_Flux	<input type="checkbox"/>	0	L/m2/h	Ροή τροφοδοσίας	X
ε	<input type="checkbox"/>	0	number	Πορώδες	X
Vtotal	<input type="checkbox"/>	0	m	Όγκος καναλιού τροφοδοσίας	X
Module_volume	<input type="checkbox"/>	0	m3	Όγκος	X
Module_height	<input type="checkbox"/>	0	m	Ύψος μεμβράνης	X
SEC	<input type="checkbox"/>	0	kWh/m3	Ελάχιστη ειδική ενεργειακή κατανάλωση	X
Vsp	<input type="checkbox"/>	0	m3	Όγκος οπισσάτη στην τροφοδοσία	X
v	<input type="checkbox"/>	0	m/h	Ταχύτητα ροής	X
Re	<input type="checkbox"/>	0	number	Reynolds	X
dh	<input type="checkbox"/>	0	m	Υδραυλική διάμετρος	X
Δπ	<input type="checkbox"/>	0	bar	Διαφορά ωσμωτικής πίεσης	X
ΔP	<input type="checkbox"/>	0	bar	Διαφορά πίεσης	X
detention_time	<input type="checkbox"/>	0	h	Χρόνος παραμονής	X

Εικόνα 16. Εισαγωγή τιμών των παραμέτρων διεργασίας ως γνωστές (πάνω) και άγνωστες (κάτω)

Οι παράμετροι της διεργασίας που πρέπει να υπολογιστούν μέσω του μοντέλου που αναπτύχθηκε παρουσιάζονται στην κάτω πλευρά της Εικόνα 16. Αν δεν μπορεί να οριστεί μία συγκεκριμένη τιμή, τότε απενεργοποιείται η λειτουργία “Ready Only”, προκειμένου να υπολογιστεί από το μοντέλο. Σε αντίθετη περίπτωση, η λειτουργία αυτή ενεργοποιείται και ορίζεται συγκεκριμένη τιμή για την παράμετρο.

Βήμα 7ο: Έπειτα, ξεκινά η μετάφραση των μαθηματικών εξισώσεων του μοντέλου στο υπολογιστικό εργαλείο PSM. Ο κώδικας που δημιουργήθηκε παρουσιάζεται στο Παράρτημα.

Βήμα 8ο: Διατυπώνονται οι μαθηματικές εξισώσεις για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών της μεμβράνης, όπως ο όγκος, και παράμετροι, συμπεριλαμβανομένου της ταχύτητας ροής, του πορώδους και της υδραυλικής διαμέτρου.

Βήμα 9ο: Έπειτα προσδιορίζεται με βάση τη βιβλιογραφία η διαχυτότητα του κάθε ιόντος που συναντάται στο προς επεξεργασία διάλυμα τροφοδοσίας.

Βήμα 10°: Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει τον διαδοχικό υπολογισμό των αδιάστατων αριθμών Sc , Sh , Re . Στη συνέχεια, υπολογίζονται ο ρυθμός μεταφοράς μάζας κάθε ιόντος, η διαφορά πίεσης, ο ρυθμός ροής διηθήματος και συμπυκνώματος, καθώς και η ειδική κατανάλωση ενέργειας

Βήμα 11°: Προκειμένου να υπολογιστεί η συγκέντρωση των διαλυμένων ουσιών στο διήθημα και στο συμπύκνωμα είναι απαραίτητη η εύρεση της διαφοράς ωσμωτικής πίεσης. Για αυτό το λόγο, γίνεται μία αρχική εκτίμηση της διαφοράς ωσμωτικής πίεσης και ξεκινά η επαναληπτική μέθοδος.

Βήμα 12°: Με βάση την αρχική εκτίμηση της τιμής $\Delta\pi$, υπολογίζονται οι παράμετροι J_w , $C_{p,j}$ και $C_{m,j}$. Έπειτα, υπολογίζεται εκ νέου η παράμετρος $\Delta\pi$ σύμφωνα με την εξίσωση (1).

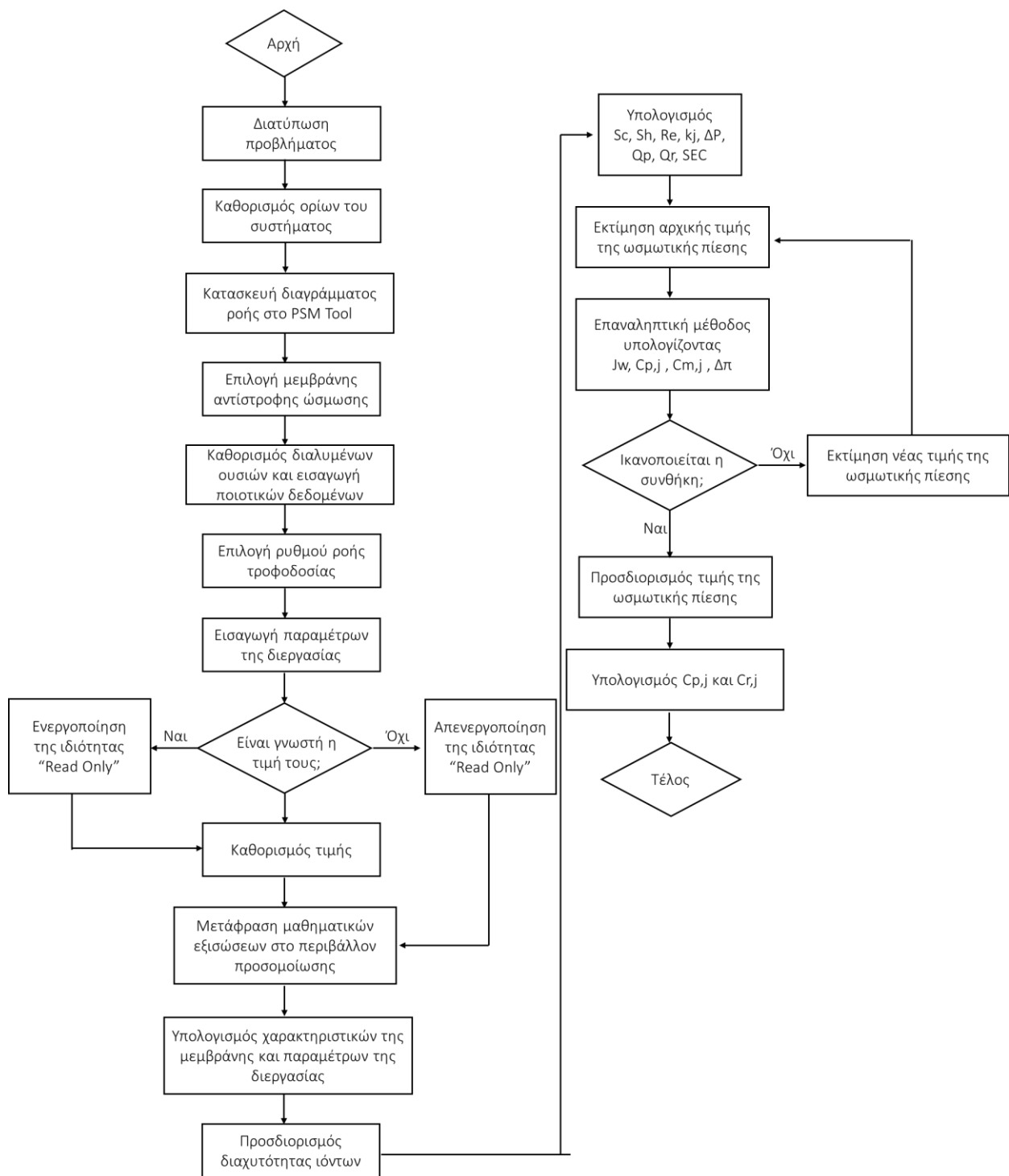
Βήμα 13°: Ελέγχεται αν η τιμή της $\Delta\pi$ που υπολογίστηκε στο 12° βήμα ικανοποιεί την συνθήκη (34):

$$\frac{\Delta\pi - \Delta\pi_{old}}{\Delta\pi} > Tol \quad (31)$$

Βήμα 14°: Στην περίπτωση που η συνθήκη ισχύει, ορίζεται ως η τιμή της $\Delta\pi$. Αν δεν ισχύει, η τιμή που υπολογίστηκε χρησιμοποιείται ως νέα αρχική εκτίμηση της $\Delta\pi$ και οι υπολογισμοί γίνονται εκ νέου, μέχρι να ικανοποιείται η συνθήκη (31).

Βήμα 15°: Στη συνέχεια, υπολογίζεται η συγκέντρωση κάθε διαλυμένης ουσίας στο διήθημα και μέσω ισοζυγίων μάζας στο συμπύκνωμα.

Η παρακάτω εικόνα περιγράφει τα στάδια της προσομοίωσης του μοντέλου ως διάγραμμα ροής.



Εικόνα 17. Διάγραμμα ροής των βημάτων της προσομοίωσης του μοντέλου στο PSM

7.

Αποτελέσματα

Προσομοίωση διεργασίας

Επίδραση παραμέτρων στην απόδοση της διεργασίας

Κεφάλαιο 7 – Αποτελέσματα

Η μοντελοποίηση και προσομοίωση της αντίστροφης ώσμωσης ως διεργασία αφαλάτωσης θαλασσινού νερού υλοποιήθηκε μέσω του εργαλείου Process Simulation and Modelling (PSM). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο. Όπως προαναφέρθηκε, καθορίστηκε η τυπική ποιοτική σύσταση του θαλασσινού νερού με βάση τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε, καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της επιλεχθείσας μεμβράνης TM820M-400, η οποία κρίθηκε κατάλληλη για τη συγκεκριμένη μέθοδο. Έχοντας αναφέρει και εξηγήσει αναλυτικά τις παραμέτρους της διεργασίας (κεφ. 3) και τις μαθηματικές εξισώσεις που απαιτούνται για την μοντελοποίηση της διεργασίας (κεφ. 4), παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθώς και τα αποτελέσματα της επίδρασης συγκεκριμένων παραμέτρων στην απόδοση της διεργασίας.

7.1. Προσομοίωση της διεργασίας

7.1.1. Ποιότητα νερού στο διήθημα και στο συμπύκνωμα

Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σχετικά με τις συγκεντρώσεις όλων των διαλυμένων συστατικών τόσο στο διάλυμα τροφοδοσίας όσο και στο διήθημα και συμπύκνωμα, οι οποίες προέκυψαν μέσω της χρήσης του εργαλείου PSM.

Πίνακας 8. Αποτελέσματα προσομοίωσης σχετικά με την ποιότητα νερού τροφοδοσίας, διηθήματος και συμπυκνώματος

Διαλυμένο συστατικό	Συγκέντρωση τροφοδοσίας (mg/L)	Συγκέντρωση διηθήματος (mg/L)	Συγκέντρωση συμπυκνώματος (mg/L)
Διττανθρακικά (HCO_3^-)	152.00	0.41	176.76
Βρώμιο (Br^-)	65.00	0.16	75.59
Ασβέστιο (Ca^{2+})	410.00	1.11	476.8
Χλώριο (Cl^-)	19700.00	49.98	22910.04
Φθόριο (F^-)	1.40	0.00	1.63
Μαγνήσιο (Mg^{2+})	1310.00	3.59	1523.41
Νιτρικό ανιόν (NO_3^-)	0.20	0.00	0.23
Κάλιο (K^+)	390.00	0.99	453.55
Διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2)	0.20	0.00	0.23
Νάτριο (Na^+)	10900.00	28.33	12676.00
Στρόντιο (Sr^{2+})	13.00	0.04	15.12
Θειικό ιόν (SO_4^{2-})	2740.00	7.24	3186.43
Ολικά διαλυμένα στερεά	35681.60	91.85	41495.79

Όπως παρατηρείται, το ιόν με τον μεγαλύτερο βαθμό απομάκρυνσης είναι το φθόριο, τα νιτρικά και διοξείδιο του πυριτίου, από 1.10, 0,20, 0,20 mg/L σε 0.00 mg/L. Άρα ο βαθμός απομάκρυνσης ισούται με 100%. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι πιθανόν λόγω της υψηλής απόρριψης αλατότητας της μεμβράνης και ταυτόχρονα λόγω της πολύ μικρής τιμής

συγκέντρωσης στην τροφοδοσία. Τον μικρότερο βαθμό απόρριψης τον έχει το στρόντιο με 99.69%, από 13 mg/L σε 0.04 mg/L. Παρατηρείται ότι η απόρριψη των διαλυμένων συστατικών ξεπερνάει το 99.70% και φτάνει έως και το 100%. Παρόμοια απόρριψη αλατότητας παρατηρήθηκε και από τους Al-Obaidi et al. (2018), οι οποίοι κατέγραψαν απόρριψη αλατότητας ίση με 95.4% με αρχική αλατότητα στο διάλυμα τροφοδοσίας ίση με 1098 mg/L.

Όσον αφορά το συμπύκνωμα, το ιόν που παρουσιάζει την μεγαλύτερη αύξηση είναι το φθόριο με 16.42%, από 1.40 mg/L σε 1.63 mg/L, ενώ το ελάχιστο είναι τα διττανθρακικά με 16.28%, από 152 mg/L σε 176.76 mg/L.

7.1.2. Ενεργειακές απαιτήσεις

Η προσομοίωση της διεργασίας αντίστροφης ώσμωσης στο εργαλείο PSM κατέληξε στο ότι η ενέργεια που απαιτείται για την επεξεργασία διαλύματος τροφοδοσίας με ρυθμό ροής 7 m³/h ανέρχεται σε 5.36 kWh. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι απαιτούνται συνολικά 1.53 kWh/m³.

7.1.3. Ρυθμός ροής διηθήματος και συμπυκνώματος

Ο ρυθμός ροής του διαλύματος τροφοδοσίας καθορίστηκε ίσος με 7 m³/h. Μέσω της προσομοίωσης της διεργασίας υπολογίστηκε ότι ο ρυθμός ροής του διηθήματος και του συμπυκνώματος είναι ίσος με 0.98 m³/h και 6.02 m³/h, αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι η ανάκτηση νερού που υπολογίζεται ως ρυθμός ροής διηθήματος προς τον ρυθμό ροής τροφοδοσίας, σύμφωνα με την εξ. 7, είναι 14 %. Σε παρόμοιο αποτέλεσμα κατέληξαν και οι (Aladwani et al., 2021), οι οποίοι υπολόγισαν ανάκτηση 22.34% με ρυθμό ροής τροφοδοσίας 108 m³/h και ρυθμό ροής διηθήματος 24.13 m³/h.

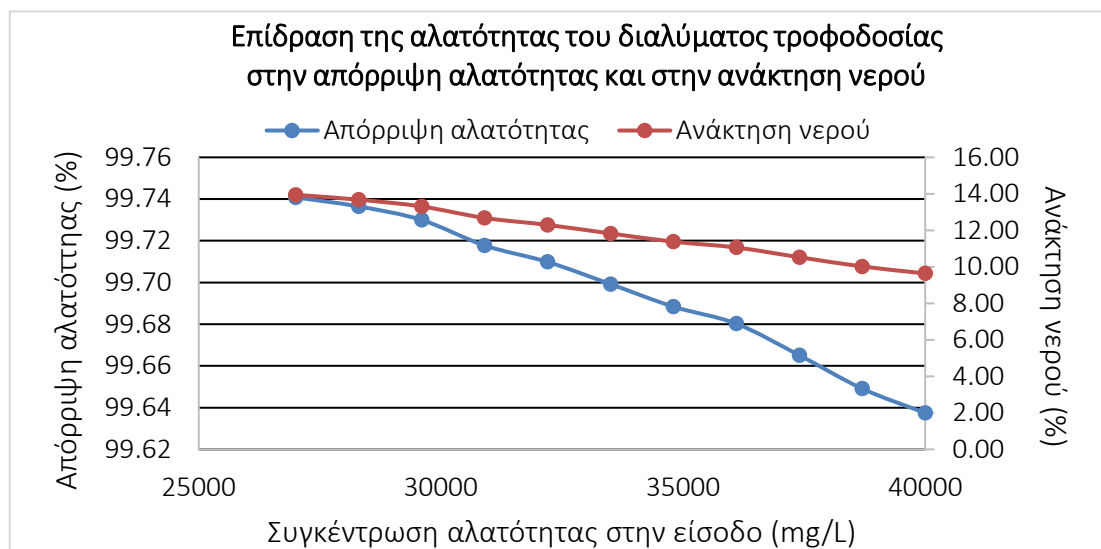
7.2 Επίδραση των παραμέτρων στην απόδοση της διεργασίας

7.2.1. Επίδραση της αλατότητας του διαλύματος τροφοδοσίας

Στο Διάγραμμα 1 παρουσιάζεται η επίδραση της αλατότητας του διαλύματος τροφοδοσίας στην απόρριψη αλατότητας και στην ανάκτηση νερού. Ως αλατότητα ορίζεται το άθροισμα των συγκεντρώσεων των ιόντων χλωρίου και νατρίου.

Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η αλατότητα στο διάλυμα τροφοδοσίας, τόσο μειώνονται η απόρριψη αλατότητας και η ανάκτηση νερού. Το εύρος συγκέντρωσης αλατότητας τροφοδοσίας που μελετήθηκε ήταν 25000-40000 mg/L. Παρατηρήθηκε ότι η απόρριψη αλατότητας μειώθηκε κατά 0.10%, από 99.74% σε 99.64%. Ο λόγος που παρουσιάστηκε μικρή μεταβολή στην απόρριψη αλατότητας αποδίδεται στο γεγονός του ότι η ωσμωτική πίεση αυξάνεται, με αποτέλεσμα να απαιτείται η αύξηση της πίεσης. Στην περίπτωση που αυξάνεται η συγκέντρωση της αλατότητας στο διάλυμα τροφοδοσίας χωρίς να μεταβάλλεται η πίεση, όπως συμβαίνει σε αυτήν την περίπτωση που μελετάται, ποσότητα των διαλυμένων συστατικών καταφέρει να διαπεράσει τη μεμβράνη και να καταλήξει στο διήθημα, μειώνοντας ελάχιστα την απόρριψη αλατότητας. Η μεμβράνη εξακολουθεί να

εμποδίζει τη διέλευση του μεγαλύτερου μέρους των διαλυμένων συστατικών ακόμη και σε υψηλές τιμές αλατότητας, αλλά κάποιο μέρος καταφέρνει να τη διαπεράσει. Παρόμοια συμπεριφορά κατέγραψαν και οι Chen & Qin (2019), όπου η αύξηση της συγκέντρωσης του διαλύματος τροφοδοσίας μείωσε κατά 1% την απόρριψη αλατότητας. Επιπλέον, η έρευνα των Aladwani et al. (2021) έδειξε ότι στο ίδιο εύρος συγκέντρωσης αλατότητας στην τροφοδοσία η απόρριψη αλατότητας μειώθηκε από 99.75% σε 99.65%. Μικρή μείωση στην απόρριψη της αλατότητας με την αύξηση της συγκέντρωσης στο διάλυμα τροφοδοσίας κατέγραψαν και οι (Abdulsalam Ebrahim et al., 2020).



Διάγραμμα 1. Επίδραση της αλατότητας του διαλύματος τροφοδοσίας στην απόρριψη αλατότητας και στην ανάκτηση νερού

Αντιθέτως, η αύξηση της αλατότητας στην τροφοδοσία φαίνεται να επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό την ανάκτηση νερού. Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της αλατότητας στην τροφοδοσία κατά 15000 mg/L οδήγησε σε μείωση της ανάκτησης νερού κατά 30.9%, από 13.9% σε 9.6%. Παρόμοια αποτελέσματα ανέφεραν και οι Aladwani et al. (2021), με τη μείωση να είναι από 33% σε σχεδόν 18% για παρόμοια συγκέντρωση αλατότητας στην τροφοδοσία. Η υψηλότερη αλατότητα στο διάλυμα τροφοδοσίας συνεπάγεται μεγαλύτερη ωσμωτική πίεση. Όσο αυξάνεται η ωσμωτική πίεση, μειώνεται η δύναμη που ωθεί το διάλυμα τροφοδοσίας να διέλθει της μεμβράνης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο ρυθμός ροής του διηθήματος, δηλαδή του διαλύματος που διαπερνά τη μεμβράνη, να είναι μικρότερος και συνεπώς να μειώνεται η ανάκτηση νερού (Aladwani et al., 2021).

Τα αποτελέσματα της απόρριψης αλατότητας και ανάκτησης νερού για τις διαφορετικές συγκεντρώσεις αλατότητας (νάτριο και χλώριο) στο διάλυμα τροφοδοσίας παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 9.

Πίνακας 9. Δεδομένα της αλατότητας τροφοδοσίας, ανάκτησης νερού και απόρριψης αλατότητας

Συγκέντρωση χλωρίου στο διάλυμα τροφοδοσίας (mg/L)	Συγκέντρωση νατρίου στο διάλυμα τροφοδοσίας (mg/L)	Ανάκτηση νερού (%)	Απόρριψη αλατότητας (%)
9500	17500	13.95	99.74
11860	16440	13.68	99.74
13790	15810	13.31	99.73
14600	16300	12.68	99.72
16470	15730	12.30	99.71
17930	15570	11.83	99.70
19500	15300	11.38	99.69
21640	14460	11.06	99.68
22800	14600	10.53	99.67
24050	14650	10.02	99.65
25900	14100	9.64	99.64

Στη συνέχεια εξετάστηκε η επίδραση της αλατότητας του διαλύματος τροφοδοσίας στη συγκέντρωση αλατότητας τόσο στο διήθημα όσο και στο συμπύκνωμα. Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται η συγκέντρωση της αλατότητας στο διάλυμα τροφοδοσίας, συμπυκνώματος και διηθήματος.

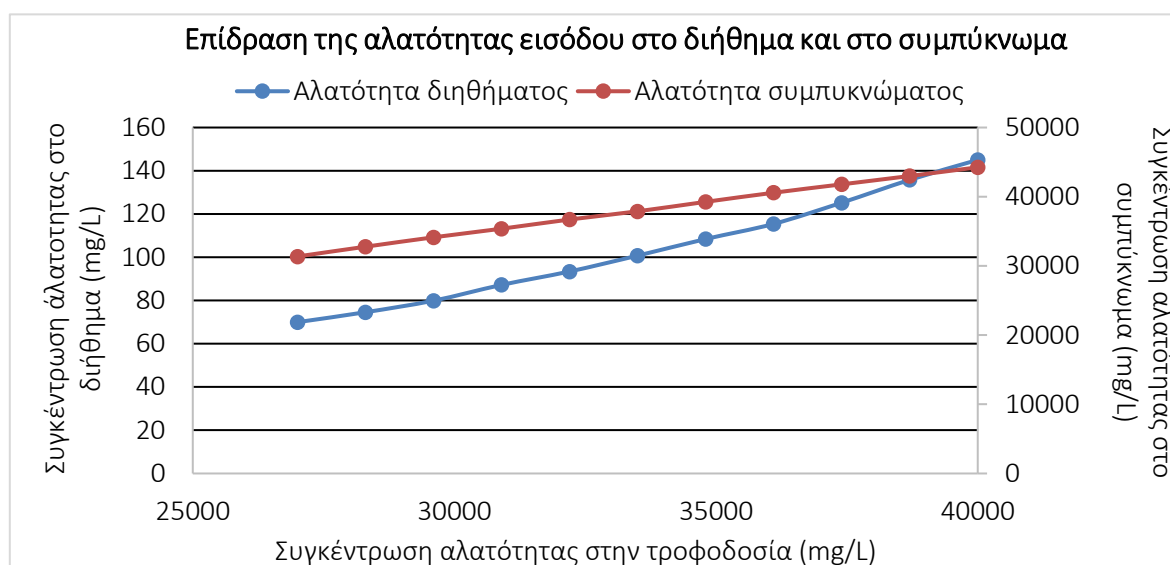
Πίνακας 10. Συγκέντρωση της αλατότητας στο διάλυμα τροφοδοσίας, συμπυκνώματος και διηθήματος

Αλατότητα στο διάλυμα τροφοδοσίας (mg/L)	Αλατότητα στο διάλυμα συμπυκνώματος (mg/L)	Αλατότητα στο διάλυμα διηθήματος (mg/L)
27000	31366.75	69.98
28300	32773.21	74.58
29600	34132.06	79.92
30900	35376.35	87.21
32200	36704.25	93.42
33500	37891.45	100.75
34800	39256.75	108.43
36100	40577.54	115.43
37400	41788.03	125.24
38700	42995.00	135.79
40000	44253.29	145.03

Στο Διάγραμμα 2 φαίνεται η επίδραση της μεταβολής της αλατότητας του διαλύματος τροφοδοσίας στην αλατότητα διηθήματος και συμπυκνώματος. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η αλατότητα του διαλύματος τροφοδοσίας, τόσο αυξάνεται και η αλατότητα στο διήθημα και στο συμπύκνωμα.

Αυτό συμβαίνει, γιατί η υψηλότερη αλατότητα στην τροφοδοσία συνεπάγεται με αυξημένη συγκέντρωση ιόντων πλησίον της μεμβράνης, δημιουργώντας το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης. Έτσι, αυξάνεται η ωσμωτική πίεση και η ροή του διαλύματος, γεγονός που

σημαίνει ότι περισσότερα διαλυμένα συστατικά καταλήγουν στο διήθημα και στο συμπύκνωμα (Aladwani et al., 2021). Στο εύρος συγκέντρωσης αλατότητας τροφοδοσίας που μελετήθηκε, 25000-40000 mg/L, παρατηρήθηκε αύξηση στην αλατότητα του διηθήματος κατά 51.74%, από τα 69.98 mg/L στα 148.03 mg/L, και αύξηση κατά 29.11% στην αλατότητα του συμπυκνώματος, από τα 31366 mg/L στα 44253 mg/L. Παρόμοια συμπεριφορά έχει καταγραφεί και στην έρευνα των Al-Obaidi et al. (2019). Οι Aladwani et al. (2021) αναφέρουν ότι η αύξηση της αλατότητας στο διάλυμα τροφοδοσίας στο εύρος 25000-45000 mg/L είναι ικανή να οδηγήσει σε αύξηση της αλατότητας στο διήθημα και στο συμπύκνωμα κατά 67% και 45%, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 2. Επίδραση της αλατότητας εισόδου στις συγκεντρώσεις αλατότητας διηθήματος και συμπυκνώματος

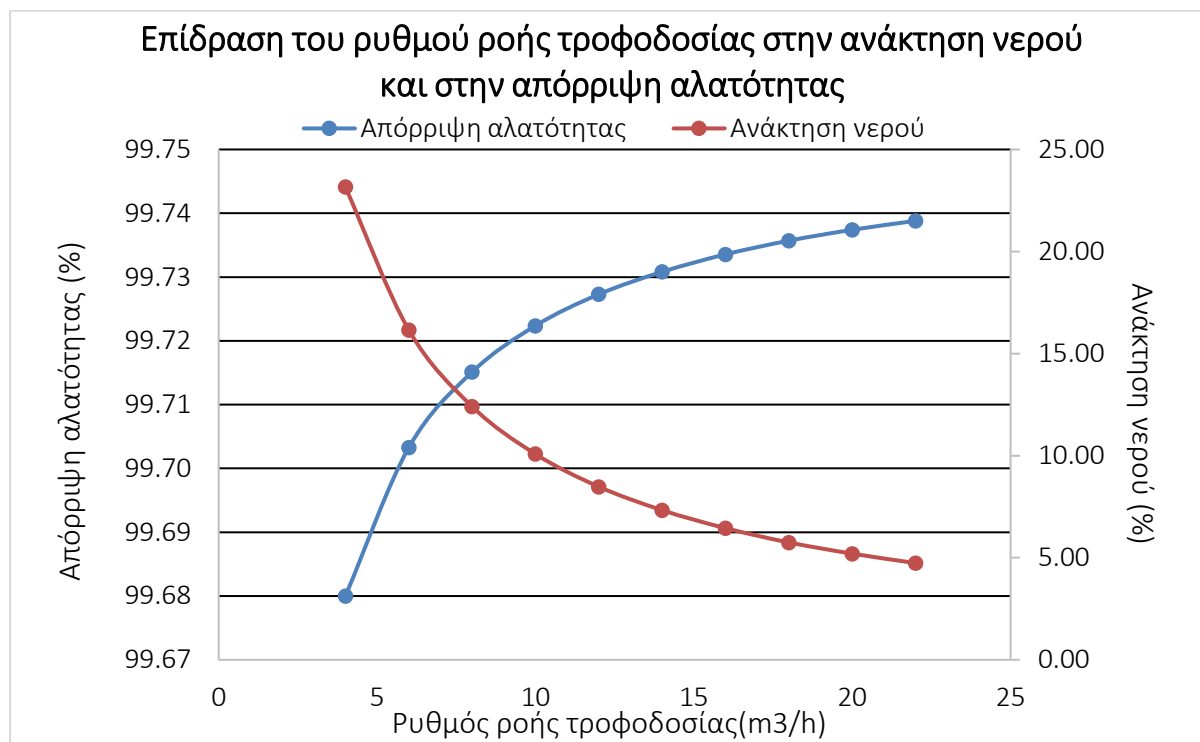
Ωστόσο, αξίζει να παρατηρηθεί πως η αύξηση της αλατότητας στο διάλυμα τροφοδοσίας οδηγεί σε αύξηση της συγκέντρωσης στο διήθημα με μεγαλύτερο ρυθμό συγκριτικά με τον ρυθμό αύξησης της συγκέντρωσης στο συμπύκνωμα.

Στη συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση της μεταβολής της αλατότητας του διαλύματος τροφοδοσίας στην ειδική ενεργειακή κατανάλωση. Παρατηρήθηκε ότι η μεταβολή της αλατότητας του διαλύματος τροφοδοσίας δεν επηρεάζει την ειδική ενεργειακή κατανάλωση.

7.2.2. Επίδραση του ρυθμού ροής του διαλύματος τροφοδοσίας

Στο Διάγραμμα 3 παρουσιάζεται η επίδραση του ρυθμού ροής τροφοδοσίας στην ανάκτηση νερού και την απόρριψη αλατότητας. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο ρυθμός ροής τροφοδοσίας, η απόρριψη αλατότητας δεν επηρεάζεται σημαντικά. Συγκεκριμένα, αυξάνεται κατά 0.06%, δηλαδή από 99.68% σε 99.74%.

Αντιθέτως, η ανάκτηση νερού μειώνεται κατά 79.5%, αφού από 23.16% για ρυθμό ροής τροφοδοσίας ίσο με 4 m³/h μειώνεται σε 4.74% για ρυθμό ροής τροφοδοσίας ίσο με 22 m³/h. Την πτωτική τάση της ανάκτησης νερού με την αύξηση του ρυθμού ροής τροφοδοσίας κατέγραψαν στην έρευνά τους οι Al-Obaidi et al. (2018).



Διάγραμμα 3. Επίδραση του ρυθμού ροής τροφοδοσίας στην ανάκτηση νερού και την απόρριψη αλατότητας

Σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας βρίσκονται και τα αποτελέσματα των Aladwani et al. (2021), οι οποίοι ανέφεραν αύξηση της τάξης του 0.3% για την απόρριψη και μείωση κατά 64% της ανάκτησης νερού, μελετώντας ρυθμό ροής τροφοδοσίας στο εύρος 3.6-18 m³/h. Στον Πίνακα 11 παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν για τον ρυθμό ροής τροφοδοσίας σχετικά με την επίδρασή του στην ανάκτηση νερού και απόρριψη αλατότητας.

Πίνακας 11. Σενάρια ρυθμού ροής τροφοδοσίας με τις τιμές ανάκτησης νερού και απόρριψης αλατότητας

Ρυθμός ροής τροφοδοσίας (m³/h)	Ανάκτηση νερού (%)	Απόρριψη αλατότητας (%)
4	23.16	99.68
6	16.16	99.70
8	12.41	99.72
10	10.08	99.72
12	8.48	99.73

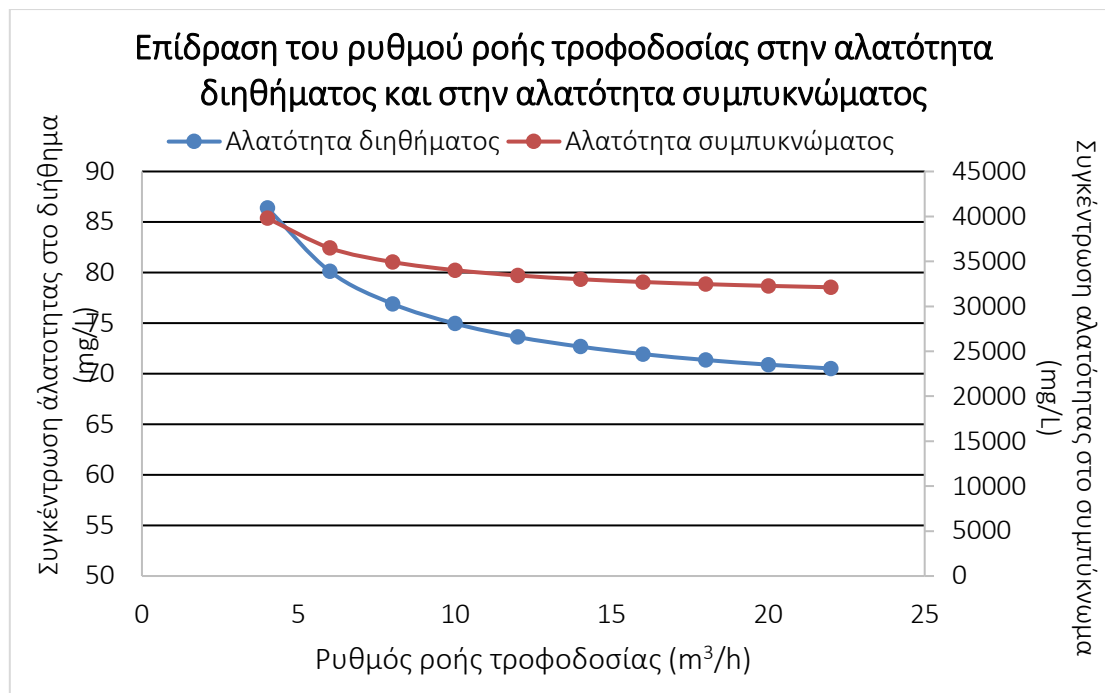
14	7.33	99.73
16	6.45	99.73
18	5.75	99.74
20	5.20	99.74
22	4.74	99.74

Ο μεγαλύτερος ρυθμός ροής του διαλύματος τροφοδοσίας προκαλεί την αύξηση της ταχύτητας με την οποία τροφοδοτείται το διάλυμα. Αυτό συνεπάγεται, τη μείωση της ανάκτησης νερού (Al-Obaidi et al., 2018).

Από την άλλη πλευρά, η αύξηση του ρυθμού ροής τροφοδοσίας βελτιώνει την μεταφορά μάζας, καθώς αυξάνεται ο συντελεστής μεταφοράς μάζας, ο οποίος εξαρτάται από την ταχύτητα και τον ρυθμό ροής του διαλύματος τροφοδοσίας με μη γραμμική σχέση. Συνεπώς, αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση ροής του διαλύματος που κατ' επέκταση σηματοδοτεί τη μείωση της συγκέντρωσης των διαλυμένων συστατικών στο διήθημα και την αύξηση της απόρριψη διαλυμένων συστατικών (Abbas, 2005; Aladwani et al., 2021).

Στη συνέχεια, μελετήθηκε η επίδραση του ρυθμού ροής τροφοδοσίας στην αλατότητα του διηθήματος και του συμπυκνώματος, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνει ο ρυθμός ροής τροφοδοσίας στο εύρος 0-25 m³/h, τόσο μειώνονται η αλατότητα του διηθήματος και του συμπυκνώματος. Τα ποσοστά μείωσης είναι 18.3% για το διήθημα, από τα 86.4 mg/L στα 70.52 mg/L, και 19.39% για το συμπύκνωμα από τα 39800.27 mg/L στα 32120.58 mg/L. Τα αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με την έρευνα των Al-Obaidi et al. (2018).

Η αύξηση του ρυθμού ροής τροφοδοσίας προκαλεί την αύξηση της ταχύτητας και κατ' επέκταση την αύξηση των τιμών Reynolds και Sherwood. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάζεται ο συντελεστής μεταφοράς μάζας, ο οποίος παρουσιάζει αυξητική τάση που δικαιολογείται μέσω των εξισώσεων 19-24 της παρούσας εργασίας. Συνεπώς, τα διαλυμένα συστατικά δεν συσσωρεύονται στον ίδιο βαθμό πλησίον της επιφάνειας της μεμβράνης και έτσι μειώνεται η συγκέντρωση των διαλυμένων συστατικών που διαπερνούν την μεμβράνη και καταλήγουν στο διήθημα.



Διάγραμμα 4. Επίδραση του ρυθμού ροής τροφοδοσίας στην αλατότητα διηθήματος και συμπυκνώματος

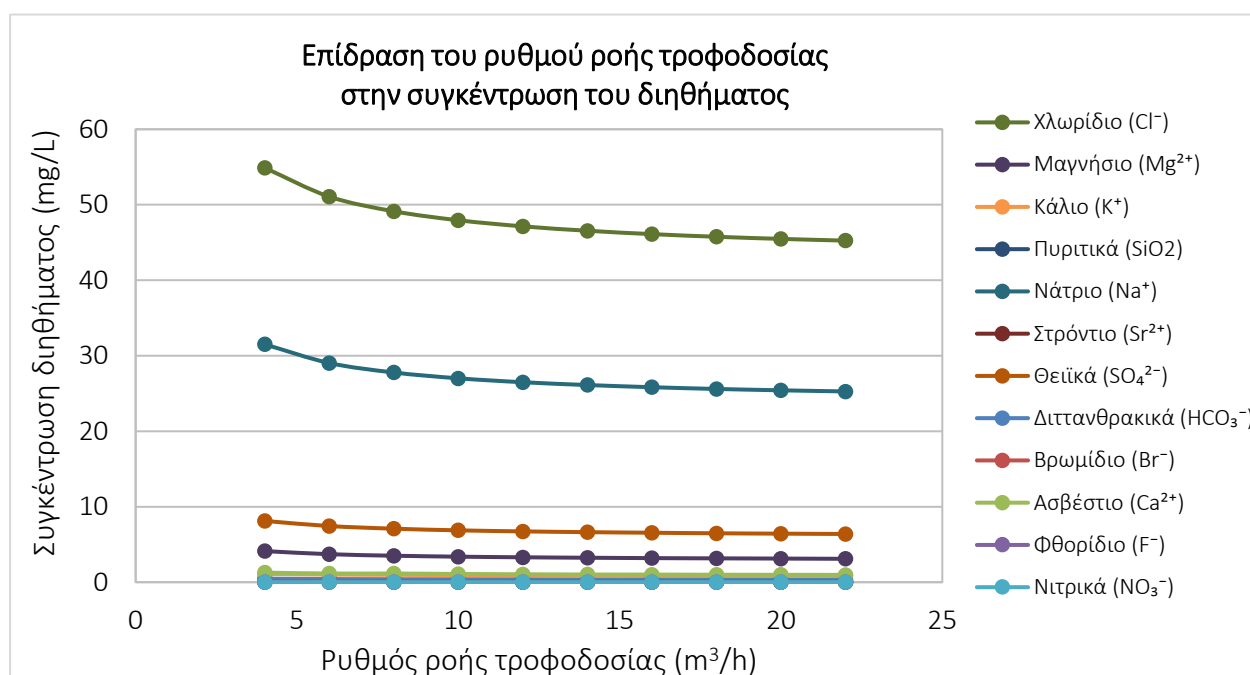
Όσον αφορά στην μείωση συγκέντρωσης αλάτων στο συμπύκνωμα, εξαιτίας της υψηλής ταχύτητας που δημιουργείται από τον αυξημένο ρυθμό ροής τροφοδοσίας, μειώνεται το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης. Επομένως, αποτρέπεται η συσσώρευση των αλάτων στο συμπύκνωμα (Aladwani et al., 2021). Στον Πίνακα 12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αλατότητας τόσο στο διήθημα όσο και στο συμπύκνωμα για κάθε περίπτωση του ρυθμού ροής της τροφοδοσίας που μελετήθηκε.

Πίνακας 12. Σενάρια ρυθμού ροής τροφοδοσίας με τιμές αλατότητας διηθήματος και συμπυκνώματος

Ρυθμός ροής τροφοδοσίας (m³/h)	Αλατότητα διηθήματος (mg/L)	Αλατότητα συμπυκνώματος (mg/L)
4	86.40	39800.27
6	80.12	36483.30
8	76.92	34926.73
10	74.96	34022.50
12	73.63	33431.38
14	72.68	33014.66
16	71.94	32705.03
18	71.36	32465.88
20	70.90	32275.59
22	70.52	32120.58

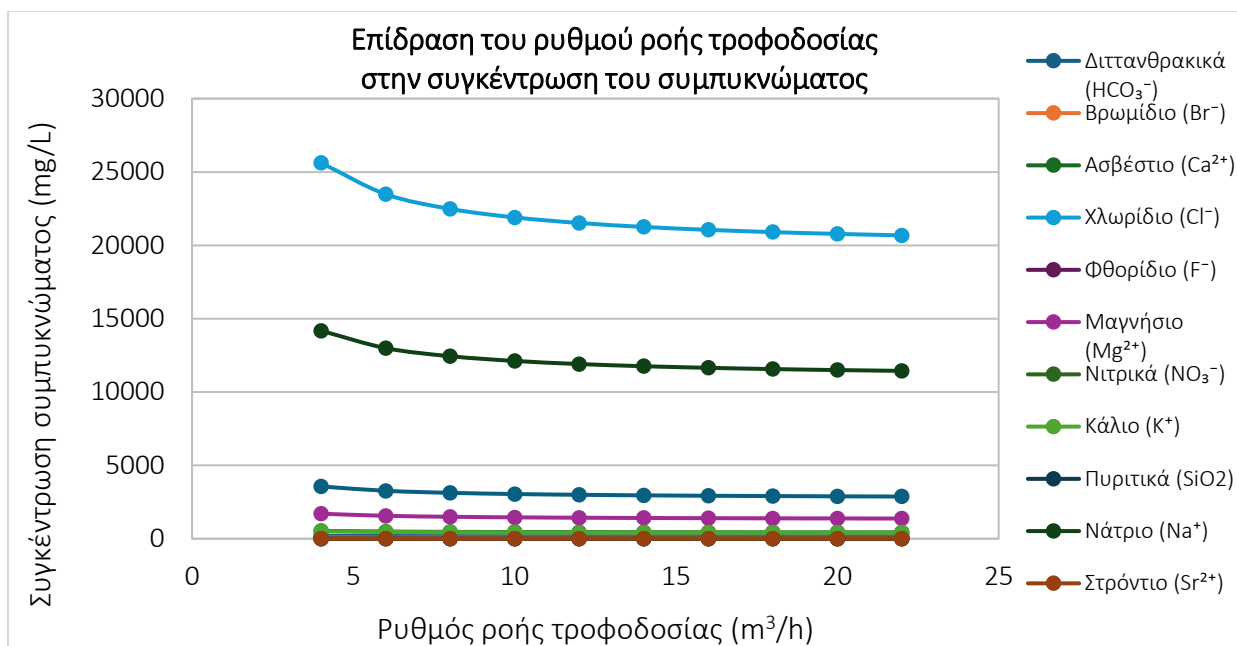
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η επίδραση του ρυθμού ροής τροφοδοσίας στην συγκέντρωση κάθε ιόντος τόσο στο διήθημα όσο και στο συμπύκνωμα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 5 και Διάγραμμα 6, αντίστοιχα.

Στο διήθημα είναι εμφανές ότι τα διαλυμένα ιόντα που κυριαρχούν είναι το νάτριο και το χλώριο. Τα υπόλοιπα διαλυμένα ιόντα βρίσκονται μεν στο διάλυμα του διηθήματος, αλλά σε σημαντικά χαμηλότερη συγκέντρωση.



Διάγραμμα 5. Επίδραση του ρυθμού ροής τροφοδοσίας στην συγκέντρωση του διηθήματος

Παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται ο ρυθμός ροής διαλύματος της τροφοδοσίας, οι συγκεντρώσεις των διαλυμένων συστατικών μειώνονται τόσο στο διήθημα όσο και στο συμπύκνωμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επίδραση της αύξησης του ρυθμού ροής του διηθήματος γίνεται αμελητέα μετά από τα 10 m³/h τόσο για το χλώριο όσο και για το νάτριο, ενώ για τα υπόλοιπα διαλυμένα ιόντα η επίδραση είναι σε όλο το εύρος ίδια.



Διάγραμμα 6. Επίδραση του ρυθμού ροής τροφοδοσίας στην συγκέντρωση του συμπυκνώματος

Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι γιατί καθώς αυξάνεται η ροή τροφοδοσίας, τα ιόντα που συσσωρεύονται πλησίον της μεμβράνης εξαιτίας της πόλωσης συγκέντρωσης, να επαναναμιγνύονται στο διάλυμα από την πλευρά της τροφοδοσίας. Έτσι, δεν διαπερνούν την μεμβράνη στον ίδιο βαθμό και συνεπώς δεν καταλήγουν ούτε στο διήθημα ούτε στο συμπύκνωμα (Aladwani et al., 2021). Στον Πίνακα 13 παρουσιάζονται αναλυτικά οι συγκεντρώσεις όλων των διαλυμένων συστατικών που καταλήγουν στο διήθημα για κάθε ρυθμό ροής τροφοδοσίας που εξετάστηκε.

Πίνακας 13. Συγκέντρωση διαλυμένων συστατικών στο διήθημα για διαφορετικό ρυθμό ροής τροφοδοσίας

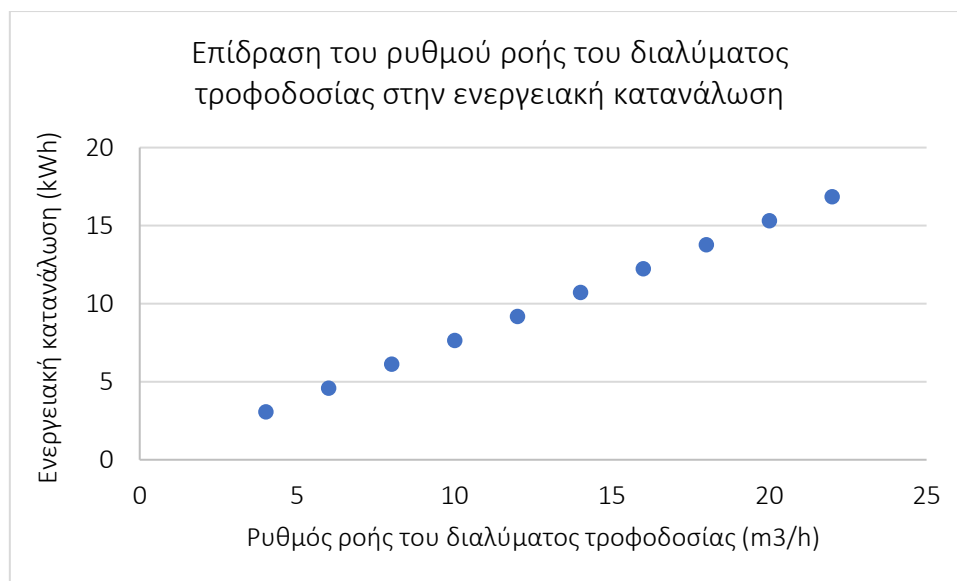
Διαλυμένο συστατικό στο διήθημα (mg/L) / Ρυθμός ροής τροφοδοσίας (m³/h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Διττανθρακικά	0.47	0.42	0.40	0.39	0.38	0.37	0.37	0.36	0.36	0.36
Βρώμιο	0.18	0.17	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Ασβέστιο	1.27	1.15	1.09	1.05	1.02	1.01	0.99	0.98	0.97	0.97
Χλώριο	54.89	51.08	49.14	47.95	47.14	46.56	46.11	45.76	45.48	45.25
Φθόριο	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Μαγνήσιο	4.12	3.71	3.51	3.38	3.30	3.24	3.19	3.16	3.13	3.10
Νιτρικό ανιόν	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Κάλιο	1.09	1.01	0.97	0.95	0.93	0.92	0.91	0.91	0.90	0.30
Διοξείδιο του πυριτίου	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Νάτριο	31.51	29.04	27.78	27.01	26.49	26.12	25.83	25.6	25.42	25.27
Στρόντιο	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Θειικό ιόν	8.12	7.44	7.09	6.87	6.73	6.63	6.55	6.48	6.43	6.39

Στον Πίνακα 14 Πίνακας 13 παρουσιάζονται αναλυτικά οι συγκεντρώσεις όλων των διαλυμένων συστατικών που υπάρχουν στο συμπύκνωμα για κάθε ρυθμό ροής τροφοδοσίας που εξετάστηκε.

Πίνακας 14. Συγκέντρωση ιόντων στο συμπύκνωμα για κάθε ρυθμό ροής τροφοδοσίας που μελετήθηκε

Διαλυμένο συστατικό στο διήθημα (mg/L) / Ρυθμός ροής τροφοδοσίας (m ³ /h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Διττανθρακικά	197.6	181.2	173.4	169.0	166.0	163.9	162.4	161.2	160.3	159.5
Βρώμιο	84.50	77.5	74.19	72.27	71.01	70.13	69.47	6.96	68.56	68.23
Ασβέστιο	533.2	488.8	467.9	455.8	447.9	442.3	438.2	435.0	432.4	430.3
Χλώριο	25623	23487	22485	21903	21522	21254	21055	20901	20778	20678
Φθόριο	1.82	1.67	1.6	1.56	1.53	1.51	1.50	1.49	1.48	1.47
Μαγνήσιο	1703	1561	1495	1456	1431	1413	1400	1389	1381	1375
Νιτρικό ανιόν	0.26	0.24	0.23	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21	0.21	0.21
Κάλιο	507.2	464.9	445.1	433.6	426.0	420.7	416.8	413.7	411.3	409.3
Διοξείδιο του πυριτίου	0.26	0.24	0.23	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21	0.21	0.21
Νάτριο	14177	12995	12441	12119	11908	11760	11649	11564	11496	11441
Στρόντιο	16.91	15.5	14.8	14.45	14.2	14.03	13.89	13.79	13.71	13.65
Θειικό ιόν	3563	3266	3127	3046	2993	2956	2928	2907	2890	2876

Στο Διάγραμμα 7 παρουσιάζεται η επίδραση του ρυθμού ροής τροφοδοσίας στην ενεργειακή κατανάλωση. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο ρυθμός ροής τροφοδοσίας, τόσο αυξάνεται η ειδική ενεργειακή κατανάλωση. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι γιατί καθώς αυξάνεται ο ρυθμός ροής τροφοδοσίας, παρατηρείται πτώση πίεσης και μείωση του ρυθμού ροής του διηθήματος. Συνεπώς, η ειδική ενεργειακή κατανάλωση έχει αυξητική τάση. Οι Aladwani et al. (2021) έδειξαν ότι η αύξηση στο εύρος 3.6-18.0 m³/h του διαλύματος τροφοδοσίας οδήγησε σε αύξηση της ειδικής ενεργειακής.



Διάγραμμα 7. Επίδραση του ρυθμού ροής τροφοδοσίας στην ειδική ενεργειακή κατανάλωση

Συνεπώς, απαιτείται περισσότερη ενέργεια για να αυξηθεί ξανά στα επιθυμητά επίπεδα πίεσης, το διάλυμα τροφοδοσίας. Συγκεκριμένα στο εύρος ρυθμού ροής που μελετήθηκε, 4-22 m³/h, παρατηρήθηκε αύξηση της ειδικής ενεργειακής κατανάλωσης από τις 3.06 kWh στις 16.84 kWh. Στον Πίνακα 15 παρουσιάζονται οι τιμές για κάθε ρυθμό ροής τροφοδοσίας της ειδικής ενεργειακής κατανάλωσης.

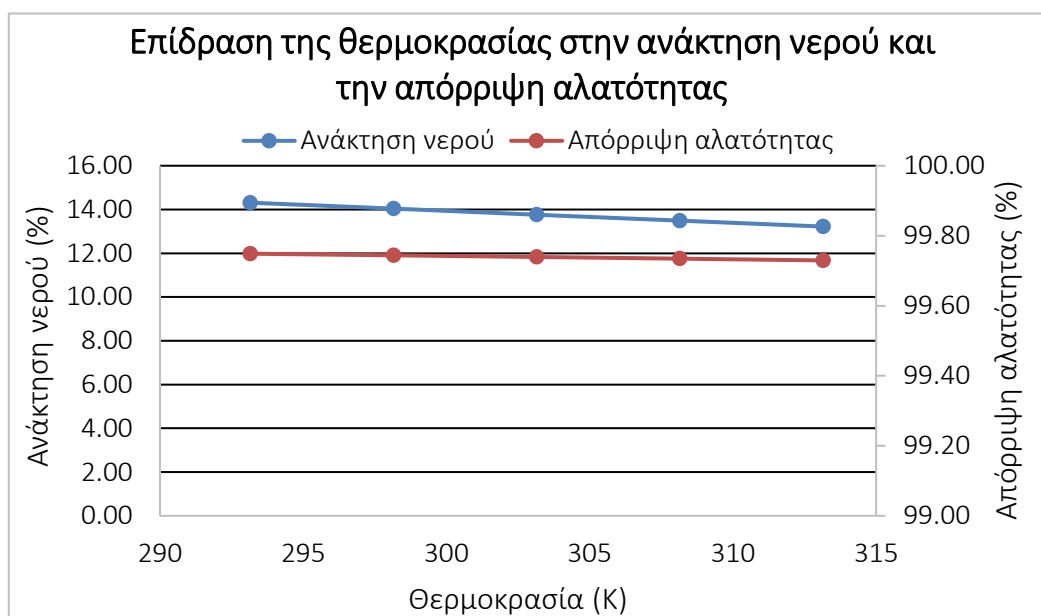
Πίνακας 15. Ειδική ενεργειακή κατανάλωση για κάθε ρυθμό ροής τροφοδοσίας που μελετήθηκε

Ρυθμός ροής τροφοδοσίας (m ³ /h)	Ενεργειακή κατανάλωση (kWh)
4	3.06
6	4.59
8	6.12
10	7.65
12	9.18
14	10.71
16	12.24
18	13.78
20	15.31
22	16.84

7.2.3. Επίδραση της θερμοκρασίας

Στο Διάγραμμα 8 παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην ανάκτηση νερού και την απόρριψη αλατότητας. Το εύρος θερμοκρασιών που μελετήθηκε ήταν τα 290-315 K. Τόσο η απόρριψη αλατότητας όσο και η ανάκτηση νερού φαίνεται ότι δεν επηρεάζονται σημαντικά από την μεταβολή της θερμοκρασίας.

Με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται το ιξώδες, με αποτέλεσμα να διευκολύνεται η ροή του διαλύματος μέσω της μεμβράνης. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία είναι εμφανής η μείωση της ανάκτησης νερού, η οποία ανέρχεται σε 7.6%. Όσον αφορά στην απόρριψη αλατότητας, φαίνεται ότι μειώνεται σε μικρό βαθμό λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την προσομοίωση της διεργασίας το ιξώδες του διαλύματος θεωρήθηκε αμετάβλητο, για αυτό και δικαιολογείται η αμελητέα επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας στην ανάκτηση του νερού.



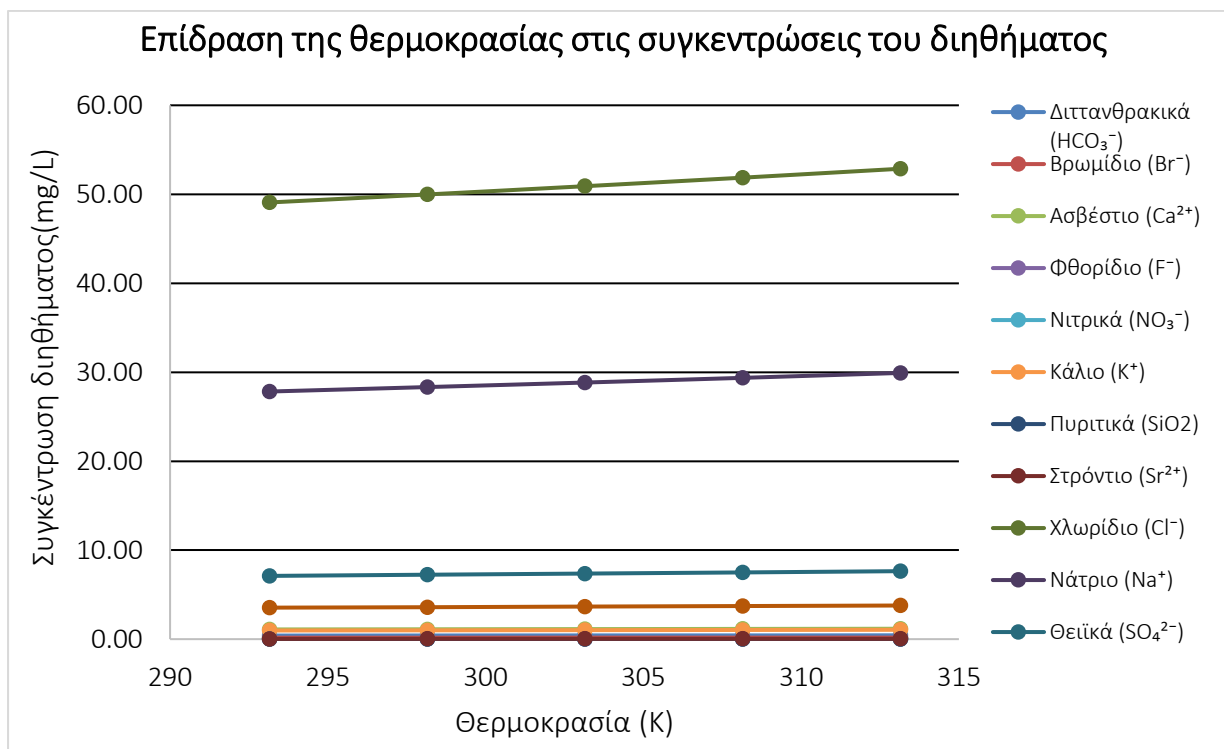
Διάγραμμα 8. Επίδραση της θερμοκρασίας στην ανάκτηση νερού και την απόρριψη αλατότητας.

Στον Πίνακα 16 παρουσιάζονται οι τιμές που προέκυψαν για την ανάκτηση νερού και την απόρριψη αλατότητας για κάθε θερμοκρασία που μελετήθηκε.

Πίνακας 16. Ανάκτηση νερού και απόρριψη αλατότητας για κάθε σενάριο θερμοκρασίας

Θερμοκρασία (K)	Ανάκτηση νερού (%)	Απόρριψη αλατότητας (%)
293.15	14.31	99.75
298.15	14.04	99.74
303.15	13.76	99.74
308.15	13.49	99.73
313.15	13.22	99.73

Στο Διάγραμμα 9 παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην συγκέντρωση κάθε ιόντος στο διήθημα. Φαίνεται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει κυρίως τη συγκέντρωση του χλωρίου και του νατρίου, ενώ σε μικρότερο βαθμό επηρεάζονται τα υπόλοιπα διαλυμένα στερεά (Aladwani et al., 2021; Al-Mutaz & Al-Ghunaimi, n.d.).



Διάγραμμα 9. Επίδραση της θερμοκρασίας στην συγκέντρωση του διηθήματος.

Στο εύρος θερμοκρασιών που μελετήθηκαν, οι συγκεντρώσεις των ιόντων στο διήθημα φαίνεται να αυξάνονται, ενώ στο συμπύκνωμα να μειώνονται. Μια πιθανή αιτία που συμβαίνει αυτό ίσως να είναι ότι στην παρούσα εργασία ο συντελεστής διαχυτότητας έχει θεωρηθεί σταθερός και ανεξάρτητος από τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Στον Πίνακα 17 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των διαλυμένων συστατικών στο διήθημα για κάθε θερμοκρασία που μελετήθηκε.

Πίνακας 17. Συγκέντρωση διαλυμένων συστατικών στο διήθημα για κάθε θερμοκρασία

Διαλυμένο συστατικό στο διήθημα (mg/L) / Θερμοκρασία (K)	293.15	298.15	303.15	308.15	313.15
Διττανθρακικά	0.40	0.41	0.42	0.42	0.43
Βρώμιο	0.16	0.16	0.17	0.17	0.17
Ασβέστιο	1.09	1.11	1.13	1.15	1.17
Χλώριο	49.08	49.98	50.91	51.87	52.87
Φθόριο	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Μαγνήσιο	3.54	3.59	3.66	3.72	3.78
Νιτρικό ανιόν	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Κάλιο	0.97	0.99	1.01	1.03	1.05
Διοξείδιο του πυριτίου	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Νάτριο	27.83	28.33	28.84	29.37	29.92

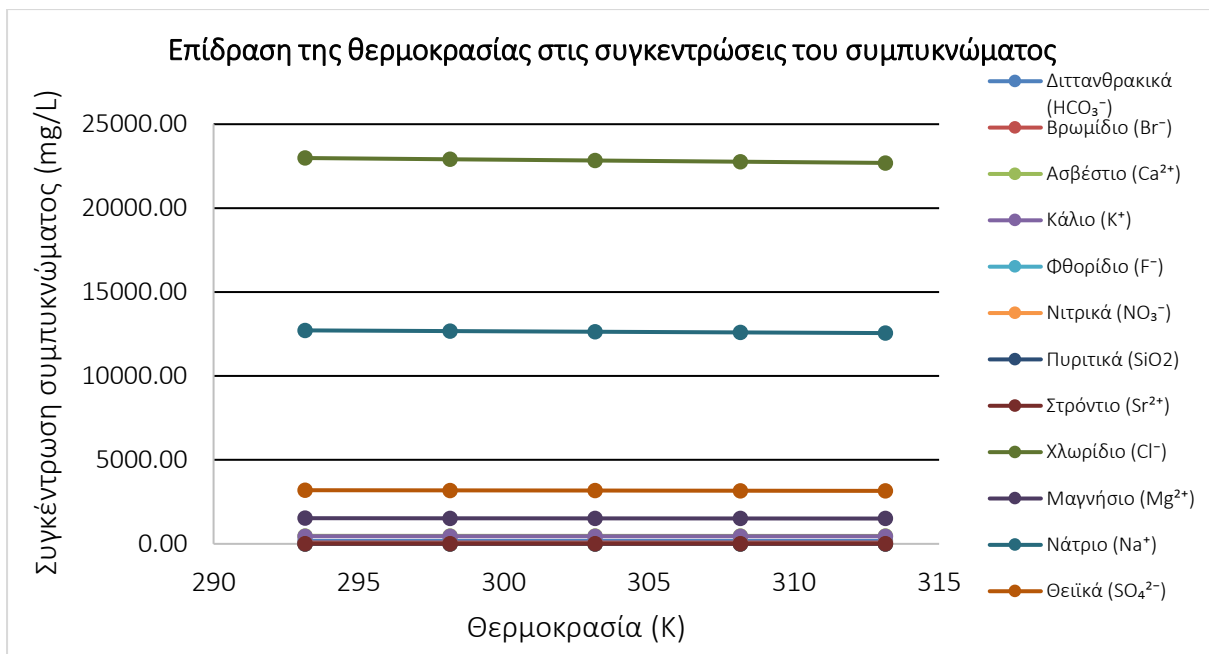
Στρόντιο	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04
Θειικό ιόν	7.11	7.24	7.37	7.50	7.64

Στον Πίνακα 18 παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι συγκεντρώσεις των ιόντων στο συμπύκνωμα για κάθε θερμοκρασία που μελετήθηκε.

Πίνακας 18. Συγκέντρωση ιόντων στο συμπύκνωμα για κάθε θερμοκρασία τροφοδοσίας που μελετήθηκε

Διαλυμένο συστατικό στο συμπύκνωμα (mg/L)/ Θερμοκρασία (K)	293.15	298.15	303.15	308.15	313.15
Διττανθρακικά	177.33	176.76	176.2	175.64	175.09
Βρώμιο	75.83	75.59	75.35	75.11	74.88
Ασβέστιο	478.33	476.8	475.28	473.78	472.29
Χλώριο	22983	22910	22837	22764	22693
Φθόριο	1.63	1.63	1.62	1.62	1.61
Μαγνήσιο	1528.3	1523.4	1518.5	1513.7	1509.0
Νιτρικό ανιόν	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Κάλιο	455.0	453.55	452.11	450.68	449.26
Διοξείδιο του πυριτίου	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Νάτριο	12716	12676	12635	12595	12556
Στρόντιο	15.17	15.12	15.07	15.02	14.97
Θειικό ιόν	3196.6	3186.4	3176.2	3166.2	3156.3

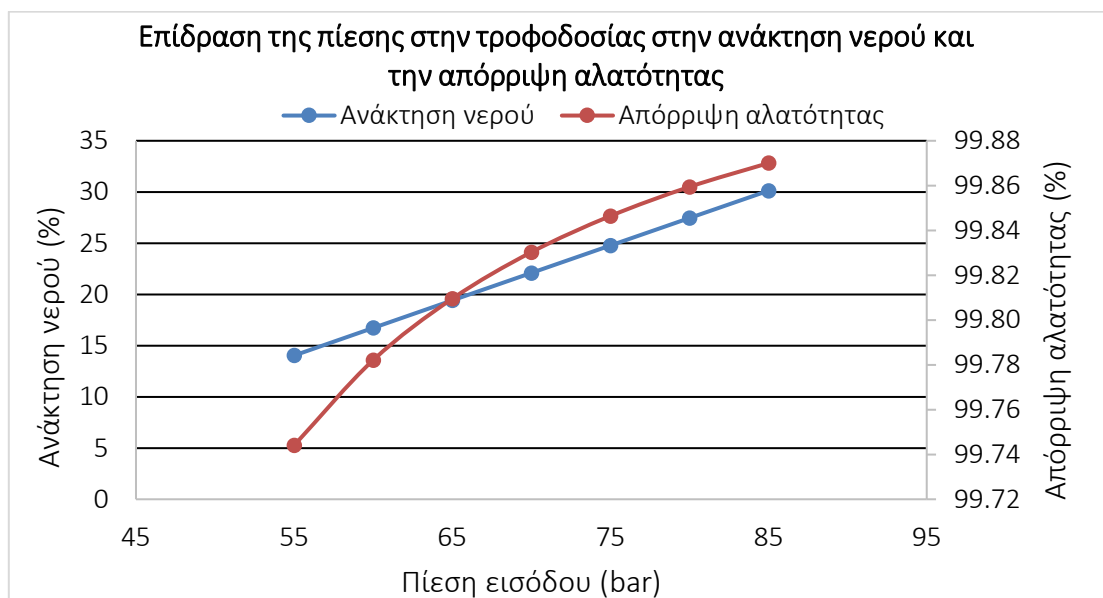
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, η συγκέντρωση των διαλυμένων συστατικών στο διάλυμα του συμπυκνώματος δεν επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό με την αύξηση της θερμοκρασίας.



Διάγραμμα 10. Επίδραση της θερμοκρασίας στις συγκεντρώσεις των ιόντων του συμπυκνώματος.

7.2.4. Επίδραση της πίεσης

Στο Διάγραμμα 11 παρουσιάζεται η επίδραση της πίεσης στην τροφοδοσία στην ανάκτηση νερού και στην απόρριψη αλατότητας. Στο εύρος πίεσης που μελετήθηκε, 55-85 bar, παρατηρήθηκε αύξηση τόσο της ανάκτησης όσο και της απόρριψης. Συγκεκριμένα, η ανάκτηση νερού αυξήθηκε κατά 53.40%, από 14.04% στο 30.13 %, ενώ η απόρριψη αλατότητας αυξήθηκε ελάχιστα (κατά 0.12%), από το 99.74% στο 99.87%. Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξαν και οι Chen & Qin (2019), όπου η αύξηση της πίεσης κατά 3.5 bar οδήγησε σε αύξηση της απόρριψης κατά 0.02% και αύξηση της ανάκτησης νερού κατά 14%.



Διάγραμμα 11. Επίδραση της πίεσης στην ανάκτηση νερού και την απόρριψη αλατότητας

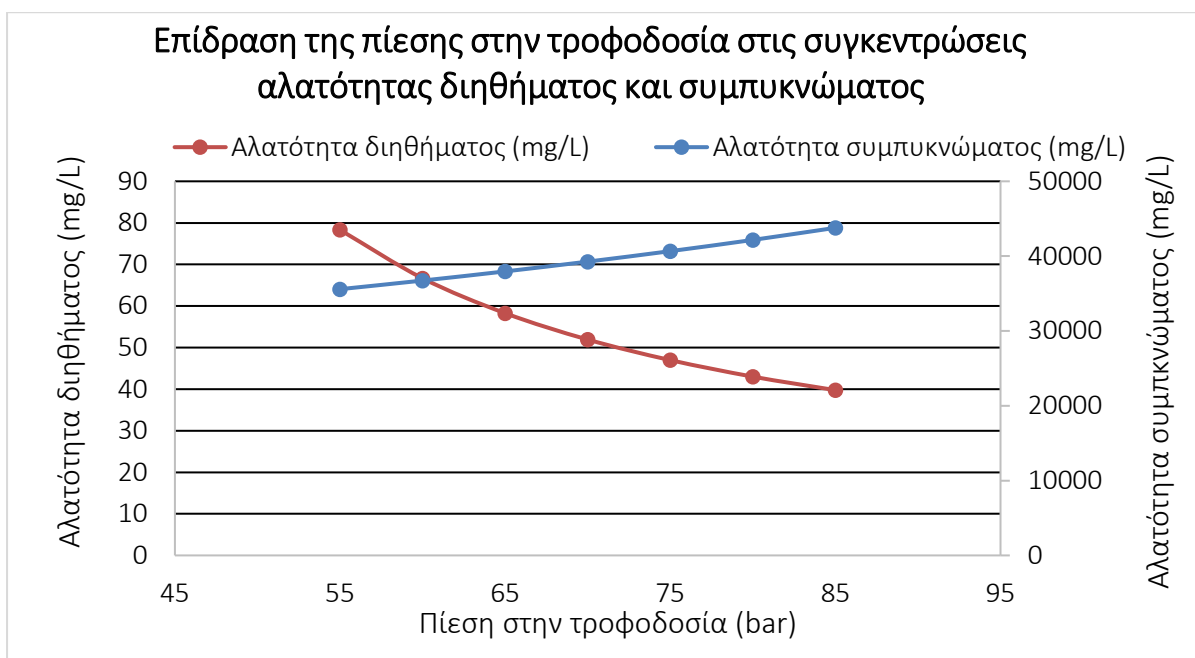
Με την αύξηση της πίεσης, ως η κινητήριος δύναμη της διεργασίας, ωθείται μεγαλύτερη ποσότητα διαλύματος να διαπεράσει την μεμβράνη, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και ο ρυθμός ροής νερού, γεγονός που συνεπάγεται της αύξησης της ανάκτησης νερού (Al-Mutaz & Al-Ghunaimi, n.d.; Sassi & Mujtaba, 2012). Ωστόσο, όσον αφορά στην απόρριψη των διαλυμένων συστατικών, η αύξηση είναι αμελητέα, καθώς ανέρχεται ήδη σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα της τάξης του 99.80%, αφήνοντας μικρά περιθώρια βελτίωσης. Σε συμφωνία με τα παραπάνω είναι και η εργασία των Abbas (2005). Στον Πίνακα 19 παρουσιάζονται οι τιμές της απόρριψης αλατότητας και ανάκτησης νερού για κάθε τιμή πίεσης τροφοδοσίας που μελετήθηκε.

Πίνακας 19. Ανάκτηση νερού και απόρριψη αλατότητας για κάθε τιμή πίεσης τροφοδοσίας

Πίεση τροφοδοσίας (bar)	Ανάκτηση νερού (%)	Απόρριψη αλατότητας (%)
55	14.04	99.74
60	16.73	99.78
65	19.42	99.81
70	22.1	99.83

75	24.78	99.85
80	27.46	99.86
85	30.13	99.87

Στο Διάγραμμα 12 παρουσιάζεται η επίδραση της πίεσης στην τροφοδοσία στην αλατότητα διηθήματος και στην αλατότητα συμπυκνώματος. Στο εύρος πίεσης που μελετήθηκε είναι εμφανές ότι καθώς αυξάνεται η πίεση στην τροφοδοσία, η αλατότητα στο διήθημα μειώνεται κατά 49.2%, από τα 78.31 mg/L στα 39.76 mg/L, ενώ στο συμπύκνωμα αυξάνεται κατά 18.7%, από τα 35586 mg/L στα 43781 mg/L. Η αύξηση της πίεσης στην τροφοδοσία οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού ροής του διαλύματος. Επομένως η συγκέντρωση αλατότητας στο διήθημα αναμένεται να μειωθεί. Συνεπώς, το μέρος των διαλυμένων συστατικών που κατακρατούνται καταλήγουν στο συμπύκνωμα. Για αυτό το λόγο παρατηρείται η αύξηση της συγκέντρωσης της αλατότητας σε αυτό (Abbas, 2005; Aladwani et al., 2021).



Διάγραμμα 12. Επίδραση της θερμοκρασίας στις συγκεντρώσεις αλατότητας διηθήματος και συμπυκνώματος

Στον Πίνακα 20 παρουσιάζεται η αλατότητα διηθήματος και συμπυκνώματος για κάθε τιμή πίεσης τροφοδοσίας που μελετήθηκε.

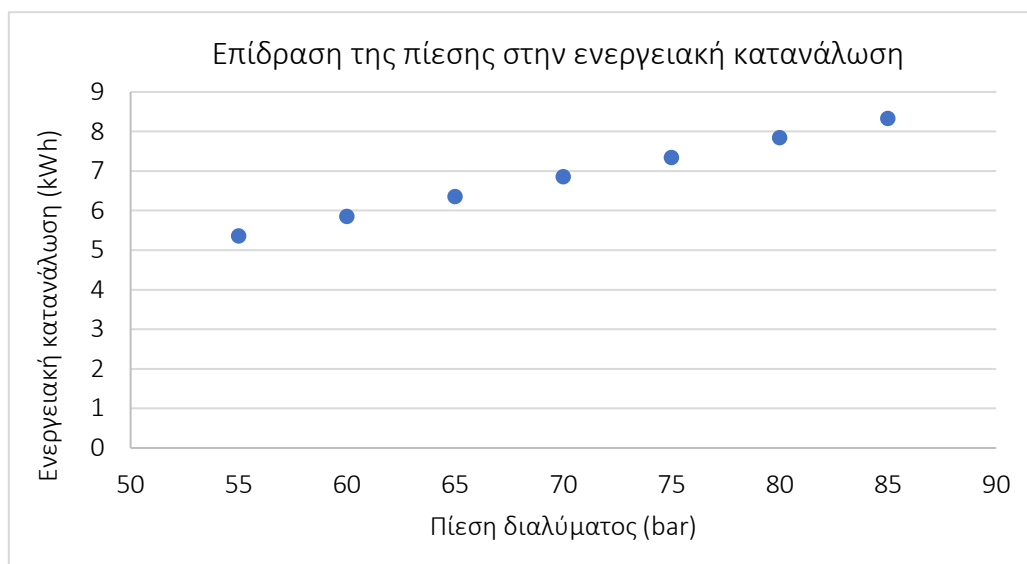
Πίνακας 20. Αλατότητα διηθήματος και συμπυκνώματος για κάθε τιμή πίεσης τροφοδοσίας

Πίεση τροφοδοσίας (bar)	Αλατότητα διηθήματος (mg/L)	Αλατότητα συμπυκνώματος (mg/L)
55	78.31	35586.04
60	66.67	36735.66
65	58.28	37960.81
70	51.93	39268.84

75	46.99	40668.25
80	43.01	42168.79
85	39.76	43781.74

Η αύξηση της πίεσης που εφαρμόζεται για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού οδηγεί σε μείωση της αλατότητας στο διήθημα, αυξάνοντας ταυτόχρονα την αλατότητα στο συμπύκνωμα. Σε συμφωνία είναι τα αποτελέσματα των Aladwani et al. (2021) που κατέγραψαν μείωση αλατότητας στο διήθημα κατά 68.7% και αύξηση αλατότητας στο συμπύκνωμα κατά 20% στο εύρος 60-80 bar.

Στο Διάγραμμα 13 παρουσιάζεται η επίδραση της πίεσης στην τροφοδοσία στην ενεργειακή κατανάλωση. Παρατηρείται ότι στο εύρος πίεσης που μελετήθηκε η ειδική ενεργειακή κατανάλωση αυξήθηκε κατά περίπου 55.4%%, από 5.36 kWh σε 8.33 kWh.



Διάγραμμα 13. Επίδραση της πίεσης τροφοδοσίας στην ενεργειακή κατανάλωση.

Στον Πίνακα 21 παρουσιάζονται οι τιμές της ενεργειακής κατανάλωσης για κάθε τιμή πίεσης τροφοδοσίας που μελετήθηκε.

Πίνακας 21. Ενεργειακή κατανάλωση για κάθε τιμή πίεσης τροφοδοσίας που μελετήθηκε

Πίεση τροφοδοσίας (bar)	Ενεργειακή κατανάλωση (kWh)
55	5.36
60	5.85
65	6.35
70	6.85
75	7.34
80	7.84
85	8.33

Η αύξηση της πίεσης στην τροφοδοσία οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού ροής του διαλύματος και της ανάκτησης νερού. Έτσι, αναμένεται να μειωθεί η ειδική ενεργειακή κατανάλωση με βάση την εξίσωση 28 (Aladwani et al., 2021; Sassi & Mujtaba, 2012).

7.3. Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

7.3.1. Χρήση ανεμογεννήτριας

Λαμβάνοντας υπόψη τις ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος αντίστροφης ώσμωσης με βάση την προσομοίωση και τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 7.1.2, λύνεται η εξίσωση 29 με στόχο να προβλεφθεί ο αριθμός των ανεμογεννητριών (N_R) που απαιτούνται για να καλύψουν αυτές τις ενεργειακές απαιτήσεις.

Η ανεμογεννήτρια που επιλέγεται είναι η AEOLOS με ισχύ 3 kW. Τα καιρικά δεδομένα λήφθηκαν για την τοποθεσία των Χανίων την 08/04/2024 (<https://penteli.meteo.gr/stations/chania/>).



Εικόνα 18. Απεικόνιση της ανεμογεννήτριας AEOLOS

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (<https://www.windturbinestar.com/3kwh-aeolos-wind-turbine.html>).

Πίνακας 22. Τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας AEOLOS 3kW

Τεχνικό χαρακτηριστικό	Τιμή
Ισχύς (kW)	3
Αριθμός πτερυγίων	3
Αποδοτικότητα	0.96
Βάρος (kg)	138
Πυκνότητα αέρα (kg/m ³)	1.1839
Συντελεστής ισχύος/Απόδοση της ανεμογεννήτριας	0.5926
Ταχύτητα ανέμου (m/s)	1.78
Εμβαδόν κάλυψης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας (m ²)	72.4
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου (m/s)	12
Διάρκεια ζωής (έτη)	20

Συνεπώς, ο αριθμός των απαιτούμενων ανεμογεννητριών υπολογίζεται ως εξής:

$$N_R = \frac{2 \cdot P}{\rho \cdot A_w \cdot C_p \cdot u^3} = \frac{2 \cdot 3000}{1.1839 \cdot 72.4 \cdot 0.5926 \cdot (1.78)^3} = 20.9$$

Συνεπώς, απαιτούνται 21 ανεμογεννήτριες για να καλύψουν την ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος αντίστροφης ώσμωσης.

7.3.2. Χρήση φωτοβολταϊκού

Λαμβάνοντας υπόψη τις ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος αντίστροφης ώσμωσης με βάση την προσομοίωση και τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 7.1.2, λύνονται οι εξισώσεις 30, 31 και 32, με στόχο να προβλεφθεί ο αριθμός των φωτοβολταϊκών (N_{PV}) που απαιτούνται για να καλύψουν αυτές τις ενεργειακές απαιτήσεις.

Τα καιρικά δεδομένα λήφθηκαν για την τοποθεσία των Χανίων στις 08/04/2024 (<https://penteli.meteo.gr/stations/chania/>). Τα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (Rahimi et al, 2021):

Πίνακας 23. Καιρικά και τεχνικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν.

Χαρακτηριστικό Φ/Β	Τιμή
Ισχύς (Wp)	380
Επιφάνεια Φ/Β (m ²)	1.94
Απόδοση φωτοβολταϊκής μονάδας (%)	19.6
Συντελεστής θερμοκρασίας της απόδοσης (%/C)	-0.38
Ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας κυψέλης (°C)	45
Μέση ημερήσια ηλιοφάνεια (kWh/m ² /ημέρα)	16.25 (Χανιά)
Διάρκεια ζωής φωτοβολταϊκού (έτη)	25
Θερμοκρασία περιβάλλοντος (C)	25

Ταχύτητα αέρα (m/s)	1.78
Ροή ηλιακής ακτινοβολίας (W/m ²)	677

Συνεπώς, γίνονται οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

$$T_{\text{cell}} = T_{\text{amb}} + \left(\frac{9.5}{5.7 + 3.8V_w} \right) \cdot \left(G \frac{T_{\text{NOCT}} - 20}{800} \right) = 25 + \left(\frac{9.5}{5.7 + 3.8 \cdot 1.78} \right) \cdot \left(677 \frac{45 - 20}{800} \right) = 41.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_c = (1 - \beta \cdot (T_{\text{cell}} - 25)) = (1 - (-0.38) \cdot (41.1 - 25)) = 7.1$$

$$N_{\text{PV}} = \text{SEC} \cdot \frac{Q_p}{\eta_r T_c A_{\text{PV}} \cdot I} = 1.53 \cdot \left(\frac{0.98}{0.196 \cdot 0.071 \cdot 1.94 \cdot 16.25} \right) \cdot \left(\frac{24 \text{ h}}{d} \right) = 3.4$$

Συνεπώς, απαιτούνται 4 φωτοβολταϊκά για να καλύψουν την ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος αντίστροφης ώσμωσης.

8.

Συμπεράσματα

Κεφάλαιο 8^ο – Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε μαθηματικό μοντέλο ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης τροφοδοτούμενο με θαλασσινό νερό και η προσομοίωση έγινε στο περιβάλλον του Process Simulation Modelling Tool. Στόχος ήταν η πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος και η μελέτη της επίδρασης κύριων παραμέτρων της διεργασίας.

Όσον αφορά στην προσομοίωση της διεργασίας χρησιμοποιώντας τη μεμβράνη TM820M-400, βρέθηκε ότι η ανάκτηση νερού ανέρχεται σε 14% και η απόρριψη των διαλυμένων συστατικών ήταν στο εύρος 69.7-100%. Η μέγιστη απόρριψη, στο 100%, παρατηρήθηκε για το φθόριο, τα νιτρικά και διοξείδιο του πυριτίου, από 1.10, 0.20, 0.20 mg/L σε 0.00 mg/L, ενώ η ελάχιστη απόρριψη βρέθηκε για το στρόντιο με 99.69%, από 13 mg/L σε 0.04 mg/L. Αποδείχθηκε ότι οι ενεργειακές απαιτήσεις ήταν 1.53 kWh/m³.

Στη συνέχεια, μελετήθηκε η επίδραση συγκεκριμένων παραμέτρων στην απόδοση της διεργασίας. Συγκεκριμένα, ερευνήθηκε η επίδραση της αλατότητας και του ρυθμού ροής του διαλύματος τροφοδοσίας, της θερμοκρασίας και της πίεσης. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τα κύρια συμπεράσματα.

Πίνακας 24. Κύρια συμπεράσματα για την επίδραση παραμέτρων της διεργασίας στην απόδοση του συστήματος

Παράμετρος διεργασίας	Απόρριψη αλατότητας	Ανάκτηση νερού	Αλατότητα του διηθήματος	Αλατότητα του συμπυκνώματος	Ενεργειακή κατανάλωση
Αλατότητα του διαλύματος τροφοδοσίας	↓	↓↓	↑↑	↑	—
Ρυθμός ροής του διαλύματος τροφοδοσίας	↑	↓↓↓	↓↓	↓	↑↑
Θερμοκρασία	—	↓	↑	↓	Δεν εφαρμόζεται λόγω παραδοχών
Πίεση	↑	↑↑	↓↓	↑	↑

Η αύξηση της αλατότητας στο διάλυμα τροφοδοσίας οδηγεί σε αύξηση αλατότητας διηθήματος έως και 51%, από τα 70mg/L στα 148 mg/L, ενώ προκαλεί μείωση της ανάκτησης νερού έως και 40%. Η ενεργειακή κατανάλωση παραμένει σταθερή στις 5.36 kWh. Η αύξηση του ρυθμού ροής του διαλύματος της τροφοδοσίας οδηγεί σε μείωση της αλατότητας του διηθήματος έως και 18%, από τα 86 mg/L στα 70 mg/L, μείωση της ανάκτησης νερού έως και

79%, από το 23% στο 5%, ενώ η ενεργειακή κατανάλωση αυξάνεται από τις 3.06 kWh σε 16.84 kWh.

Η αύξηση της θερμοκρασίας τροφοδοσίας δεν επηρεάζει σημαντικά την ανάκτηση νερού και την απόρριψη της αλατότητας, πιθανότατα λόγω των παραδοχών του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε. Η αύξηση της πίεσης οδηγεί σε μείωση της αλατότητας διηθήματος έως και 49% και αύξηση της ανάκτησης νερού κατά 53%, από το 14% στο 30%. Η ενεργειακή κατανάλωση αυξήθηκε κατά περίπου 55.4%%, από 5.36 kWh σε 8.33 kWh.

Συμπερασματικά, μελετώντας τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι μείωση της αλατότητας του διηθήματος επιτυγχάνεται, κατά σειρά αποτελεσματικότητας, μέσω αύξησης της πίεσης (έως και 51%) και αύξησης του ρυθμού ροής του διαλύματος τροφοδοσίας (έως και 18%). Επίσης, σημαντική είναι η αύξηση της ανάκτησης νερού μέσω αύξησης της πίεσης τροφοδοσίας (έως και 53%).

Βιβλιογραφία

Ασημακόπουλος Δ., Αραμπατζής Γ., Αγγελής-Δημάκης Α., Καρταλίδης Α., Τσιλιγκρίδης Γ. (2023). Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Δυναμικό & Τεχνολογίες. Β' Έκδοση. Εκδόσεις σοφία.

Abid, M. Bin *et al.* (2023) 'Desalination technologies, membrane distillation, and electrospinning, an overview', *Heliyon*, 9, p. e12810. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12810>.

Ahmed, F.E., Khalil, A. and Hilal, N. (2021a) 'Emerging desalination technologies: Current status, challenges and future trends', *Desalination*, 517, p. 115183. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115183>.

Ajiwiguna, T.A. *et al.* (2021) 'Optimization of battery-less PV-RO system with seasonal water storage tank', *Desalination*, 503. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.114934>.

Al-Kaabi, A. *et al.* (2021) 'Assessment of water quality variations on pretreatment and environmental impacts of SWRO desalination', *Desalination*, 500. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114831>.

Alnouri, S.Y. and Linke, P. (2013) 'Optimal SWRO desalination network synthesis using multiple water quality parameters', *Journal of Membrane Science*, 444, pp. 493–512. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.04.066>.

Alsheghri, A. *et al.* (2015) 'Design and Cost Analysis of a Solar Photovoltaic Powered Reverse Osmosis Plant for Masdar Institute', in *Energy Procedia*. Elsevier Ltd, pp. 319–324. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.365>.

Altaee, A., Alanezi, A.A. and Hawari, A.H. (2018) 'Forward osmosis feasibility and potential future application for desalination', in *Emerging Technologies for Sustainable Desalination Handbook*. Elsevier, pp. 35–54. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815818-0.00002-3>.

Assiry, A.M. *et al.* (2010) 'Electrical conductivity of seawater during ohmic heating', *Desalination*, 260(1–3), pp. 9–17. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.05.015>.

Carta, J.A. and Cabrera, P. (2021) 'Optimal sizing of stand-alone wind-powered seawater reverse osmosis plants without use of massive energy storage', *Applied Energy*, 304. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117888>.

Chen, C. and Qin, H. (2019) 'A mathematical modeling of the reverse osmosis concentration process of a glucose solution', *Processes*, 7(271). Available at: <https://doi.org/10.3390/pr7050271>.

Curcio, E. *et al.* (2015) 'Membrane technologies for seawater desalination and brackish water treatment', in *Advances in Membrane Technologies for Water Treatment: Materials, Processes and Applications*, pp. 411–441. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-121-4.00013-7>.

- Curto, D., Franzitta, V. and Guercio, A. (2021a) 'A review of the water desalination technologies', *Applied Sciences*, 11(670). Available at: <https://doi.org/10.3390/app11020670>.
- Dehmas, D.A. *et al.* (2011) 'On the use of wind energy to power reverse osmosis desalination plant: A case study from Téns (Algeria)', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, pp. 956–963. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.004>.
- Ebrahimpour, B. *et al.* (2022) 'Modeling and techno-economic study of a solar reverse osmosis desalination plant', *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(9), pp. 8727–8742. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04099-7>.
- Fane, A.G., Tang, C.Y. and Wang, R. (no date) *4.11 Membrane Technology for Water: Microfiltration, Ultrafiltration, Nanofiltration, and Reverse Osmosis*.
- Gao, L., Zhang, X. and Hua, W. (2023) 'Recent progress in photovoltaic thermal phase change material technology: A review', *Journal of Energy Storage*. Elsevier Ltd. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107317>.
- Gaublomme, D. *et al.* (2020) 'A generic reverse osmosis model for full-scale operation', *Desalination*, 490. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114509>.
- Guarino, S. *et al.* (2023) '3E assessment of a solar-driven reverse osmosis plant for seawater desalination in a small island of the Mediterranean Sea', *Energy Reports*, 10, pp. 2260–2276. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.09.053>.
- Iain D. Stewart, G.M. (2021) *The Urban Heat Island*.
- Kavitha, J. *et al.* (2019) 'Pretreatment processes for seawater reverse osmosis desalination systems—A review', *Journal of Water Process Engineering*, 32, p. 100926. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100926>.
- Kim, J. and Hong, S. (2023) 'Pilot study of emerging low-energy seawater reverse osmosis desalination technologies for high-salinity, high-temperature, and high-turbidity seawater', *Desalination*, p. 116871. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116871>.
- Kim, S.J. *et al.* (2009) 'Site-specific raw seawater quality impact study on SWRO process for optimizing operation of the pressurized step', *Desalination*, 238, pp. 140–157. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.03.020>.
- Krishna, H.J. (no date) *Introduction to Desalination Technologies*.
- Leijon, J. *et al.* (2020) 'Variable renewable energy sources for powering reverse osmosis desalination, with a case study of wave powered desalination for Kilifi, Kenya', *Desalination*, 494. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114669>.
- Leparc, J. *et al.* (2007) 'Water quality and performance evaluation at seawater reverse osmosis plants through the use of advanced analytical tools', *Desalination*, 203(1–3), pp. 243–255. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.529>.

Likhachev, D.S. and Li, F.C. (2013) 'Large-scale water desalination methods: A review and new perspectives', *Desalination and Water Treatment*. Taylor and Francis Inc., pp. 2836–2849. Available at: <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.750792>.

Lin, S. *et al.* (2021) 'Seawater desalination technology and engineering in China: A review', *Desalination*, 498, p. 114728. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114728>.

Mito, M.T. *et al.* (2023) 'Modular operation of renewable energy-driven reverse osmosis using neural networks for wind speed prediction and scheduling', *Desalination*, 567, p. 116950. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116950>.

Mohamed, E.S. *et al.* (2008) 'A direct coupled photovoltaic seawater reverse osmosis desalination system toward battery based systems - a technical and economical experimental comparative study', *Desalination*, 221(1–3), pp. 17–22. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.065>.

Monjezi, A.A. *et al.* (2020) 'Development of an off-grid solar energy powered reverse osmosis desalination system for continuous production of freshwater with integrated photovoltaic thermal (PVT) cooling', *Desalination*, 495. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114679>.

Okampo, E.J. and Nwulu, N. (2021) 'Optimisation of renewable energy powered reverse osmosis desalination systems: A state-of-the-art review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, p. 110712. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110712>.

Peñate, B. *et al.* (2011) 'Assessment of a stand-alone gradual capacity reverse osmosis desalination plant to adapt to wind power availability: A case study', *Energy*, 36(7), pp. 4372–4384. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.04.005>.

Rahimi, B. *et al.* (2021a) 'A feasibility study of solar-powered reverse osmosis processes', *Desalination*, 500. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114885>.

Razeghi, M. *et al.* (2023) 'Multi-criteria decision for selecting a wind farm location to supply energy to reverse osmosis devices and produce freshwater using GIS in Iran', *Energy Strategy Reviews*, 45. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101018>.

Reverse Osmosis (no date).

Rosales-Asensio, E. *et al.* (2019) 'Reduction of water cost for an existing wind-energy-based desalination scheme: A preliminary configuration', *Energy*, 167, pp. 548–560. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.004>.

Ruiz-García, A., Nuez, I. and Khayet, M. (2023) 'Performance assessment and modeling of an SWRO pilot plant with an energy recovery device under variable operating conditions', *Desalination*, 555. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116523>.

Sadhwani, J.J., Veza, J.M. and Santana, C. (2005) 'Case studies on environmental impact of seawater desalination', *Desalination*, 185(1–3), pp. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.02.072>.

Saleh, T.A. and Gupta, V.K. (2016) 'Membrane Fouling and Strategies for Cleaning and Fouling Control', in *Nanomaterial and Polymer Membranes*. Elsevier, pp. 25–53. Available at: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804703-3.00002-4>.

Sayyad, S.U., Kamthe, N.K. and Sarvade, S.M. (2022) 'Design and simulation of reverse osmosis process in a hybrid forward osmosis-reverse osmosis system', *Chemical Engineering Research and Design*, 183, pp. 210–220. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.05.002>.

Scrivani, A. (2005) 'Energy management and DSM techniques for a PV-diesel powered sea water reverse osmosis desalination plant in Ginostra, Sicily', *Desalination*, 183(1–3), pp. 63–72. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.02.043>.

Shahid, M.K. *et al.* (2023) 'A Review of Membrane-Based Desalination Systems Powered by Renewable Energy Sources', *Water (Switzerland)*, 15(3). Available at: <https://doi.org/10.3390/w15030534>.

Sohoni, V., Gupta, S.C. and Nema, R.K. (2016) 'A Critical Review on Wind Turbine Power Curve Modelling Techniques and Their Applications in Wind Based Energy Systems', *Journal of Energy*, 2016, pp. 1–18. Available at: <https://doi.org/10.1155/2016/8519785>.

Song, L.E.M. (1995) 'Theory of concentration polarization in crossflow filtration', *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions* [Preprint].

Source Book of Alternative Technologies for Freshwater Augmentation in Latin America and the Caribbean (no date). Available at: <http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea59e/begin.htm>.

Tan, N.P.B. *et al.* (2022) 'A review of desalination technologies and its impact in the Philippines', *Desalination*, 534, p. 115805. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115805>.

Thomson, M. and Infield, D. (no date) *Desalination 153 (2002) 1-8 A photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries*. Available at: www.elsevier.com/locate/desal.

Total dissolved solids in Drinking-water Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality (2003).

Voet, D., Voet, J.G. and Pratt, C.W. (2006) *Fundamentals of Biochemistry Fundamentals of Biochemistry Second Edition*. Available at: <http://fig.cox.miami.edu/~cmallery/150/memb/membranes.htm>.

Wijmans, J.G. and Baker, R.W. (1995) *The solution-diffusion model: a review*, *Journal of Membrane Science*.

Ye, X.-Y. *et al.* (no date) *FEDSM2009-78158 RESEARCH ON IMPROVING EFFICIENCY OF HIGH PRESSURE PUMP IN SEAWATER REVERSE OSMOSIS DESALINATION*. Available at: http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/pdfaccess.ashx?url=/data/conferences/fe_dsm2009/70317/.

Zejli, D. *et al.* (2004) 'Economic analysis of wind-powered desalination in the south of Morocco', *Desalination*, 165(SUPPL.), pp. 219–230. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.025>.