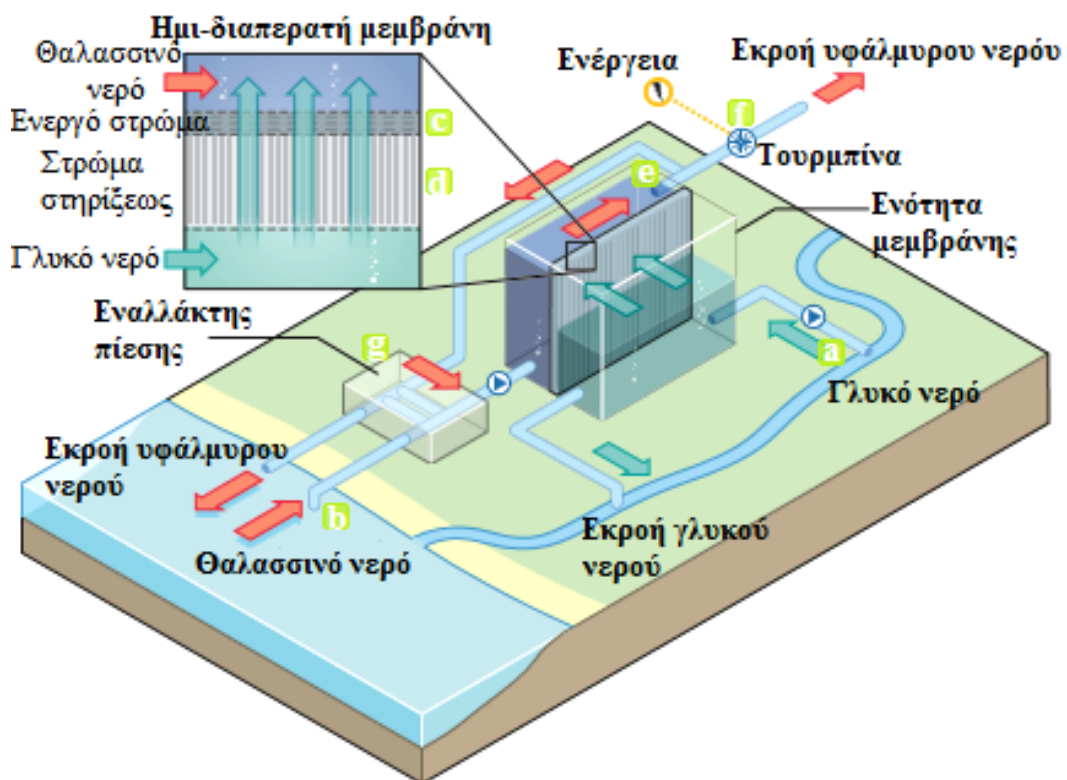




“Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη μέθοδο PRO –
Οικονομοτεχνική μελέτη ωσμωτικής μονάδας 1 MW”

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανδρέας Α. Φελέκης



Επιβλέπων καθηγητής
Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος
Αναπληρωτής καθηγητής ΤΕΙ Πειραιά

Ιούνιος 2014

Πρόλογος

Η πτυχιακή εργασία περιλαμβάνει την έρευνα μου για τη δυνατότητα κατασκευής εμπορικής ωσμωτικής μονάδας παραγωγής ενέργειας στην Ελλάδα. Έχει συνταχθεί στα πλαίσια της αποφοίτησης μου από το Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα (Τ.Ε.Ι.) Πειραιά, τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε.

Η μορφή αυτής της ενέργειας έχει δοκιμαστεί σε εργαστηριακή κλίμακα και σε πιλοτικό επίπεδο, αλλά θεωρείται ότι η ωσμωτική ενέργεια θα μπορούσε να αξιοποιηθεί σε εμπορική κλίμακα στο εγγύς μέλλον. Σκοπός αποτέλεσε η ανάλυση της εμπορικής αξιοποίησης ενός ωσμωτικού σταθμού στην Ελλάδα με τη τωρινή διαθέσιμη τεχνολογία.

Δουλεύοντας επάνω σε αυτή την ανανεώσιμη και καινοτόμα μορφή παραγωγής ενέργειας καθώς και η εντριβή που χρειάστηκε με τη φυσική, χημεία και τα μηχανολογικά στοιχεία αυτής της μορφής ενέργειας ήταν μεγάλη πρόκληση για εμένα. Συνεπώς, δεν ήταν απογοήτευση όταν στο συμπέρασμα κατέληξα ότι η εμπορική εκμετάλλευση της ωσμωτικής ενέργειας βρίσκεται, με τη σημερινή τεχνολογία και γνώση, μακριά από την πραγματοποίησή της στον ελληνικό αλλά και παγκόσμιο χώρο.

Η πρόοδος της πτυχιακής εποπτεύθηκε από τον κ. Ψωμόπουλο Κωνσταντίνο (αναπληρωτής καθηγητής ΤΕΙ Πειραιά) τον οποίο ευχαριστώ για τον συντονισμό όλων των επιμέρους παραγόντων που προσδιορίζουν το τελικό αποτέλεσμα. Τον ευχαριστώ επίσης για την ιώβειο υπομονή και κατανόηση για την καθυστέρηση της παράδοσης.

Καλή ανάγνωση!

Φελέκης Ανδρέας

Μάιος, 2014

Περίληψη

Η ωσμωτική ενέργεια είναι μια μορφή ανανεώσιμης ενέργειας υπό ανάπτυξη η οποία εκμεταλλεύεται τη διαφορά αλατότητας μεταξύ του νερού του ποταμού και του θαλασσινού νερού. Η μέθοδος βασίζεται στο φαινόμενο της ώσμωσης και ονομάζεται Παρατεταμένης-πίεσης Ώσμωση (Pressure Retarded Osmosis, PRO). Τα δύο διαλύματα διαχωρίζονται από μια ημι-διαπερατή μεμβράνη η οποία είναι διαπερατή μόνο για τα μόρια νερού σε ιδανικές συνθήκες, προκαλώντας ωσμωτική ροή ικανή να περιστρέψει έναν υδροστρόβιλο παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια.

Σε μια μονάδα που χρησιμοποιεί τη μέθοδο PRO, η παραγωγή ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη συνεχή εισροή γλυκού και θαλασσινού νερού και μια συνεχή αποβολή των υφάλμυρων εκροών από αυτή που προέκυψαν από την ανάμειξη των δυο διαλυμάτων. Η ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα του γλυκού νερού και την αλατότητα του θαλασσινού νερού. Για την κατανόηση των μεγεθών, μπορεί να θεωρηθεί ως εμπειρικός κανόνας ότι η συνεχή ροή 1 m³/s γλυκού νερού όταν αναμιχθεί με θαλασσινό νερό αλατότητας 3,5% NaCl αποφέρει περίπου 1 MW.

Αυτή η πολλά υποσχόμενη μορφή ενέργειας δεν έχει αξιοποιηθεί μέχρι σήμερα σε εμπορικό επίπεδο, αλλά μετά από αρκετές δεκαετίες ερευνών σε εργαστηριακή κλίμακα και την πρώτη πιλοτική μονάδα 4kW που τέθηκε σε λειτουργία το 2009 αποτέλεσε τον λόγο για την διερεύνηση της ικανότητας της μεθόδου PRO να λογισθεί ως αξιόπιστη και ανταγωνιστική μορφή ενέργειας σε σύγκριση με τις υπόλοιπες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η οικονομοτεχνική μελέτη ωσμωτικής μονάδας 1 MW που χρησιμοποιεί τη μέθοδο PRO, ώστε να καθοριστεί η δυνατότητα εμπορικής αξιοποίησης με τη τωρινή διαθέσιμη τεχνολογία. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε στον ποταμό Καλαμάς, στο σημείο που εκβάλλει στο Ιόνιο Πέλαγος και περιλαμβάνει την τεχνική, οικονομική, περιβαλλοντική και άλλες πλευρές της ωσμωτικής ενέργειας. Έχουν χρησιμοποιηθεί οι τελευταίες έρευνες, αναφέροντας ότι έχει επιτευχθεί τα τελευταία χρόνια και τις δυσκολίες που χρειάζεται να ξεπεραστούν. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε επικοινωνία με τις αντίστοιχες εταιρείες για τα τεχνικά χαρακτηριστικά και την κοστολόγηση του κάθε εξαρτήματος προκειμένου να καθοριστεί το κόστος κεφαλαίου. Η πτυχιακή εργασία έχει χωρισθεί σε 8 κεφάλαια για να καθοριστεί η εμπορική δυνατότητα ωσμωτικής μονάδας PRO στην Ελλάδα.

Στο **κεφάλαιο 1** πραγματοποιείται μια ανασκόπηση της ενέργειας που χρησιμοποιείται τις τελευταίες δεκαετίες και τις επιπτώσεις που έχει προκαλέσει στο περιβάλλον.

Στο **κεφάλαιο 2** πραγματοποιείται ανάλυση των διαθέσιμων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.) που χρησιμοποιούνται αναφέροντας τα πλεονεκτήματα και

τα μειονεκτήματα της κάθε μορφής ενέργειας. Το κεφάλαιο τελειώνει αναφέροντας την ωσμωτική ενέργεια όπου και δίνεται έμφαση στην μέθοδο PRO.

Στο **κεφάλαιο 3** αναλύεται το φαινόμενο της ώσμωσης καταλήγοντας στη μέθοδο PRO και την ενέργεια που απελευθερώνεται από την ανάμιξη γλυκού και θαλασσινού νερού. Η ιστορική αναφορά κρίθηκε σκόπιμη για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου.

Στο **κεφάλαιο 4** πραγματοποιήθηκε η θεωρητική ανάλυση μιας ωσμωτικής μονάδας PRO εστιάζοντας στα επιμέρους τμήματα που την αποτελούν ώστε στο τέλος του κεφαλαίου να πραγματοποιηθεί μοντελοποίηση του κύκλου λειτουργίας της ωσμωτικής μονάδας. Αναφέρονται επίσης, οι μέθοδοι σχεδιασμού που έχουν προταθεί, καθώς και οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψιν.

Στο **κεφάλαιο 5** πραγματοποιήθηκε οικονομοτεχνική μελέτη σε μια τοποθεσία που επιλέχθηκε κατάλληλη για την κατασκευή μονάδας ωσμωτικής ενέργειας PRO IMW. Όλες οι πιθανές τοποθεσίες που μπορούν να εκμεταλλευτούν την μέθοδο PRO για παραγωγή ενέργειας αναφέρθηκαν. Η τοποθεσία που επιλέχθηκε είναι ο Καλαμάς. Η μελέτη περιλαμβάνει τον σχεδιασμό στη μονάδα, το κόστος κεφαλαίου και την απώλεια ενέργειας ανά χρόνο ώστε να καθοριστεί στο τέλος του κεφαλαίου το συνολικό κόστος κεφαλαίου και η καθαρή παραγόμενη ενέργεια της μονάδας.

Στο **κεφάλαιο 6** καθορίστηκε η τιμή μονάδας ενέργειας για χρόνο απόσβεσης 15 έτη εφαρμόζοντας το κόστος κεφαλαίου και την συνολική απώλεια ενέργειας που υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 5 με σκοπό να καθοριστεί η ανταγωνιστικότητα με οικονομικά κριτήρια της τεχνολογίας PRO σε σύγκριση με τις άλλες μορφές παραγωγής ενέργειας, συμβατικές και ανανεώσιμες. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με αναφορά σε άλλες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια για μια μονάδα PRO.

Στο **κεφάλαιο 7** αναφέρονται οι αναμενόμενες εξελίξεις που αναμένονται τα επόμενα χρόνια στην τεχνολογία PRO και υπολογίζεται η τιμή μονάδας ενέργειας όταν όλες οι νέες εξελίξεις πραγματοποιηθούν. Γίνεται επίσης αναφορά στις επόμενες κινήσεις των εταιριών και συμφωνίες που έχουν συνάψει για την βελτίωση της τεχνολογίας PRO. Το κεφάλαιο καταλήγει με την ενέργεια που μπορεί να παραχθεί σε παγκόσμιο επίπεδο βάσει της παροχής γλυκού νερού.

Στο **κεφάλαιο 8** ανακεφαλαιώνεται η μέθοδος PRO και αναλύονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την οικονομοτεχνική μελέτη PRO στον ποταμό Καλαμά και τις δυσκολίες που πρέπει να ξεπεραστούν στο μέλλον. Τέλος, συμπεραίνεται η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου PRO με την τωρινή διαθέσιμη τεχνολογία στην Ελλάδα και ο ρόλος που μπορεί να συντελέσει στο εγγύς μέλλον.

Λέξεις κλειδιά: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Ωσμωτική ενέργεια, Παρατεταμένης-πίεσης Ωσμωση, Pressure Retarded Osmosis, PRO, Οικονομοτεχνική μελέτη, Ωσμωτική μονάδα.

Abstract

Osmotic power is a form of renewable energy under development which exploits the salinity gradient between fresh river water and salt sea water. The phenomenon is based in osmosis principle and called Pressure Retarded Osmosis (PRO). The two fluids are separated by a semi-permeable membrane which allows only water molecules, in the ideal situation, to pass through the membrane, causing osmotic flow capable to rotate a turbine producing electricity.

In a plant using PRO, power production can occur with continuous inflow of fresh water and sea water and continuous discharge of the brackish effluent that resulted from the mixing of the two solutions. The amount of energy produced depends on the availability of fresh water and the salinity of sea water. As a rule of thumb, the continuous flow of 1 m³/s of fresh water when mixed with sea water of salinity 3,5% NaCl yield about 1 MW.

This promising form of energy has not yet exploited on a commercial scale, but after several decades of research on laboratory and the first pilot plant of 4kW launched in 2009 was the reason to investigate the ability of PRO to be regarded as reliable and competitive form of energy compared with other renewable energy.

The purpose of thesis is the feasibility study of osmotic plant 1 MW using PRO method, in order to determine if it can be commercialize when current technology applied. The study was conducted in Kalamas river, at the point it flows in Ionio Pelagos sea and includes technical, economical, environmental and other aspects of the osmotic energy. The latest research in this field have been used, indicating what it has achieved in recent years and the difficulties that need to be overcome. Furthermore, communication took place with companies for technical characteristics and cost of each component in order to determine the capital cost. The thesis is divided in 8 chapters in order to determine the commercially possibility of a PRO plant 1 MW in Greece.

In **Chapter 1** carried out a review of the energy which is used in the last decades and the impact it has caused to the environment.

In **Chapter 2** performed an analysis of the available renewable energy sources, indicating the advantages and disadvantages of each form of energy. The chapter ends by mentioning the osmotic energy and the methods to exploit it by emphasizing in Pressure Retarded Osmosis (PRO) method.

In **Chapter 3** analyzed the phenomenon of osmosis and how it results in PRO and the energy released by the mixing of fresh and salt water. The historical reference seemed appropriate to better understand the phenomenon.

In **Chapter 4** carried out a theoretical analysis of an osmotic PRO plant focusing on the individual parts that comprise it. Also, the plant design methods that have been proposed for a PRO plant are mentioned, and the environmental constraints that need

to be taken into account. The chapter ends by modeling of the operating cycle of the unit.

In **Chapter 5** performed the feasibility study of an PRO osmotic power 1MW. All possible locations that can exploit the PRO method for energy production in Greece reported. The chosen location is Kalamas river. The study includes the plant design, the capital cost and the energy loss per year. The chapter ends by determining the total capital cost and the net energy output of the unit.

In **Chapter 6** determined the energy unit price for a depreciation period of 15 years by applying the capital cost and the total energy loss calculated in Chapter 5 to determine the economic competitiveness of PRO technology compared with other forms of energy production, conventional and renewable. The chapter concludes with reference to other studies carried out in recent years for PRO plant.

In **Chapter 7** indicated the expected developments in the next years in PRO and calculated the energy unit price when all new developments take place. Reference is also made to the next moves and agreements of firms for technology improvement of PRO. The chapter concludes with the energy that can be produced globally under the provision of freshwater.

In **Chapter 8** summarized the PRO method and analyzed the conclusions of the feasibility study in Kalamas river and the difficulties need to be overcome in the future. Finally, it is concluded the applicability of PRO in Greece and globally with the available technology and the role PRO will have in the near future.

Key-words: Power production, Renewable energy source, Osmotic energy, Pressure Retarded Osmosis, PRO, Feasibility study, Osmotic plant.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	i
Περίληψη	iii
Περιεχόμενα	vii
Πίνακες – Συντομογραφίες	x
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	
1.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	1
1.2 Κατανάλωση ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο.....	1
1.3 Παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα.....	3
1.4 Ρυπαντές και ρύποι.....	5
1.5 Έκθεση επιτροπής IPCC.....	8
Κεφάλαιο 2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	
2.1 Γενικά.....	11
2.2 Μορφές.....	11
2.3 Ηλιακή ενέργεια.....	12
2.4 Αιολική ενέργεια.....	13
2.5 Βιομάζα.....	14
2.6 Γεωθερμική ενέργεια.....	15
2.7 Υδραυλική ενέργεια.....	16
2.8 Ωκεάνια ενέργεια.....	17
2.9 Ωσμωτική ενέργεια.....	18
Κεφάλαιο 3 Παρατεταμένης-Πίεσης Ώσμωση (PRO, Pressure Retarded Osmosis)	
3.1 Ωσμωτική διαδικασία.....	23
3.2 Ιστορική ανασκόπηση του φαινομένου της ώσμωσης.....	25

3.3 Κατηγορίες ώσμωσης.....	26
3.4 Αναμιγνύοντας γλυκό και θαλασσινό νερό με τη μέθοδο PRO.....	28
3.5 Άλλοι μέθοδοι πέρα από το γλυκό και το θαλασσινό νερό.....	29

Κεφάλαιο 4 Θεωρητική ανάλυση ωσμωτικής μονάδας PRO

4.1 Κύκλος λειτουργίας PRO για παραγωγή ενέργειας.....	31
4.2 Παράμετροι των διαλυμάτων.....	33
4.3 Σύστημα πρόσληψης / αποβολής.....	34
4.4 Προκατεργασία.....	38
4.5 Ωσμωτική μεμβράνη.....	45
4.6 Εναλλάκτης πίεσης.....	55
4.7 Αντλία, υδροστρόβιλος, γεννήτρια και σωληνώσεις.....	57
4.8 Σχεδιασμός.....	68
4.9 Μοντελοποίηση.....	68
4.10 Περιβαλλοντικοί περιορισμοί.....	70

Κεφάλαιο 5 Οικονομοτεχνική μελέτη ωσμωτικής μονάδας PRO 1 MW στην Ελλάδα

5.1 Σενάριο.....	73
5.2 Τοποθεσία μονάδας.....	73
5.3 Παραγόμενη ωσμωτική ενέργεια.....	77
5.4 Ετήσια ηλεκτρική ενέργεια ωσμωτικής μονάδας 1 MW.....	78
5.5 Απαιτούμενη ποσότητα ροής.....	79
5.6 Ανάλυση των τμημάτων της ωσμωτικής μονάδας PRO.....	80
5.7 Σύστημα πρόσληψης / αποβολής.....	80
5.8 Προκατεργασία.....	86
5.9 Στοιβα μεμβρανών.....	90
5.10 Εναλλάκτης πίεσης.....	97
5.11 Αντλία, υδροστρόβιλος, γεννήτρια και σωληνώσεις.....	102

5.12 Σύνδεση στο δίκτυο.....	105
5.13 Καθαρή παραγόμενη ενέργεια.....	106
5.14 Συνολικό κόστος κεφαλαίου.....	106
Κεφάλαιο 6 Μελέτη σκοπιμότητας	
6.1 Κόστος επένδυσης.....	107
6.2 Έσοδα από την ωσμωτική μονάδα.....	107
6.3 Κόστος λειτουργίας και συντήρησης.....	107
6.4 Καθορισμός της τιμής μονάδας ενέργειας.....	107
6.5 Κατανομή της τιμής μονάδας ενέργειας.....	108
6.6 Εκτίμηση τιμής μονάδας ενέργειας από άλλες μελέτες.....	110
6.7 Σύγκριση με άλλες Α.Π.Ε.....	111
Κεφάλαιο 7 Εξελίξεις στην τεχνολογία PRO	
7.1 Παρελθόν, παρόν & μέλλον της μεθόδου PRO.....	113
7.2 Αναμενόμενες μελλοντικές εξελίξεις της τεχνολογίας PRO.....	114
7.3 Εφαρμογή σε παγκόσμιο επίπεδο.....	115
Κεφάλαιο 8 Συμπεράσματα	
8.1 Ανακεφαλαίωση και κύρια συμπεράσματα.....	117
8.2 Συμπεράσματα από τη μελέτη στον Καλαμά.....	117
8.3 Δυνατότητα εφαρμογής στην Ελλάδα.....	118
8.4 Επίλογος.....	119
Βιβλιογραφία.....	B1

Πίνακες - Συντομογραφίες

Σχήματα

Σχήμα: 2.1: Αριστερά η σχηματική απεικόνιση μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης, δεξιά μια ενδεικτική τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών.....	12
Σχήμα: 2.2: Αριστερά η σχηματική απεικόνιση ανεμογεννήτριας , δεξιά μια ενδεικτική τοποθέτηση ανεμογεννητριών.....	13
Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση μετατροπής βιομάζας με τη μέθοδο VIGC.....	14
Σχήμα 2.4: Σχηματική απεικόνιση κύκλου λειτουργίας γεωθερμικής μονάδας.....	15
Σχήμα 2.5: Αριστερά η σχηματική απεικόνιση υδροηλεκτρικού φράγματος, δεξιά το μεγαλύτερο υδροηλεκτρικό φράγμα στον κόσμο, το Three Gorges Dam (Κίνα) ισχύος 22.500MW.....	16
Σχήμα 2.6: Σχηματική απεικόνιση Αντίστροφης Ηλεκτροδιάλυσης.....	19
Σχήμα 2.7: Σχηματική απεικόνιση της διαπερατότητας της μεμβράνης.....	20
Σχήμα 2.8: Απλοποιημένο διάγραμμα μονάδας PRO.....	20
Σχήμα 3.1: Ώσμωση μεταξύ διαλύματος και διαλύτη.....	23
Σχήμα 3.2: Κατεύθυνση ροής στην FO, RO, PRO περίπτωση.....	27
Σχήμα 3.3: Κατεύθυνση ροής νερού ως συνάρτηση εφαρμοζόμενης πίεσης στην FO,RO και PRO περίπτωση.....	27
Σχήμα 4.1: Σχηματικό διάγραμμα μονάδας PRO με χρήση νερού από ποταμό και θαλασσινού νερού, ιδανικές συνθήκες.....	32
Σχήμα 4.2: Απεικόνιση της συμπίεσμνης μεταφοράς νερού.....	35
Σχήμα 4.3: Σχηματική απεικόνιση φιλτραρίσματος εγκάρσιας ροής.....	41
Σχήμα 4.4: Η διαπερατότητα σε κάθε τεχνική φιλτραρίσματος εγκάρσιας ροής. Απεικονίζεται επίσης και η διαπερατότητα με χρήση φιλτραρίσματος με σίτα.....	42
Σχήμα 4.5: Η ροή νερού και άλατος δια μέσω ωσμωτικής μεμβράνης.....	46
Σχήμα 4.6: Η ροή νερού (αριστερά) και πυκνότητα ενέργειας (δεξιά) σε σχέση με την εφαρμοζόμενη υδραυλική πίεση.....	50
Σχήμα 4.7: Απεικόνιση των παραμέτρων A,B και S σε ωσμωτική μεμβράνη στην περίπτωση PRO.....	52

Σχήμα 4.8: Μέγιστη πυκνότητα ενέργειας (W_{peak}) συναρτήσει των παραμέτρων της μεμβράνης A, B και S	53
Σχήμα 4.9: Τα εξαρτήματα και ο κύκλος λειτουργίας ενός εναλλάκτη πίεσης.....	56
Σχήμα 4.10 Αρχή λειτουργίας φυγόκεντρης αντλίας.....	59
Σχήμα 4.11: Αρχή λειτουργίας Α) περιστροφικής αντλίας, Β)παλινδρομικής αντλίας...60	
Σχήμα 4.12: Αρχή λειτουργίας στρόβιλου.....	61
Σχήμα 4.13: Απεικόνιση τομής γεννήτριας.....	65
Σχήμα 4.14: Διάγραμμα ροής ωσμωτικής μονάδας PRO σε πραγματικές συνθήκες....	68
Σχήμα 5.1: Απεικόνιση ποταμού Καλαμά και του υδάτινου διαμερίσματος.....	75
Σχήμα 5.2: Ενδεικτική χωροθέτηση ωσμωτικής μονάδας PRO στη περιοχή που εκβάλλει ο ποταμός Καλαμάς στο Ιόνιο Πέλαγος με χρήση του Google Earth.....	81
Σχήμα 5.3: Απεικόνιση των υπόγειων σηράγγων που θα μεταφέρουν το νερό εντός και εκτός της μονάδας και τα σημεία πρόσληψης και αποβολής.....	82
Σχήμα 5.4: Απεικόνιση του πύργου πρόσληψης.....	83
Σχήμα 5.5: Σύστημα πρόσληψης του θαλασσινού νερού.....	83
Σχήμα 5.6: Σύστημα αποβολής του υφάλμυρου νερού.....	84
Σχήμα 5.7: Φίλτρο περιστρεφόμενου τυμπάνου της Hubert.....	87
Σχήμα 5.8: Βασικός σχεδιασμός εγκατάστασης προκατεργασίας.....	88
Σχήμα 5.9: Στοιβες μεμβρανών.....	90
Σχήμα 5.10: Μembrάνη σπειροειδούς περιέλιξης.....	91
Σχήμα 5.11: Μembrάνη κοίλων ινών.....	91
Σχήμα 5.12: Μembrάνη σωληνωτής διάταξης.....	92
Σχήμα 5.13: Ενότητα μεμβράνης σπειροειδούς περιέλιξης.....	93
Σχήμα 5.14: Απεικόνιση έξι ενοτήτων μεμβρανών σε δοχείο πίεσης.....	93
Σχήμα 5.15: Εισροή του γλυκού και του θαλασσινού νερού στο δοχείο πίεσης.....	94
Σχήμα 5.16: Εκροή του υφάλμυρου και του γλυκού νερού.....	94
Σχήμα 5.17: Σχηματισμός στοιβας μεμβράνης.....	95

Σχήμα 5.18: Στην Α) περίπτωση είναι ανοιχτού κύκλου λειτουργία χωρίς εναλλάκτη πίεσης. Στην Β) περίπτωση είναι κλειστού κύκλου λειτουργία με εναλλάκτη πίεσης.....	98
Σχήμα 5.19: Απεικόνιση των εναλλακτών πίεσης, Α)PX-Q Series, Β)PX-S Series.....	99
Σχήμα 5.20: Τομή εναλλάκτη πίεσης PX-Q Series.....	100
Σχήμα 5.21: Τοποθέτηση εναλλακτών πίεσης ανάμεσα στον σωλήνα υφάλμυρου νερού και στον σωλήνα θαλασσινού νερού.....	100
Σχήμα 5.22: Διάγραμμα ροής προς του εναλλάκτης πίεσης στην ωσμωτική μονάδα PRO 1MW.....	101
Σχήμα 5.23: Κάτοψη του υδροστρόβιλου Ossberger.....	103
Σχήμα 6.1: Κόστος μονάδας PRO έως το 2030 και σύγκριση με άλλες ΑΠΕ.....	110
Σχήμα 7.1: Η πιλοτική μονάδα PRO της Statkraft, ισχύος 4 kW.....	114
Πίνακες	
Πίνακας 2.1: Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα χρήσης ηλιακής ενέργειας.....	12
Πίνακας 2.2: Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα χρήσης ανεμογεννητριών.....	13
Πίνακας 2.3: Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα χρήσης βιομάζας.....	14
Πίνακας 2.4: Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα χρήσης γεωθερμίας.....	15
Πίνακας 2.5: Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα χρήσης υδραυλικής ενέργειας.....	16
Πίνακας 2.6: Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα χρήσης ωκεάνιας ενέργειας.....	17
Πίνακας 2.7: Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα χρήσης ωσμωτικής ενέργειας.....	18
Πίνακας 5.1: Ποταμοί του ελληνικού χώρου που εκβάλλουν στη μεσόγειο θάλασσα...	74
Πίνακας 5.2: Τιμές από τον ποταμό Καλαμά και από το Ιόνιο Πέλαγος.....	78
Πίνακας 5.3: Κοστολόγιο των πιο συνηθισμένων υλικών κατασκευής.....	84
Πίνακας 5.4 Οι παράμετροι για τη βέλτιστη εσωτερική διάμετρο στις τρεις ροές.....	85
Πίνακας 5.5: Τα κύρια χαρακτηριστικά των δύο εναλλακτών πίεσης.....	99
Πίνακας 5.6: Οι απαιτούμενες διαμέτροι σωληνώσεων.....	104
Πίνακας 5.7: Η καθαρή παραγόμενη ενέργεια ωσμωτικής μονάδας 1 MW.....	106
Πίνακας 5.8: Το συνολικό κόστος κεφαλαίου ωσμωτικής μονάδας 1 MW.....	106
Πίνακας 6.1:Κατανομή της τιμής μονάδας ενέργειας.....	109

Πίνακας 6.2: Τιμή μονάδας ενέργειας για τις συμβατικές και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....111

Πίνακας 7.1. Ωσμωτική παραγωγή ενέργειας από μερικούς κύριους ποταμούς ανά τον κόσμο.....115

Διαγράμματα

Διάγραμμα 1.1: Κατανάλωση ενέργειας ανά ήπειρο.....2

Διάγραμμα 1.2: Κατανάλωση ενέργειας ανά τύπο παγκοσμίως.....2

Διάγραμμα 1.3: Μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, Μάρτιος 2014.....3

Διάγραμμα 1.4: Μηνιαία κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα.....4

Διάγραμμα 1.5: Ετήσια εκπομπή CO₂ ανά ήπειρο.....6

Διάγραμμα 4.1: Διάγραμμα Moody.....37

Διάγραμμα 4.2: Κατάταξη αντλιών με βάση την αρχή λειτουργίας.....58

Διάγραμμα 4.3: Βαθμός απόδοσης διαφόρων τύπων υδροστροβίλων.....63

Διάγραμμα 4.4: Εφαρμογή υδροστροβίλου ανά είδος.....64

Διάγραμμα 5.1: Μέση μηνιαία θερμοκρασία του ποταμού Καλαμά.....76

Διάγραμμα 5.2: Μέση μηνιαία αλατότητα στο Ιόνιο Πέλαγος για περίοδο ενός χρόνου.....77

Διάγραμμα 5.3: Μέση μηνιαία θερμοκρασία στο Ιόνιο Πέλαγος για περίοδο ενός χρόνου.....77

Διάγραμμα 5.4: Η μέση απαιτούμενη τιμή των ροών για παραγωγή ενέργειας 1 MW...79

Διάγραμμα 5.5: Συσχέτιση μέσης ταχύτητας και εσωτερική διαμέτρου στη περίπτωση του θαλασσινού νερού για ένα εύρος τιμών εσωτερικής διαμέτρου από 1 m – 5 m.....86

Διάγραμμα 5.6: Κόστος μεμβράνης με τη πάροδο του χρόνου.....96

Διάγραμμα 6.1: Η χρηματική ροή κατά τη διάρκεια λειτουργίας της μονάδας.....108

Διάγραμμα 6.2: Η κατανομή της τιμής μονάδας ενέργειας στην ωσμωτική μονάδα PRO 1MW.....109

Πίνακας κυριότερων συμβόλων

A	Εμβαδόν	m^2
d	Διάμετρος	m
L	Μήκος	m
Π	Ωσμωτική πίεση του διαλύματος	bar
Δπ	Διαφορά ωσμωτικής πίεσης	bar
ΔP	Διαφορά υδροστατικής πίεσης	bar
i	Αριθμός ιόντων	[-]
M	Ποσότητα NaCl στο διάλυμα	mol/L
R	Παγκόσμια σταθερά αερίων	LbarK ⁻¹ mol ⁻¹
T	Θερμοκρασία του διαλύματος	°C
J _w	Ροή του διαλύτη	m ³ /m ² s
J _s	Ροή άλατος	m ³ /m ² s
Q	Ρυθμός ροής ρευστού	m ³ /s
v	Μέση ταχύτητα ρευστού	m/s
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας	m/s ²
ρ	Πυκνότητα ρευστού	kg/m ³
H	Ύψος	m
μ	Μοριακή ελεύθερη ενέργεια	J/mol
W	Πυκνότητα ενέργειας	W/m ²

Συνομογραφίες

FO (Forward Osmosis, Ευθεία ώσμωση)

RO (Reverse Osmosis, Αντίστροφη ώσμωση)

PRO (Pressure Retarded Osmosis, Παρατεταμένης-πίεσης ώσμωση)

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η ενέργεια απέκτησε τα τελευταία χρόνια μια πολιτική διάσταση που οφείλεται στην απότομη αύξηση των τιμών από το 2000, σε συνδυασμό με τις γεωπολιτικές εντάσεις και τις πρωτοβουλίες για την προστασία του περιβάλλοντος. Συνέπεια αυτών είναι οι επιλογές των ενεργειακών πηγών και των τιμών να απασχολούν τους πολίτες στα πλαίσια της διαμόρφωσης των πολιτικών για την κοινωνία του αύριο.

1.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με την εκμετάλλευση διαφόρων πρωτογενών πηγών ενέργειας και παρουσιάζει μεγάλες διαφοροποιήσεις από χώρα σε χώρα, ανάλογα με τους διαθέσιμους εγχώριους ενεργειακούς πόρους, την ενεργειακή πολιτική της χώρας, τις γεωλογικές, γεωφυσικές και κλιματολογικές ιδιαιτερότητες αυτής^[1]. Οι πηγές παραγωγής ενέργειας διακρίνονται σε^[2,3]:

- *συμβατικές*, που βασίζονται σε ορυκτά στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα, όπως το πετρέλαιο, ο άνθρακας (λιθάνθρακας και λιγνίτης), το φυσικό αέριο,
- *πυρηνική ενέργεια*, και
- *ανανεώσιμες πηγές ενέργειας*, που χρησιμοποιούν διαχρονικές πηγές (άνεμος, ήλιος, νερό κλπ.) και δεν εξαντλούν τα περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα.

Η συνεισφορά του κάθε τύπου πηγής παραγωγής ενέργειας παγκοσμίως τις τελευταίες δεκαετίες (κεφάλαιο 1.2) και οι συνέπειες (κεφάλαιο 1.4, 1.5) αναλύονται στη συνέχεια.

1.2 Κατανάλωση ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο

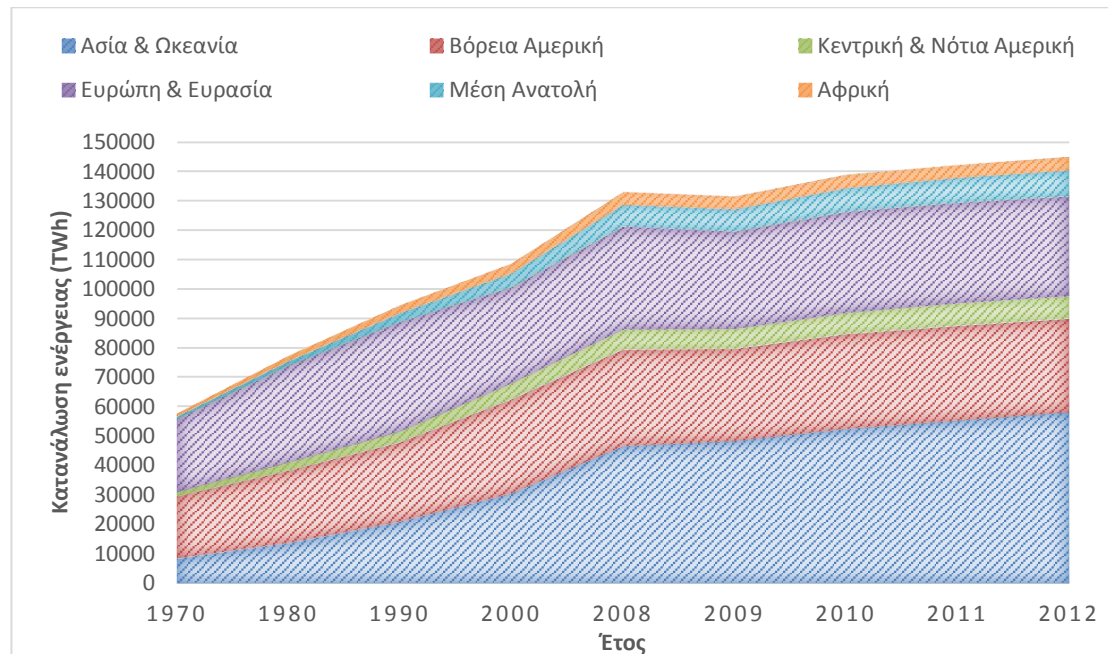
Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μετράται σε W·h (Watt·hours) Σε παγκόσμιο επίπεδο η κατανάλωση ενέργειας αυξάνει κάθε χρόνο από τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο με εξαίρεση το 2009 όπου μειώθηκε κατά -1,5%. Η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας μεγάλωσε κατά 1,4% το 2012, ρυθμός αύξησης κάτω από το μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης 2,3% που παρατηρήθηκε κατά την τελευταία δεκαετία^[4].

Οι λόγοι που έχουν οδηγήσει σε αύξηση της ανάγκης παραγωγής περισσότερης ενέργειας είναι^[5]:

- α) αύξηση του πληθυσμού,
- β) τεχνολογική ανάπτυξη και το βαθμό χρήσης των προϊόντων της,
- γ) το ύψος των ενεργειακών αναγκών,

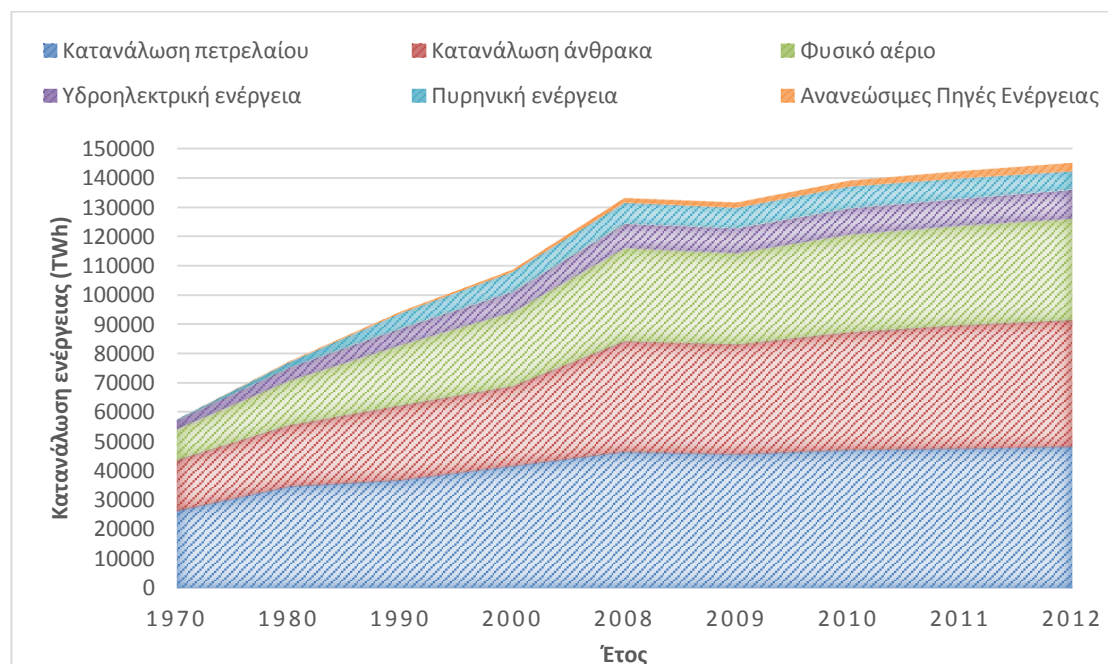
δ) τον τύπο των διαθέσιμων καυσίμων.

Στο διάγραμμα 1.1 παρουσιάζεται η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά ήπειρο για τις τελευταίες δεκαετίες.



Διάγραμμα 1.1: Κατανάλωση ενέργειας ανά ήπειρο. Πηγή: BP^[6].

Η συνεισφορά κάθε τύπου ενέργειας τις τελευταίες δεκαετίες σε παγκόσμιο επίπεδο φαίνεται στο διάγραμμα 1.2. Οι συμβατικές μορφές ενέργειας συνεισφέρουν το 87%, η πυρηνική ενέργεια το 4,5% και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας το 8,5%.



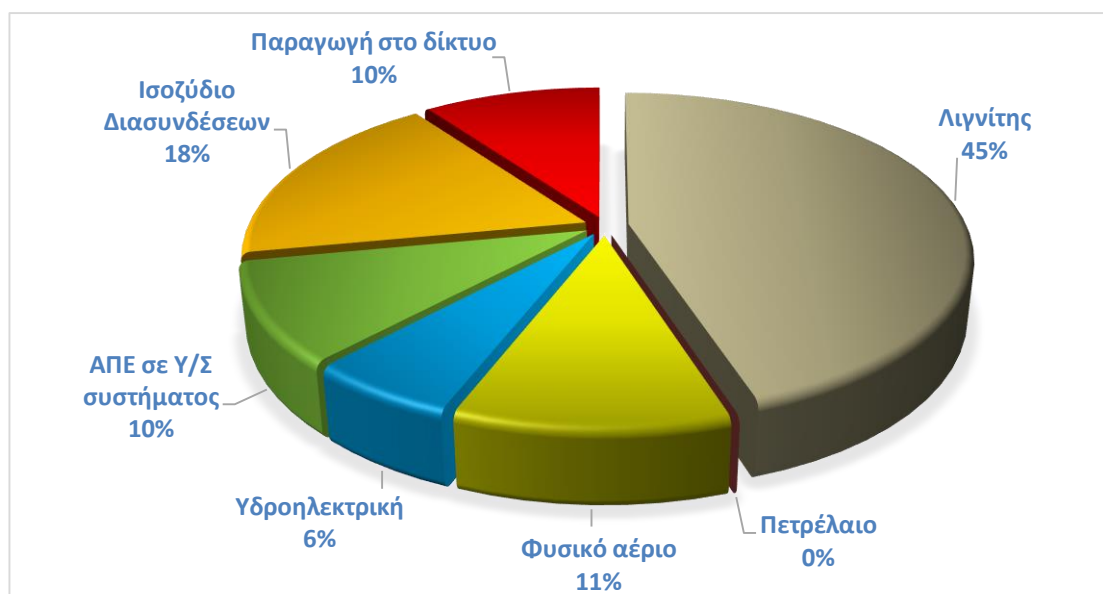
Διάγραμμα 1.2: Κατανάλωση ενέργειας ανά τύπο παγκοσμίως. Πηγή: BP^[6].

1.3 Παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα

1.3.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα

Η παραγωγή ενέργειας στην Ελλάδα προέρχεται κυρίως από θερμικούς σταθμούς. Στη περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας παράγεται το 80% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας, εκ της οποίας το 50% στο νομό Κοζάνης. Η συγκέντρωση των θερμικών ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών στο Βορρά της χώρας δημιουργεί αυξημένες απώλειες κατά τη μεταφορά και ανισορροπία στη λειτουργία. Ωστόσο ο σχεδιασμός τους βασίστηκε στην εγγύτητα τους στις περιοχές που είναι πλουτοπαραγωγικές πηγές του λιγνίτη, ο οποίος αποτελεί την καύσιμη πρώτη ύλη για αρκετούς σταθμούς^[2].

Η πιο σημαντική εγχώρια ενεργειακή πηγή είναι ο λιγνίτης, συνεισφέρει το 45% της εγχώριας παραγωγής για το Μάρτιο του 2014, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3:



Διάγραμμα 1.3: Μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, Μάρτιος 2014. Πηγή: ΑΔΜΗΕ ^[7].

Το πετρέλαιο δεν συνεισφέρει πλέον στην εγχώρια παραγωγή μετά από χρόνια μείωση που ξεκίνησε 2007, την περίοδο δηλαδή μετά την εισαγωγή του φυσικού αερίου. Η συνεισφορά του φυσικού αερίου είναι πλέον 11% και αναμένεται να αυξηθεί στο εγγύς μέλλον επειδή δίνεται έμφαση στην αύξηση του στο ενεργειακό ισοζύγιο. Ταυτόχρονα, η ανάδειξη της προστασίας του περιβάλλοντος ως στόχου υψηλής προτεραιότητας της ελληνικής πολιτείας, οδηγεί σε προώθηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, με την συνεισφορά του να είναι 10% με στόχο την αύξηση συμμετοχής στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο 20% μέχρι το 2020^[2,8].

Ωστόσο, η μελλοντική αξιοποίηση θερμικών σταθμών θα εξαρτηθεί από τη δυνατότητα των ηλεκτροπαραγωγών μονάδων άνθρακα να υιοθετήσουν καθαρές και

αποδοτικές τεχνολογίες καύσης, ώστε να προσαρμοστούν στο αυστηρό πλαίσιο των Ευρωπαϊκών προδιαγραφών για νέες εγκαταστάσεις καύσης.

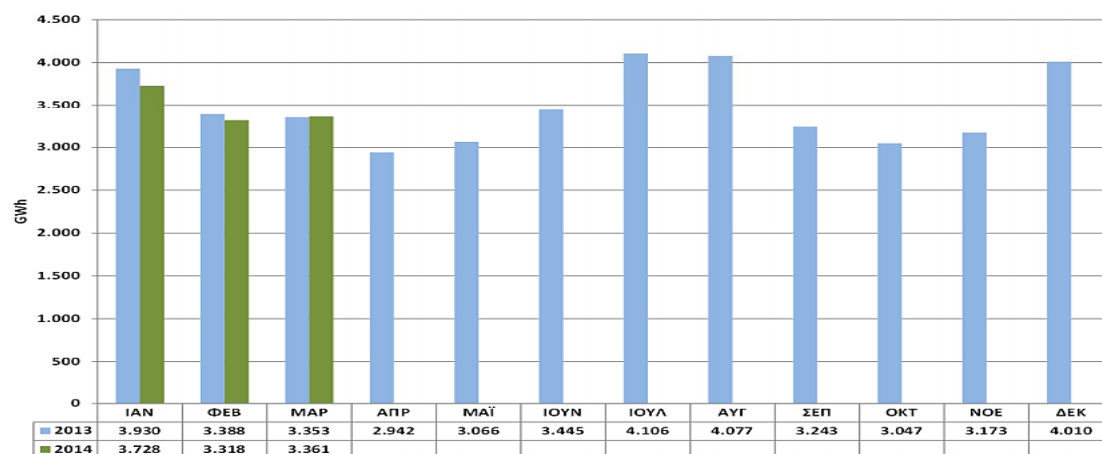
Σύμφωνα με τις γνωστές διεθνείς συμφωνίες για τη προστασία του περιβάλλοντος (όπως του Ρίο το 1992, του Κιότο το 1997, του Μπάλι το 2007, της Κοπεγχάγης του 2010) η χώρα είναι υποχρεωμένη μέχρι το 2020^[8]:

- να μειώσει τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα κατά 20% σε σύγκριση με τις εκπομπές του 1990,
- να αυξήσει τις ΑΠΕ στο ισοζύγιο ενέργειας σε 20%,
- η εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας να φθάσει το 20%

Επιστημονικές εκτιμήσεις προβλέπουν ότι ο στόχοι δύσκολα θα επιτευχθούν. Ενδεικτικό της αδυναμίας μείωσης του διοξειδίου του άνθρακα είναι και η θέση του υπουργείου Περιβάλλοντος τον Φεβρουάριο του 2014, όπου ζητά ειδική μεταχείριση για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα επειδή η οικονομική ύφεση θα υποβαθμίσει την ανταγωνιστικότητα των ενεργοβόρων βιομηχανιών^[9].

1.3.2 Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας έχει διαχρονικά αυξηθεί κατά 50% στη διάρκεια της περιόδου 1990-2006^[8]. Η μέση μηνιαία κατανάλωση στην Ελλάδα είναι περίπου 3500 GWh. Για το έτος 2013 έως τον Μάρτιο του 2014 εικονίζεται στο διάγραμμα 1.4.



Διάγραμμα 1.4: Μηνιαία κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Πηγή: ΑΔΜΗΕ ^[7].

1.4 Ρυπαντές και ρύποι

Ρύπανση είναι η επιβάρυνση του περιβάλλοντος με κάθε παράγοντα (ρύπο) που έχει βλαπτικές επιδράσεις στους οργανισμούς. Οι ρύποι παράγονται και απορρίπτονται από τους ρυπαντές, δηλαδή από πηγές ρύπανσης, κατά συντριπτική πλειονότητα από εστίες καύσης με τα κάθε είδους καυσαέρια, από διάφορες χημικές διεργασίες ως εκλυόμενα αέρια και υγρά απόβλητα καθώς και από φυσικές πηγές,

όπως ηφαιστεια, βιοαέρια από τη σήψη και χώνευση βιομάζας, γεωθερμικές πηγές κ.ά. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε ρύπους παρατηρούνται, με την έναρξη της βιομηχανικής περιόδου, όπου σημειώθηκε αύξηση της χρήσης και καύσης άνθρακα, υδρογονανθράκων καθώς και του φυσικού αερίου για την παραγωγή ενέργειας^[5].

Η ρύπανση, ανάλογα με το τμήμα της βιόσφαιρας που πλήττει, διακρίνεται σε **ατμοσφαιρική**, σε **ρύπανση των υδάτων** και σε **ρύπανση του εδάφους**. Η διάκριση όμως αυτή δεν πρέπει να θεωρείται απόλυτη, καθώς οι διάφορες μορφές ρύπανσης αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους.

1.4.1 Ατμοσφαιρική ρύπανση

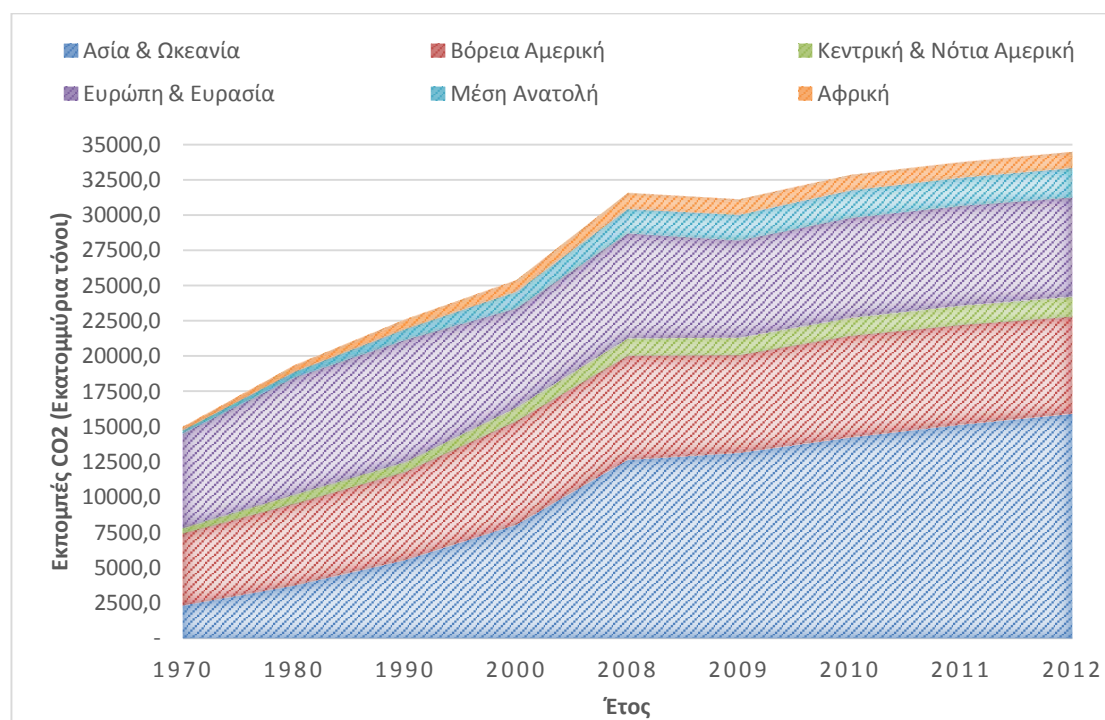
Ατμοσφαιρική ρύπανση είναι η εκπομπή ρυπογόνων ενώσεων ή και σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, όταν γίνεται με ρυθμούς ο οποίος υπερβαίνει τη δυνατότητα της ατμόσφαιρας στη συγκεκριμένη περιοχή να αυτοκαθαριστεί. Οι κυριότεροι ρύποι που εκπέμπονται κατά τη διεργασία της καύσης περιγράφονται συνοπτικά ως εξής^[10,11]:

Το διοξείδιο του θείου (SO_2 , αέριο άχρωμο και άοσμο σε χαμηλές συγκεντρώσεις) αποτελεί σοβαρότατη απειλή για την ποιότητα της ατμόσφαιρας και οι εκλυόμενες ποσότητες είναι ανάλογες με την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο.

Το διοξείδιο του αζώτου (NO_x) παίζει σημαντικό ρόλο στη δημιουργία φωτοχημικής ρύπανσης και η παραγωγή του κατά την καύση έχει να κάνει τόσο με το είδος του καυστήρα όσο και με την παροχή του οξυγόνου.

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) έχει αναχθεί στο κατεξοχήν “αέριο του θερμοκηπίου”, δηλαδή μεταβάλλει τη θερμοκρασία που προκαλείται από παγίδευση θερμικής ακτινοβολίας στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Η παγίδευση αυτή οφείλεται στην παρουσία ειδικών μορίων στην ατμόσφαιρα, τα οποία αφήνουν να διέλθει η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία, συγκρατούν όμως μέρος της θερμικής ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από τη Γη στο διάστημα.

Αποτέλεσμα είναι η σταδιακή αύξηση της μέσης θερμοκρασίας σε όλη τη Γη διαταράσσοντας τις κλιματικές ισορροπίες. Επιπρόσθετα, η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας προκαλεί την τήξη (λιώσιμο) των πάγων στις πολικές περιοχές της Γης – φαινόμενο, που καταγράφεται ήδη από το 2005 – με αναμενόμενο αποτέλεσμα την άνοδο της στάθμης των θαλασσών παγκοσμίως. Στο διάγραμμα 1.5 εικονίζεται η εκπομπή CO_2 ανά ήπειρο για τις τελευταίες δεκαετίες.



Διάγραμμα 1.5: Ετήσια εκπομπή CO₂ ανά ήπειρο. Πηγή: BP^[6].

Στην ευθύνη για τη δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου συμμετέχουν πέρα από το διοξείδιο του άνθρακα (κατά περίπου 55%), οι αλογονούχοι υδρογονάνθρακες (15%), το διοξείδιο του αζώτου (10%), το μεθάνιο (10%) και άλλες οργανικές ενώσεις (10%) με τα ποσοστά να είναι ενδεικτικά. Πάντως, αν και είναι απαραίτητο να μειωθούν, σε παγκόσμιο επίπεδο, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και των άλλων, καμία πρόβλεψη προς το παρόν δεν μπορεί να είναι απόλυτα ακριβής. Κι αυτό γιατί δεν είναι ακόμη πλήρως κατανοητή η πολυπλοκότητα των ατμοσφαιρικών φαινομένων και ιδιαίτερα ο τρόπος με τον οποίο αλληλοεπιδρούν οι παράγοντες που ευθύνονται για την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη με τους μηχανισμούς που την εξισορροπούν.

1.4.2 Ρύπανση των υδάτων

Η ρύπανση των υδάτων (σε θάλασσες, λίμνες, ποτάμια, πηγές κλπ.) προκαλείται από στερεούς ή/και υγρούς ρύπους, οι οποίοι απορρίπτονται με τα αστικά απόβλητα και απόβλητα από βιομηχανικές διεργασίες. Οι κυριότερες συνέπειες από τη ρύπανση των υδάτων αναφέρονται στη συνέχεια^[12,13].

Το θερμό νερό από τις ψυκτικές εγκαταστάσεις των πυρηνικών αντιδραστήρων και των εργοστασίων που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα, όταν διοχετεύεται σε ένα υδάτινο οικοσύστημα, μπορεί να προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας του νερού και επομένως ελάττωση της συγκέντρωσης του οξυγόνου που βρίσκεται διαλυμένο σε αυτό.

Τα αστικά λύματα που καταλήγουν μέσω των αγωγών αποχέτευσης στα υδάτινα οικοσυστήματα περιέχουν παραπροϊόντα του ανθρώπινου μεταβολισμού

(περιττώματα, σωματικές εκκρίσεις) και διάφορες ουσίες καθημερινής χρήσης όπως απορρυπαντικά, προϊόντα καθαρισμού κ.ά. Στις διαταραχές που προκαλούν τα αστικά λύματα στα υδάτινα οικοσυστήματα περιλαμβάνονται η αύξηση του μικροβιακού φορτίου τους, που μπορεί να γίνει αιτία για τη διάδοση σοβαρών νοσημάτων, και το φαινόμενο του **ευτροφισμού**. Όσον αφορά το φαινόμενο αυτό, το υδάτινο οικοσύστημα, αφού δεχτεί τα αστικά λύματα, αλλά και τα λιπάσματα που αποπλένονται από το νερό της βροχής (μόλις το 1/3 της εκάστοτε προστιθέμενης ποσότητας στο έδαφος απορροφάται από τα καλλιεργήσιμα φυτά), εμπλουτίζεται με τα νιτρικά και τα φωσφορικά άλατα που αυτά περιέχουν. Επειδή όμως οι ουσίες αυτές αποτελούν θρεπτικά συστατικά για τους υδρόβιους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς (φυτοπλαγκτόν), προκαλείται υπέρμετρη αύξηση του πληθυσμού τους. Έτσι αυξάνεται και ο πληθυσμός των μονοκύτταρων ζωικών οργανισμών (ζωοπλαγκτόν) που εξαρτώνται τροφικά από το φυτοπλαγκτόν. Με το θάνατο των πλαγκτονικών οργανισμών συσσωρεύεται νεκρή οργανική ύλη, η οποία με τη σειρά της πυροδοτεί αύξηση των αποικοδομητών, δηλαδή των βακτηρίων που την καταναλώνουν. Με την αύξηση όμως των μικροοργανισμών ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου γίνεται πολύ μεγαλύτερος από το ρυθμό παραγωγής του. Έτσι η ποσότητα του οξυγόνου που βρίσκεται διαλυμένη στο νερό γίνεται ολοένα και μικρότερη, γεγονός που πλήττει τους ανώτερους οργανισμούς του οικοσυστήματος, όπως τα ψάρια, που πεθαίνουν από ασφυξία. Το φαινόμενο του ευτροφισμού μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα και για την περίπτωση της ωσμωτικής μονάδας PRO που αναλύεται στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας εάν δεν ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα (κεφάλαιο 4.10).

Σοβαρή πηγή ρύπανσης είναι και η βιομηχανική δραστηριότητα. Στα απόβλητα της περιέχεται ένα πλήθος από διαφορετικές χημικές ουσίες – όπως είναι τα βαρέα μέταλλα (ο μόλυβδος, ο υδράργυρος, ο ψευδάργυρος κ.ά.), οι οργανικοί διαλύτες και τα πετρελαιοειδή – οι οποίες, όταν εισάγονται στα υδάτινα οικοσυστήματα, διαταράσσουν την ισορροπία τους και εγκυμονούν κινδύνους για τη ζωή των υδρόβιων οργανισμών. Ιδιαίτερα τα βαρέα μέταλλα και οι σύνθετες οργανικές ουσίες που δε διαλύονται στο νερό μπορούν να περάσουν μέσω των τροφικών αλυσίδων στον άνθρωπο, με δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία του. Το φαινόμενο αυτό κατά το οποίο αυξάνεται η συγκέντρωση τοξικών χημικών ουσιών στους ιστούς των οργανισμών καθώς προχωρούμε κατά μήκος της τροφικής αλυσίδας ονομάζεται **βιοσυσσώρευση**. Οι πιο τοξικοί όμως ρυπαντές στη βιομηχανία είναι τα διάφορα παρασιτοκτόνα και εντομοκτόνα, και φυσικά τα ραδιενεργά απόβλητα και τα παραπροϊόντα των ραδιενεργών εκρήξεων.

1.4.3 Ρύπανση του εδάφους

Το έδαφος που καλύπτει μεγάλο μέρος της επιφάνειας του πλανήτη έχει προέλθει από την αποσάθρωση πετρωμάτων η οποία προκαλείται από τον άνεμο, το νερό, τον πάγο και τη δράση των οργανισμών στη διάρκεια δεκάδων ετών. Το λεπτό στρώμα χώματος που καλύπτει την επιφάνεια του εδάφους είναι κατάλληλο για την

ανάπτυξη των φυτών αλλά και τη δράση των αποικοδομητών. Εξαιτίας όμως της ανθρώπινης δραστηριότητας το έδαφος ρυπαίνεται από τοξικές ουσίες (ραδιενεργά απόβλητα, εντομοκτόνα, βαρέα μέταλλα κ.ά.), με συνέπεια την ερημοποίηση και τη διοχέτευση των τοξικών ουσιών στα υδάτινα οικοσυστήματα ή στα υπόγεια νερά.

Η ρύπανση του εδάφους, παρά το ότι είναι εξίσου σημαντική με τη ρύπανση των υδάτων και συνδέεται με αυτή, άργησε να γίνει αντιληπτή, γιατί προχωρεί με αργότερο ρυθμό από αυτή^[12].

1.5 Έκθεση επιτροπής IPCC

Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή ή IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) είναι μια επιστημονική διακυβερνητική επιτροπή υπό την αιγίδα του Οργανισμού Ενωμένων Εθνών^[14]. Η επιτροπή αξιολογεί τις συνέπειες των κλιματικών μεταβολών που προέρχονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα μελετώντας πιθανές πολιτικές και δράσεις για την αντιμετώπιση των ενδεχόμενων κινδύνων.

Η πιο πρόσφατη έκθεση της επιτροπής (πέμπτη κατά σειρά, οι προηγούμενες κυκλοφόρησαν το 1990, 1995, 2001 και 2007) δημοσιεύτηκε σε τρία τμήματα (IPCC Working Group I/II/III) με το τελευταίο να δημοσιεύεται τον Απρίλιο του 2014^[14].

Ακολουθεί μια σύνοψη από τα τρία μέρη της πέμπτης έκθεσης για την κλιματική αλλαγή.

1.5.1 Πρώτο μέρος της πέμπτης έκθεσης

Στο πρώτο μέρος της πέμπτης έκθεσης με τίτλο «*Working Group I: The physical science basis*» εστιάζει κυρίως στις δημοσιεύσεις των τελευταίων ετών που σχετίζονται με κλιματικές αναφορές, συλλέγοντας τα δεδομένα του παρελθόντος και μέσω προσομοίωσης να προβλεφθεί η αλλαγή του κλίματος βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα. Η έκθεση περιλαμβάνει εκτενή αναφορά για την αλλαγή της στάθμης της θάλασσας, βιογεωχημικοί κύκλοι, τα σύννεφα και τα αερολύματα, καθώς και των περιφερειακών κλιματικών φαινομένων.

Η κλιματική αλλαγή, όπως αναφέρεται στην έκθεση, μπορεί να παρατηρηθεί στα πιο κρύα μέρη στον πλανήτη, όπως στην Ανταρκτική όπου είναι εμφανή η μείωση των στρωμάτων πάγου, μια μείωση που ξεκίνησε το 1980. Αποτέλεσμα της μείωσης αυτής είναι περισσότερη ενέργεια από τον ήλιο απορροφάται από τους ωκεανούς και την επιφάνεια του πλανήτη επηρεάζοντας όλο το κλιματικό περιβάλλον. Οι ωκεανοί που αυξάνουν με τη πάροδο των χρόνων θερμοκρασία εξαιτίας της μείωσης των στρωμάτων πάγου, θα συνεχίσουν ακόμη και αν σταματήσουν να αυξάνονται οι συγκεντρώσεις CO₂.

Μια ακόμη επίδραση της κλιματικής αλλαγής είναι η άνοδος της στάθμης της θάλασσας. Η άνοδος οφείλεται στην άνοδο της θερμοκρασίας της θάλασσας, το λιώσιμο των πάγων και η αλλαγή αποθήκευσης νερού στο έδαφος του πλανήτη.

Τα τρία σημεία που προκύπτουν από το πρώτο μέρος είναι:

- Πρώτον, επιβεβαιώνεται η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας ως συνέπεια της κλιματικής αλλαγής.
- Δεύτερον, αποδεικνύεται πλέον ότι οι κλιματικές αλλαγές οφείλονται κατά κύριο λόγο από τις ανθρώπινες δραστηριότητες από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα.
- Τρίτον, αποδεικνύεται ότι η συνεχή εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου επιδρά στην κλιματική αλλαγή.

Το πρώτο μέρος της έκθεσης καταλήγει ότι η μείωση της κλιματικής αλλαγής απαιτεί ουσιαστική και διαρκή μείωση των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου.

1.5.2 Δεύτερο μέρος της πέμπτης έκθεσης

Στο δεύτερο μέρος της πέμπτης έκθεσης με τίτλο «*Working Group II: Impacts, Adaption, and Vulnerability*» αξιολογείται τι είναι γνωστό και τι όχι στην επιστημονική βιβλιογραφία για τις επιπτώσεις (Impacts) της κλιματικής αλλαγής, ποιες είναι οι παρατηρούμενες επιπτώσεις και ποιοι οι μελλοντικοί κίνδυνοι, για την ευπάθεια (Vulnerability) και τη δυνατότητα και τα όρια προσαρμογής (Adaptation), ώστε να αντιμετωπίσει όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερα η κλιματική αλλαγή. Τα κεφάλαια της έκθεσης αξιολογούν τους κινδύνους και τις ευκαιρίες για τις κοινωνίες, τις οικονομίες και τα οικοσυστήματα σε όλο τον κόσμο.

Αυτό που βιώνουμε σήμερα από την κλιματική αλλαγή είναι η επίδραση στο οικοσύστημα, στην ανθρώπινη υγεία, στα αποθέματα γλυκού νερού και στην αγροκαλλιέργεια. Στον τομέα της αγροκαλλιέργειας δεν έχει υπάρξει αύξηση στις καλλιέργειες στο βαθμό που θα μπορούσε εάν δεν υπήρχε κλιματική αλλαγή. Η συνεχιζόμενη αύξηση της θερμοκρασίας των παράκτιων υδάτων έχει επιπτώσεις και στα θαλάσσια οικοσυστήματα.

Η προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή έχει ξεκινήσει να πραγματοποιείται. Αντιπλημμυρικά φράγματα και βελτιωμένες αποχέτευσεις μειώνουν το ρίσκο πλημμύρας στις μεγάλες πόλεις. Οι αγρότες καλλιεργούν τα χωράφια διαφορετικά, για παράδειγμα αλλάζοντας το χρόνο φύτευσης και για διαφορετικές ποικιλίες. Το πρόβλημα βρίσκεται στις υποανάπτυκτες χώρες που αντιμετωπίζουν ήδη πολλές προκλήσεις για να προσθέσουν και την κλιματική αλλαγή μέσα σε αυτές. Αυτό που χρειάζεται σε αυτές τις χώρες είναι η αξιοποίηση των προϋπάρχων πόρων και με τα διαθέσιμα μέσα για την προσαρμογή.

Το κύριο σημείο όλων των επιδράσεων που έχουν παρατηρηθεί μέχρι σήμερα είναι ότι πολλοί τομείς του οικοσυστήματος είναι πολύ ευαίσθητοι στην αλλαγή του κλίματος. Η έκθεση καταλήγει ότι η προσαρμογή και ο μετριασμός είναι συμπληρωματικές έννοιες. Η επίδραση της προσαρμογής μπορεί να είναι πιο βραχυπρόθεσμα και άμεση αλλά με γρήγορο μετριασμό, μπορεί να καταστήσει ευκολότερη η προσαρμογή και πιο αποτελεσματικά μακροπρόθεσμα.

1.5.3 Τρίτο μέρος της πέμπτης έκθεσης

Στο τρίτο και τελευταίο μέρος της πέμπτης έκθεσης με τίτλο «*Working Group III: Mitigation of Climate Change*» αξιολογούνται οι επιλογές για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και τις υποκείμενες τεχνολογικές, οικονομικές και θεσμικές απαιτήσεις τους. Θεσπίζει τους κινδύνους, τις αβεβαιότητες και τις ηθικές βάσεις των πολιτικών μετριασμού της κλιματικής αλλαγής σε παγκόσμιο, εθνικό και υπο-εθνικό επίπεδο, διερευνά τα μέτρα άμβλυσης του κινδύνου για όλους τους σημαντικούς τομείς και αξιολογεί τις επενδύσεις και τη χρηματοδότηση.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, το 80% των ενεργειακών αναγκών του πλανήτη καλύπτεται από ορυκτά καύσιμα. Σύμφωνα με την έκθεση, το ποσοστό θα πρέπει να μειωθεί περίπου στο ένα τρίτο έως το 2050, μέσω των ΑΠΕ και της εξοικονόμησης ενέργειας.

Όπως αναγνωρίζουν, στο τελευταίο τμήμα της έκθεσης, μια δραστική στροφή από τα ορυκτά καύσιμα στην καθαρή ενέργεια θα επιβραδύνει, αλλά ελάχιστα, την παγκόσμια ανάπτυξη. Οι ενέργειες που πρέπει να γίνουν προκειμένου να περιοριστούν σημαντικά οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου θα επιβραδύνουν την παγκόσμια κατανάλωση αγαθών και υπηρεσιών κατά 0,06% το χρόνο.

Αυτό που τονίζεται είναι η ανάγκη για τριπλασιασμό της παραγωγής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) έως τα μέσα του αιώνα που διανύουμε, διαφορετικά όπως προειδοποιεί, οι δυνητικά καταστροφικές συνέπειες από την άνοδο της παγκόσμιας θερμοκρασίας θα είναι αναπόφευκτες.

Κεφάλαιο 2

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η ανάγκη για περιορισμό της ρύπανσης του φυσικού περιβάλλοντος από την παραγωγή ενέργειας οδήγησε στην ανάπτυξη και βελτιστοποίηση των **Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ)**. Οι ΑΠΕ είναι οι φυσικοί διαθέσιμοι πόροι – πηγές ενέργειας, που υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό μας περιβάλλον, που δεν εξαντλούνται, αλλά διαρκώς ανανεώνονται και που δύνανται να μετατρέπονται σε ηλεκτρική ή θερμική ενέργεια. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε άμεσα (κυρίως για θέρμανση), είτε μετατρέπομενες σε άλλες μορφές ενέργειας (κυρίως ηλεκτρισμό ή μηχανική ενέργεια).

2.1 Γενικά

Η χρήση των Α.Π.Ε. στοχεύει στην μείωση του CO₂ και της μόλυνσης του περιβάλλοντος, εξοικονόμηση ενέργειας, παραγωγή καθαρής ενέργειας, ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και σε κοινωνικό επίπεδο, αλλαγή νοοτροπίας για την αντιμετώπιση του περιβάλλοντος. Η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ακόμη πολύ περιορισμένη σε παγκόσμια κλίμακα, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 1.2, συνεισφέροντας με 8,5% της ολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως. Στην Ελλάδα η παραγωγή από ΑΠΕ για τον μήνα Μάρτιο 2014 έφθασε στο 10% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας, παράγοντας 4328 MW^[7,15].

Η επιλογή του τύπου ΑΠΕ που είναι καταλληλότερος σε κάθε περιοχή για να χρησιμοποιηθεί προϋποθέτει ανάλυση των τοπικών συνθηκών της εκάστοτε περιοχής λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανές αρνητικές επιδράσεις που μπορεί να δημιουργηθούν στο περιβάλλον ^[16].

2.2 Μορφές

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που έχουν ήδη εφαρμογή ή αναμένονται να έχουν είναι οι ακόλουθες:

- Ηλιακή,
- Αιολική,
- Βιομάζα,
- Γεωθερμική,
- Υδραυλική,
- Ωκεάνια, και
- Ωσμωτική ενέργεια

Ακολουθεί περιληπτική αναφορά της λειτουργίας κάθε ανανεώσιμης πηγής ενέργειας ξεχωριστά και την εφαρμογή που έχουν στην Ελλάδα, εστιάζοντας στην τελευταία περίπτωση που αποτελεί και το θέμα της πτυχιακής εργασίας.

2.3 Ηλιακή ενέργεια

2.3.1 Γενικά

Η ηλιακή ενέργεια που εκπέμπεται υπό τη μορφή ηλιακής ακτινοβολίας αξιοποιείται με την μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια. Για την επίτευξη της μετατροπής αυτής χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκά συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρισμό με τη χρήση φωτοβολταϊκών κυψελών ή συστοιχιών. Η φωτοβολταϊκή κυψέλη είναι ένα σύστημα δύο ημιαγωγικών στρωμάτων σε επαφή, το οποίο όταν φωτίζεται εμφανίζει στα άκρα του συνεχή ηλεκτρική τάση. Τα δύο στρώματα αποτελούνται από το ίδιο υλικό, το ένα στρώμα ημιαγωγός τύπου n και το άλλο τύπου p ^[16,17].



Σχήμα: 2.1: Αριστερά σχηματική απεικόνιση φωτοβολταϊκής κυψέλης, δεξιά μια ενδεικτική τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών. Ανάκτηση από ^[18,19].

2.3.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μηδενική εκπομπή CO ₂	Υψηλό κόστος κατασκευής
Αθόρυβη λειτουργία	Χαμηλή απόδοση (<20%)
Μηδενικό κόστος παραγωγής ενέργειας	Περιορίζεται από την ηλιοφάνεια
Ελάχιστη συντήρηση	
Δυνατότητα επέκτασης	
Δυνατότητα οικιακής αξιοποίησης	

Πίνακας 2.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης ηλιακής ενέργειας ^[16,17].

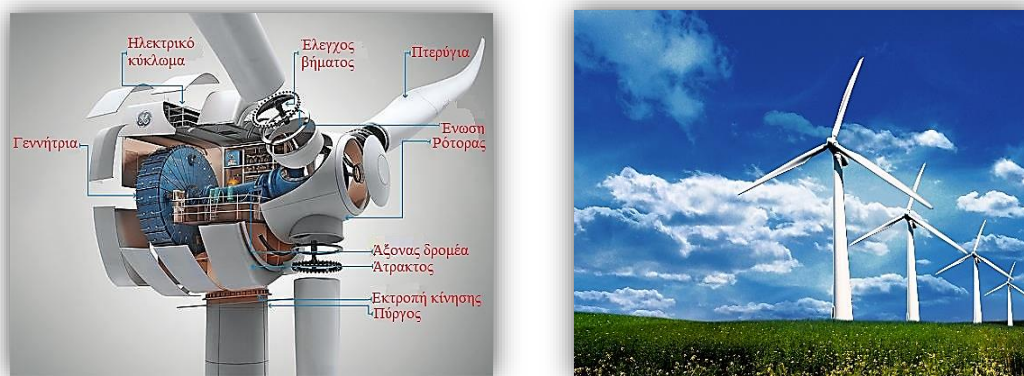
2.3.3 Εφαρμογή στην Ελλάδα

Η εφαρμογή των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα πραγματοποιείται με φωτοβολταϊκά πάρκα σε πολλές περιοχές της χώρας, και την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε καινούργια ή και παλαιότερα σπίτια. Η καθαρή ισχύς έφθασε τα 2424 MW τον Μάρτιο 2014. Η συνεισφορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο ισοζύγιο ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια κυρίως με εγκατάσταση νέων μεγάλων φωτοβολταϊκών πάρκων ^[15,20,21].

2.4 Αιολική ενέργεια

2.4.1 Γενικά

Η αιολική ενέργεια δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, γιατί η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μια περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας έτσι τους ανέμους. Ο άνεμος περιστρέφει τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας, τα οποία είναι συνδεδεμένα με ένα περιστρεφόμενο άξονα. Ο άξονας περνάει μέσα σε ένα κιβώτιο μετάδοσης της κίνησης όπου αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής. Το κιβώτιο συνδέεται με έναν άξονα μεγάλης ταχύτητας περιστροφής ο οποίος κινεί μια γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Αν η ένταση του ανέμου ενισχυθεί πάρα πολύ, η τουρμπίνα έχει ένα φρένο που περιορίζει την υπερβολική αύξηση περιστροφής των πτερυγίων για να περιοριστεί η φθορά της και να αποφευχθεί η καταστροφή της^[16,22].



Σχήμα: 2.2: Αριστερά σχηματική απεικόνιση ανεμογεννήτριας, δεξιά μια ενδεικτική τοποθέτηση ανεμογεννητριών. Ανάκτηση από ^[23,24].

2.4.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μηδενική εκπομπή CO ₂	Υψηλό κόστος κατασκευής & συντήρησης
Μηδενικό κόστος παραγωγής ενέργειας	Θόρυβος από την λειτουργία
Μικρό μέρος γης	Περιορίζεται από τον άνεμο
Δυνατότητα οικιακής αξιοποίησης	Πιθανοί τραυματισμοί πουλιών από τα περιστρεφόμενα πτερύγια
Τεχνολογικά ώριμη ενεργειακή επιλογή	
Πληθώρα διαστάσεων ανεμογεννήτριας	

Πίνακας 2.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης ανεμογεννητριών^[16,22].

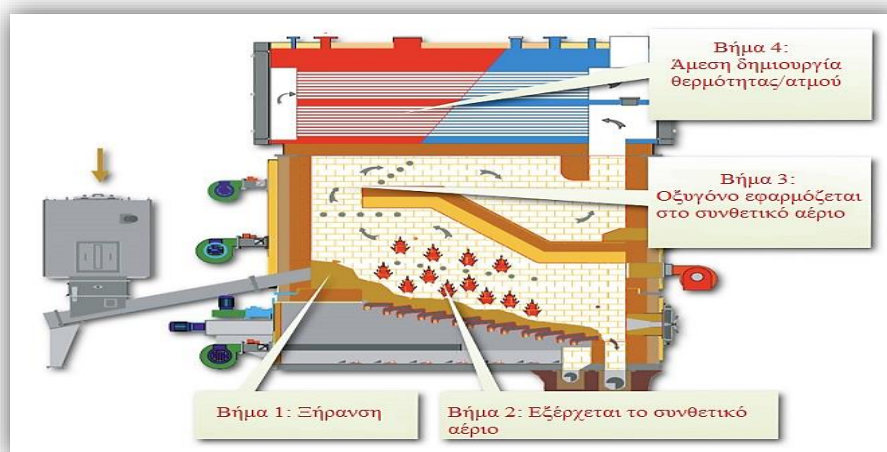
2.4.3 Εφαρμογή στην Ελλάδα

Τα αιολικά πάρκα στην Ελλάδα εκτείνονται κατά μήκος της ακτογραμμής αλλά και στα νησιά. Η ισχύς έφθασε τα 1539,6 MW τον Μάρτιο 2014. Τα επόμενα χρόνια αναμένεται ακόμη μεγαλύτερη συνεισφορά στο ισοζύγιο ενέργειας^[15,25].

2.5 Βιομάζα

2.5.1 Γενικά

Με τον όρο βιομάζα χαρακτηρίζεται οποιοδήποτε υλικό παράγεται από ζωντανούς οργανισμούς (ξύλο, υπολείμματα καλλιεργειών, κτηνοτροφικά απόβλητα, απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων κ.λπ.) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας. Αποτελεί μια δεσμευμένη και αποθηκευμένη μορφή της ηλιακής ενέργειας και είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτικών οργανισμών. Η χλωροφύλλη των φυτών μετασχηματίζει την ηλιακή ενέργεια με μια σειρά διεργασιών, χρησιμοποιώντας ως βασικές πρώτες ύλες διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα καθώς και νερό και ανόργανα συστατικά από το έδαφος. Από τη στιγμή που σχηματίζεται η βιομάζα, μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας^[16,26].



Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση μετατροπής βιομάζας ^[27].

2.5.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μηδενικό ισοζύγιο CO ₂	Δαπανηρή εγκατάσταση & εξοπλισμός
Διευκόλυνση απόρριψης σκουπιδιών	Περιορισμός στη χρήση παγκοσμίως
	Μεγάλος όγκος ανά μονάδα ενέργειας
	Μεγάλη περιεκτικότητα υγρασίας
	Μεγάλη διασπορά & εποχιακή παραγωγή

Πίνακας 2.3: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης βιομάζας ^[16,26].

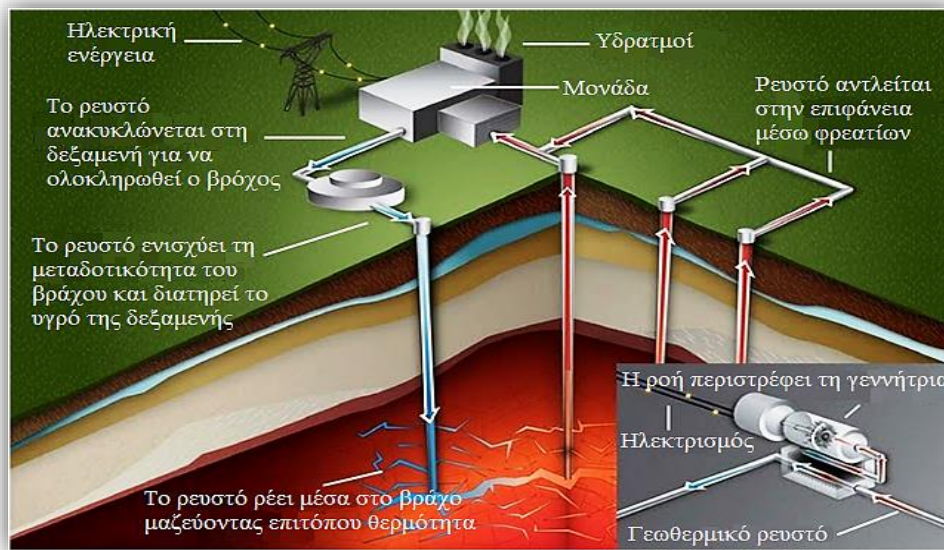
2.5.3 Εφαρμογή στην Ελλάδα

Η καθαρή ηλεκτρική ισχύς βιομάζας έφθασε τα 46,8 MW τον Μάρτιο 2014 ενώ στην Ευρώπη συνεισφέρει το 60% της συνολικής παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας. Οι προοπτικές λόγω του μεγάλου δυναμικού στην Ελλάδα είναι ελπιδοφόρες για μεγαλύτερη συνεισφορά στα επόμενα χρόνια^[15,28].

2.6 Γεωθερμική ενέργεια

2.6.1 Γενικά

Με τον όρο γεωθερμική ενέργεια περιγράφεται η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης και η δυνατότητα αξιοποίησης της εξαρτάται από τη γεωλογία κάθε περιοχής. Η γεωθερμία αξιοποιεί το τμήμα της γήινης θερμότητας που είναι αποθηκευμένο με τη μορφή θερμού νερού, ατμού ή θερμών πετρωμάτων, όταν αυτό βρίσκεται στα πρώτα τρία χιλιόμετρα από την επιφάνεια της γης. Το κριτήριο για να καθοριστεί ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας είναι ο ρυθμός και η δυνατότητα πλήρους επαναφόρτισης ενός γεωθερμικού συστήματος^[16,29].



Σχήμα 2.4: Σχηματική απεικόνιση κύκλου λειτουργίας γεωθερμικής μονάδας^[30].

2.6.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Απεριόριστη μορφή ενέργειας	Περιορισμός το βάθος εκμετάλλευσης
Συνεχή παροχή ενέργειας	Εκπομπές τοξικών αερίων
Μικρό λειτουργικό κόστος	Θερμική ρύπανση
Μικρή απαίτηση γης	Δαπανηρή εγκατάσταση & εξοπλισμός
Υψηλός συντελεστής λειτουργίας (>90%)	Σχηματισμός επικαθίσεων

Πίνακας 2.4: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης γεωθερμίας^[16,29].

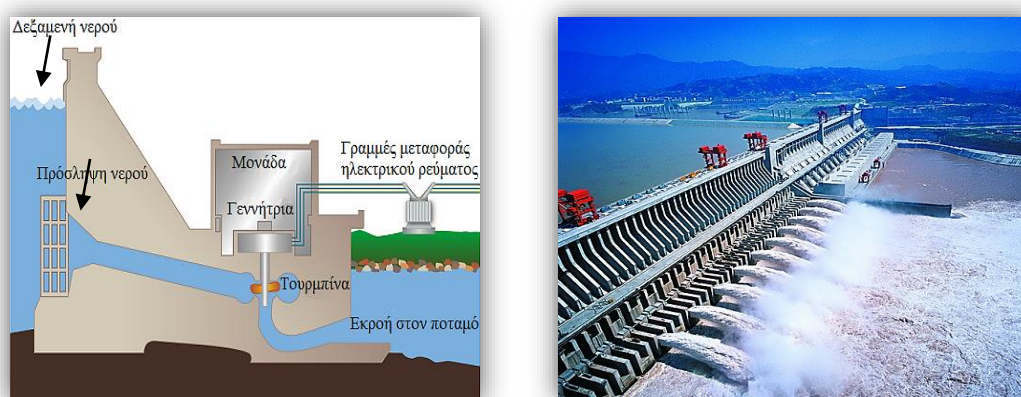
2.6.3 Εφαρμογή στην Ελλάδα

Ο Ελλαδικός χώρος διαθέτει, λόγω κατάλληλων γεωλογικών συνθηκών, σημαντικές γεωθερμικές πηγές ακόμη και σε βάθη 1000-1500 μέτρα. Υπάρχουν ορισμένες δυνατότητες για αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας για ηλεκτρική παραγωγή σε αρκετές περιοχές σε όλη τη χώρα. Η καθαρή ισχύς έφθασε τα 98,1 MW τον Μάρτιο 2014^[15,29,31].

2.7 Υδραυλική ενέργεια

2.7.1 Γενικά

Ως υδραυλική ενέργεια νοείται η ενέργεια που αποταμιεύεται ως δυναμική ενέργεια μέσα σε βαρυτικό πεδίο από τη συσσώρευση μεγάλων ποσοτήτων νερού σε υψομετρική διαφορά από τη συνέχιση της ροής του ελεύθερου νερού. Για την επίτευξη κατασκευάζεται φράγμα που συγκρατεί την απαιτούμενη ποσότητα νερού στον δημιουργούμενο ταμιευτήρα. Η κίνηση του νερού λόγω διαφοράς μανομετρικού ύψους είναι μεταξύ σημείων εισόδου και εξόδου του φράγματος με το νερό να κινεί ένα στρόβιλο κατά τη διέλευση του από τον αγωγό θέτοντας σε κίνηση μια τουρμπίνα και αυτή με τη σειρά της τη γεννήτρια. Η παραγωγή της ενέργειας αυτή γίνεται σε πολλά μέρη του κόσμου που είναι πλούσια σε ποταμούς και με ανάγλυφο εδάφους τέτοιο ώστε, να χρησιμοποιείται εύκολα η βαρυτική ενέργεια^[16,34].



Σχήμα 2.5: Αριστερά σχηματική απεικόνιση υδροηλεκτρικού φράγματος, δεξιά το μεγαλύτερο υδροηλεκτρικό φράγμα στον κόσμο, το Three Gorges Dam (Κίνα) ισχύος 22.500MW. Ανάκτηση από ^[32,33].

2.7.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μηδενική εκπομπή CO ₂	Μεγάλο κόστος κατασκευής & εξοπλισμού
Άμεση παροχή ενέργειας όταν ζητηθεί	Μεγάλος χρόνος αποπεράτωσης του έργου
Ευνοεί στην ύδρευση, άρδευση	Αλλοίωση του τοπικού περιβάλλοντος
Μακρόχρονη λειτουργία (>50 έτη)	Μακρόχρονη απόσβεση

Πίνακας 2.5: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης υδραυλικής ενέργειας ^[16].

2.7.3 Εφαρμογή στην Ελλάδα

Σε αρκετά σημεία στη χώρα υπάρχουν κάποιες παραδοσιακές, αλλά και σύγχρονες εγκαταστάσεις μικρών υδροηλεκτρικών έργων οι οποίες αξιοποιούν την ενέργεια του νερού για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η καθαρή ισχύς είναι 3060 MW και με ολοκληρωμένη ανάπτυξη των υδροηλεκτρικών, μπορεί να καλυφθεί πάνω από 20% των ηλεκτροενεργειακών αναγκών ^[15,34].

2.8 Ωκεάνια ενέργεια

2.8.1 Γενικά

Οι ωκεανοί μπορούν να παρέχουν μηχανική ενέργεια από τα παλιρροιακά κύματα (**Παλιρροϊκή ενέργεια**), τα θαλάσσια κύματα (**Κυματική ενέργεια**) καθώς και από την θερμότητα του νερού των ωκεανών (**Θερμική ενέργεια**). Τα παλιρροιακά κύματα επηρεάζονται από την έλξη του φεγγαριού και του ήλιου, ενώ οι άλλες δύο περιπτώσεις προέρχονται από τον ήλιο. Η παλιρροϊκή ενέργεια εκμεταλλεύεται τη διαφορά στάθμης της θάλασσας με χρήση υδροστρόβιλων σε φράγμα στο σημείο που εκβάλλει ο ποταμός στη θάλασσα. Η κυματική ενέργεια παράγει ενέργεια με τη χρήση ταλαντευόμενων στηλών νερού οι οποίες επιπλέουν και κινούνται από τα κύματα. Τέλος, η θερμική ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί με την εκμετάλλευση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του θερμότερου επιφανειακού νερού και του ψυχρότερου νερού του πυθμένα, με διαφορά θερμοκρασίας άνω των $3,5^{\circ}\text{C}$ ^[16,35-37].

2.8.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης ωκεάνιας ενέργειας είναι:

Είδος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Παλιρροϊκή	Προβλέψιμη ενέργεια	Υψηλό αρχικό κόστος
	Χαμηλό λειτουργικό κόστος	Κόστος μεταφοράς ενέργειας
	Δυνατότητα επέκτασης	Διαβρωτικότητα περιβάλλοντος
	Μηδενική εκπομπή CO ₂	Διάβρωση εξοπλισμού
	Υψηλή απόδοση	
Κυματική	10 φορές περισσότερη ενέργεια από την παλιρροϊκή	Υψηλός θόρυβος και οπτική ενόχληση
	Προβλέψιμη ενέργεια	Υψηλό κατασκευαστικό κόστος
	Μεγάλο εύρος αξιοποίησης	Δυσκολία συντήρησης & ελέγχου
	Μηδενική εκπομπή CO ₂	Διάβρωση εξοπλισμού
	Υψηλή απόδοση	Κόστος μεταφοράς ενέργειας
Θερμική	Χαμηλό λειτουργικό κόστος	Υψηλό αρχικό κόστος
	Μηδενική εκπομπή CO ₂	Απαιτείται μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας
	Συνεχή παροχή ενέργειας	Διάβρωση εξοπλισμού
	Υψηλή απόδοση	

Πίνακας 2.6: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης ωκεάνιας ενέργειας ^[16,35-37].

2.8.3 Εφαρμογή στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα δεν υπάρχει αξιόλογη ερευνητική δραστηριότητα, λόγω του μικρού σχετικά δυναμικού, αλλά έχει τη δυνατότητα να καλύψει τις ανάγκες στα νησιά του Αιγαίου σε ποσοστό 85-90%^[38].

2.9 Ωσμωτική ενέργεια

2.9.1 Γενικά

Η ανάμειξη γλυκού και θαλασσινού νερού απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας, όπως συμβαίνει όταν ένα ποτάμι εκβάλει στον ωκεανό. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται *ωσμωτική ενέργεια* (ή *γαλάζια ενέργεια*) και ανακτάται όταν το νερό του ποταμού και το θαλασσινό νερό είναι διαχωρισμένα από μια ημι-διαπερατή μεμβράνη και το γλυκό νερό περνάει μέσω αυτής.

Η ενέργεια είναι αποτέλεσμα της αλλαγής της εντροπίας από την διαφορά αλατότητας μεταξύ του νερού του ποταμού με το θαλασσινό νερό. Η πρόκληση είναι η αξιοποίηση αυτής της ενέργειας, καθώς από την ανάμειξη που πραγματοποιείται αυξάνεται ελάχιστα τοπικά η θερμοκρασία του νερού. Σε ένα σύστημα που περιέχει νερό του ποταμού και θαλασσινό νερό η μέγιστη πίεση που μπορεί θεωρητικά να δημιουργηθεί είναι της τάξης των 26bar. Προϋπόθεση για την επίτευξη της πίεσης είναι η διατήρηση σε σταθερή τιμή της έντασης της πίεσης του θαλασσινού νερού^[39,40].

Οι μέθοδοι για την μετατροπή αυτής της ενέργειας σε ηλεκτρισμό χρησιμοποιώντας ημι-διαπερατές μεμβράνες είναι: η *Αντίστροφη Ηλεκτροδιάλυση (Reverse Electrodialysis, RED)* και η *Παρατεταμένης-πίεσης Ώσμωση (Pressure Retarded Osmosis, PRO)*^[41,42].

Η δεύτερη περίπτωση (PRO, Παρατεταμένη-πίεσης Ώσμωση) θα αναλυθεί εκτενώς στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας και θα καθοριστεί η δυνατότητα εφαρμογής της στην Ελλάδα λαμβάνοντας υπόψη την τωρινή διαθέσιμη τεχνολογία της μεθόδου, καθορίζοντας τον κόστος κεφαλαίου για μια μονάδα 1 MW.

2.9.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Και στις δύο περιπτώσεις της ωσμωτικής ενέργειας, όπως συμπεραίνεται από την μελέτη της πτυχιακής εργασίας, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης είναι:

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μηδενική εκπομπή CO ₂	Μικρή τεχνολογική πρόοδος
Συνεχή & σταθερή παροχή ενέργειας	Υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης
Χαμηλό λειτουργικό κόστος & συντήρησης	Λίγη ενέργεια ανά κυβικό μέτρο μεμβράνης
Ευέλικτη μονάδα ως προς τον σχεδιασμό	Δεν είναι ακόμη εμπορικά αξιοποιήσιμη
Κατάλληλη για μικρές & μεγάλες μονάδες	

Πίνακας 2.7: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης ωσμωτικής ενέργειας ^[39,43,44].

Ακολουθεί στην συνέχεια μια περιγραφή για τις δύο περιπτώσεις ωσμωτικής ενέργειας, *Αντίστροφη Ηλεκτροδιάλυση (RED)* και *Παρατεταμένης-πίεσης Ώσμωση (PRO)*.

2.9.4 Αντίστροφη Ηλεκτροδιάλυση (RED)

Η **Αντίστροφη Ηλεκτροδιάλυση (Reverse Electrodialysis, RED)**^[45-47], επικεντρώνεται στην θεωρία της ηλεκτροδιάλυσης, όπου ιόντα αλατιού μεταφέρονται από το ένα διάλυμα, μέσω μεμβρανών ανταλλαγής ιόντων, προς το άλλο διάλυμα κάτω από την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου. Οι μεμβράνες ανταλλαγής ιόντων είναι δύο τύπων: η *μεμβράνη ανταλλαγής κατιόντων* (Cation Exchange Membrane, CEM) και η *μεμβράνη ανταλλαγής ανιόντων* (Anion Exchange Membrane, AEM). Το θαλασσινό και το γλυκό νερό εισρέουν σε μια στοίβα εναλλασσόμενων καθόδων και ανόδων μεμβρανών ανταλλαγής ιόντων.



Σχήμα 2.6: Σχηματική απεικόνιση Αντίστροφης Ηλεκτροδιάλυσης (RED). Πηγή ^[48].

Κατά τη διάρκεια της ροής, τα ιόντα Na^+ διαπερνούν μέσω των μεμβρανών ανταλλαγής κατιόντων προς την κατεύθυνση της καθόδου και τα ιόντα Cl^- διαπερνούν μέσω των μεμβρανών ανταλλαγής ανιόντων προς την κατεύθυνση της ανόδου. Το διάλυμα στη πλευρά της ανόδου είναι αρνητικά φορτισμένο, λόγω της μεταφοράς των αρνητικών ιόντων Cl^- προς την άνοδο. Η ηλεκτρική ουδετερότητα του διαλύματος στη πλευρά της καθόδου διατηρείται μέσω αναγωγής στην επιφάνεια της καθόδου, και στη πλευρά της ανόδου μέσω οξείδωσης στην επιφάνεια της ανόδου. Ως αποτέλεσμα, ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να μεταφερθεί από την άνοδο προς την κάθοδο μέσω ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος. Αυτό το ηλεκτρικό ρεύμα και η διαφορά δυναμικού πάνω από τα ηλεκτρόδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η κινητήρια δύναμη για τη μετακίνηση των ιόντων είναι η διαφορά στην ελεύθερη ενέργεια μεταξύ της συμπυκνωμένης και της αραιωμένης πλευράς του διαλύματος. Η διαφορά δυναμικού επί των ηλεκτροδίων είναι ίση με τη διαφορά δυναμικού του γινομένου της διαφοράς δυναμικού στη μεμβράνη και τον αριθμό των μεμβρανών.

Για την αξιοποίηση αυτής της ενέργειας έχει ασχοληθεί μέχρι στιγμής η εταιρία REDstack^[49] στην Ολλανδία έχοντας θέσει σε λειτουργία μονάδα 50kW με το επόμενο βήμα να είναι η κατασκευή μονάδας RED ισχύος 1 MW.

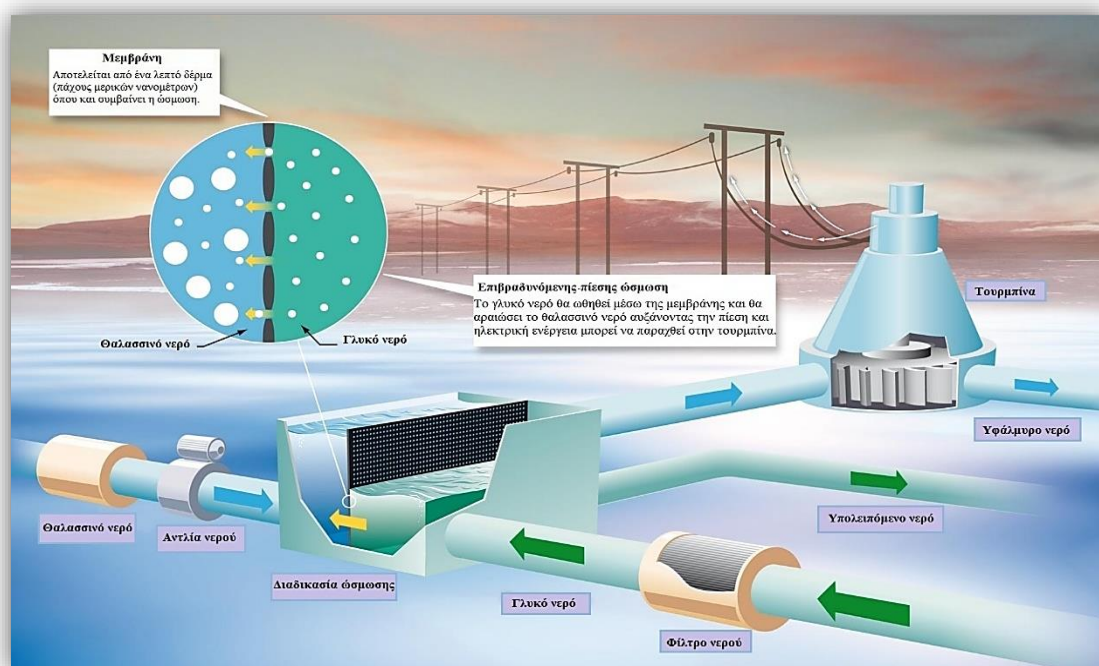
2.9.5 Παρατεταμένης-Πίεσης Ώσμωση (PRO)

Η μέθοδος της **Παρατεταμένης-πίεσης Ώσμωση** (PRO, Pressure Retarded Osmosis) [39,41,43,44,50-55], εξάγει ενέργεια όταν δυο διαλύματα με διαφορετικές τιμές αλατότητας (συνήθως το νερό του ποταμού με το θαλασσινό νερό) διαχωρίζονται από μια ημι-διαπερατή μεμβράνη, η οποία αποτελείται από πορώδες στρώμα με μικρές οπές. Η μεμβράνη επιτρέπει μικρά μόρια, όπως τα μόρια του νερού, να διαπεράσουν μέσω αυτής. Τα μόρια άλατος, άμμου, λάσπης και άλλες προσμείξεις δεν μπορούν να διαπεράσουν στην αντίθετη πλευρά της μεμβράνης.



Σχήμα 2.7: Σχηματική απεικόνιση της διαπερατότητας της μεμβράνης. Πηγή^[56].

Το νερό επιδιώκει να μειώσει την συγκέντρωση άλατος στην πλευρά της μεμβράνης που περιέχει το περισσότερο αλάτι. Το νερό για αυτό τον λόγο ρέει δια μέσω της μεμβράνης και αυξάνει την πίεση στην πλευρά του θαλασσινού νερού. Η πίεση αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας με την κίνηση υδροστρόβιλου παράγοντας ηλεκτρισμό^[55,57-59].



Σχήμα 2.8: Απλοποιημένο διάγραμμα μονάδας PRO. Πηγή^[60].

Το γλυκό νερό εισέρχεται στη μονάδα (πράσινο βέλος) και φιλτράρεται πριν καταλήξει στη μεμβράνη. Το 80-90% του γλυκού νερού μεταφέρεται δια μέσω της μεμβράνης, εξαιτίας του φαινομένου της ώσμωσης, στην πλευρά της μεμβράνης που περιέχει θαλασσινό νερό σε υψηλότερη πίεση. Το φαινόμενο της ώσμωσης αυξάνει την ογκομετρική ροή του νερού με υψηλή πίεση με αποτέλεσμα την παραγωγή ενέργειας με την περιστροφή του ρομπότ.

Το θαλασσινό νερό αντλείται από τη θάλασσα και φιλτράρεται πριν τροφοδοτηθεί στη πλευρά της μεμβράνης όπου καταλήγει και το γλυκό νερό από το φαινόμενο της ώσμωσης. Για την επίτευξη μεγάλης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας η πίεση λειτουργίας θα πρέπει να είναι από 11 έως 15 bars.

Εκτιμάται ότι αυτό το είδος ανανεώσιμης ενέργειας έχει τη δυνατότητα από την ανάμειξη του γλυκού με του θαλασσινού νερού στις εκβολές να παράγει 1650 TWh το χρόνο παγκοσμίως, δηλαδή περίπου το 13% της τωρινής παγκόσμιας καταναλωμένης ενέργειας. Η παραγωγή ενέργειας από PRO έχει υψηλή απόδοση και έχει παραγωγική ικανότητα λειτουργίας περισσότερη από 7000 ώρες το χρόνο.

Παρά τις δυνατότητες, η ανάπτυξη ωσμωτικής μονάδας έχει εμποδιστεί από την έλλειψη μεμβράνης με υψηλή απόδοση για την διαδικασία PRO και σε χαμηλή τιμή^[50,61]. Η εφαρμογή εμπορικά διαθέσιμων μεμβρανών που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές αφαλάτωσης είναι μη αποδοτικές παράγοντας λίγη ενέργεια. Για να θεωρηθεί ανταγωνιστική με οικονομικά κριτήρια η ωσμωτική μονάδα έναντι των άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας πρέπει η πυκνότητα ενέργειας της μεμβράνης να είναι τουλάχιστον 5W/m^2 . Προς το παρόν, καμία μεμβράνη δεν έχει ξεπεράσει τα 3.5W/m^2 πυκνότητα ενέργειας με χρήση γλυκού και θαλασσινού νερού^[62].

Η μορφή αυτή ανανεώσιμης ενέργειας δεν χρησιμοποιείται ακόμη για εμπορική χρήση, αλλά οι εξελίξεις τα τελευταία χρόνια οδήγησαν σε νέες μελέτες παραγωγής ενέργειας με τη μέθοδο PRO σε εργαστηριακή κλίμακα^[41]. Οι μελέτες κατέληξαν ότι η μέθοδος PRO είναι μια υποσχόμενη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας στο μέλλον.

Η πτυχιακή εργασία θα αναλύσει εάν η ωσμωτική ενέργεια με τη μέθοδο PRO είναι αξιόπιστη με τη τωρινή διαθέσιμη τεχνολογία για εμπορική χρήση με εφαρμογή στον ελληνικό χώρο. Σε αντίθεση με την εργαστηριακή κλίμακα, η μονάδα ωσμωτικής ενέργειας απαιτεί εύρεση κατάλληλης τοποθεσίας και μεγάλη υποδομή. Η ερώτηση που πρέπει να απαντηθεί είναι εάν αποτελεί συμφέρουσα με οικονομικά κριτήρια λύση όταν το κόστος κεφαλαίου και της υποδομής συμπεριλαμβάνονται στα έξοδα της μονάδας. Αυτό είναι το θέμα της πτυχιακής.

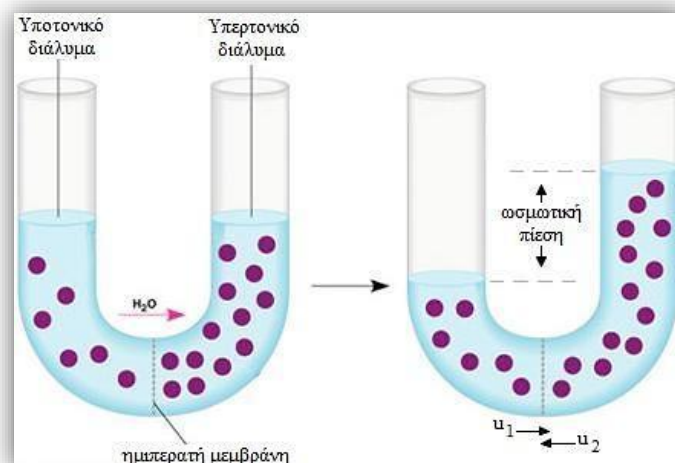
Κεφάλαιο 3

Παρατεταμένης-Πίεσης Ώσμωση (PRO, Pressure-Retarded Osmosis)

3.1 Ώσμωτική διαδικασία

Η ενέργεια που απελευθερώνεται από την ανάμειξη του γλυκού νερού με το θαλασσινό νερό μπορεί να γίνει αντιληπτή με την κατανόηση του φαινομένου της ώσμωσης, από όπου προκύπτει και το όνομα "ώσμωτική ενέργεια".

Η ώσμωση είναι μια φυσική διαδικασία¹ κατά την οποία ο διαλύτης (ή υποτονικό διάλυμα²) κινείται, αυθόρμητα, μέσω μιας μεμβράνης που είναι διαπερατή για τα μόρια του διαλύτη όχι όμως, σε ιδανικές συνθήκες, και για τα μόρια της διαλυμένης ουσίας (ή υπερτονικό διάλυμα³)^[62-64]. Έτσι, λοιπόν, τα μόρια του διαλύτη εισέρχονται με μεγαλύτερη ταχύτητα στο δεξί μέρος του δοχείου (u_1) με σκοπό να εξισωθούν οι συγκεντρώσεις στα δύο μέρη.



Σχήμα 3.1: Ώσμωση μεταξύ διαλύματος και διαλύτη. Ανάκτηση από ^[65].

Αποτέλεσμα της ώσμωσης είναι η στάθμη του υγρού να ανεβαίνει από την μεριά του διαλύματος. Καθώς η στάθμη ανεβαίνει η δημιουργούμενη υδροστατική πίεση, ΔP , αυξάνει την ταχύτητα μετακίνησης του υπερτονικού διαλύματος προς το υποτονικό διάλυμα (u_2). Έτσι, λοιπόν, κάποια στιγμή η στάθμη μέσα στο σωλήνα είναι τέτοια, ώστε οι δύο ταχύτητες μετακίνησης των μορίων νερού προς και από το διαλύτη εξισώνονται ($u_1 = u_2$), οπότε και το φαινόμενο σταματά (ώσμωτική ισορροπία).

¹ δεν απαιτείται κατανάλωση ενέργειας για την κίνηση των μορίων.

² ονομάζεται το διάλυμα που έχει τη μικρότερη τιμή ωσμωτικής πίεσης.

³ ονομάζεται το διάλυμα που έχει τη μεγαλύτερη τιμή ωσμωτικής πίεσης.

Την πίεση αυτή της υδροστατικής στήλης, που έχει σαν αποτέλεσμα την εξίσωση των ταχυτήτων μετακίνησης νερού (διαλύτη) μέσω της ημι-διαπερατής μεμβράνης και την αποκατάσταση της δυναμικής ισορροπίας ονομάζεται *ωσμωτική πίεση*, Π , του διαλύματος^[66].

Η ωσμωτική πίεση είναι η ελάχιστη πίεση που πρέπει να ασκηθεί εξωτερικά σε διάλυμα, που διαχωρίζεται με ημι-διαπερατή μεμβράνη από τον καθαρό διαλύτη του, ώστε να εμποδίσει το φαινόμενο της ώσμωσης, χωρίς να μεταβληθεί ο όγκος του διαλύματος, δεν είναι δηλαδή μια πίεση που εξέρχεται από το διάλυμα αλλά η πίεση που πρέπει να ασκηθεί στο διάλυμα εξωτερικά ώστε να αποφευχθεί η ωσμωτική ροή. Η ωσμωτική πίεση είναι μια προσθετική ιδιότητα. Εξαρτάται, δηλαδή, από την ποσότητα (σε mol) του διαλυμένου σώματος σε ορισμένο όγκο διαλύματος και όχι από την φύση αυτού.

Η αριθμητική τιμή της ωσμωτικής πίεσης είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης του νερού σε άλατα και της θερμοκρασίας του, και είναι ανεξάρτητη από τη μεμβράνη. Περιγράφεται μαθηματικά από την παρακάτω εξίσωση, που καθιέρωσε ο Van't Hoff^[64]:

$$\Pi = iMRT \quad (3.1)$$

Όπου,

Π : η ωσμωτική πίεση του διαλύματος (bar)

i : αριθμός ιόντων (2 για το NaCl)

M : ποσότητα NaCl στο διάλυμα (mol/L)

R = παγκόσμια σταθερά αερίων ($8,31451 \cdot 10^{-2} \text{ LbarK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)

T : η θερμοκρασία του διαλύματος (K)

Η εξίσωση 3.1 δείχνει την πίεση στην μια πλευρά της μεμβράνης, η συνολική πίεση που ασκείται στην μεμβράνη δίνεται από την διαφορά μεταξύ των δύο πιέσεων στις δύο πλευρές.

Εάν τα δυο διαλύματα είναι το γλυκό νερό και το θαλασσινό νερό και διαχωρίζονται από μια ημι-διαπερατή μεμβράνη η οποία είναι διαπερατή μόνο για το γλυκό νερό, τότε το νερό θα ρέει από τη πλευρά μικρότερης συγκέντρωσης διαλύματος (γλυκό νερό) προς την πλευρά με την περισσότερη συγκέντρωση διαλύματος (θαλασσινό νερό). Η ροή θα συνεχιστεί έως ότου η συγκέντρωση και στις δυο πλευρές ισορροπηθεί. Η διαφορά στην αλατότητα μεταξύ του γλυκού και του θαλασσινού νερού μπορεί να παράγει ωσμωτική πίεση περίπου 27 bar^[67]. Για το θαλασσινό νερό, όπου η συγκέντρωση NaCl είναι της τάξης 3.0% έως 4.0% η ωσμωτική πίεση είναι μεταξύ 25-33 bar, για θερμοκρασία των 25°C.

3.2 Ιστορική ανασκόπηση του φαινομένου της ώσμωσης

Το φαινόμενο της ώσμωσης ερευνήθηκε για πρώτη φορά το 1748 από τον Γάλλο κληρικό *Jean-Antoine Nollet*. Έβαλε την ουροδόχο κύστη ενός γουρουνιού, αφού πρώτα την γέμισε με κρασί, σε ένα βαρέλι νερό. Ανακάλυψε ότι μόνο το νερό μέσα στο βαρέλι ήταν σε θέση να διεισδύσει μέσω της ουροδόχου κύστης. Η κύστη διογκώθηκε και τελικά έσκασε.

Στις αρχές του 19^{ου} αιώνα, ο *Henri Dutrochet* επιχείρησε να εφαρμόσει την ίδια αρχή χρησιμοποιώντας κυτταρικές μεμβράνες ζώων και φυτών. Παρατήρησε με τη χρήση μικροσκοπίου, την κίνηση του νερού (διαλύτης) δια μέσω της μεμβράνης, μια διαδικασία που ονόμασε ώσμωση (από το ρήμα ωθώ, στα αγγλικά osmosis). Επιπλέον, συμπέρανε ότι η κατεύθυνση του διαλύτη εξαρτάται από τη φύση της διαλυμένης ουσίας, και δεν καθορίζεται από τη φύση της μεμβράνης.

Οι μαθηματικοί όροι της ώσμωσης και η χημική ισορροπία προτάθηκαν από τον *Jacobus Henricus Van't Hoff*, για τον λόγο αυτό του απονεμήθηκε το πρώτο βραβείο Nobel στη Χημεία το 1901. Ο Van't Hoff αναφέρει την αρχή της ουροδόχου κύστη που χρησιμοποίησε ο Nollet ως “*ημι-διαπερατή*”, η οποία είναι η πρώτη χρήση του όρου, σε συνδυασμό με τις κυτταρικές μεμβράνες. Συμπέρανε επίσης, ότι με χρήση ημι-διαπερατών μεμβρανών μπορεί να ανακτηθεί ενέργεια^[68].

Η έννοια της συγκομιδής ενέργειας που παράγεται από την ανάμιξη του γλυκού και αλμυρού νερού αναφέρθηκε για πρώτη φορά σε ένα άρθρο του Nature από τον Pattle το 1954^[69]. Ο Pattle περιέγραψε ότι, όταν ένας όγκος (V) καθαρού διαλύτη αναμιχθεί με ένα πολύ μεγαλύτερο όγκο ενός διαλύματος, η ωσμωτική πίεση του οποίου είναι π , η ενέργεια που απελευθερώνεται είναι ίση με πV . Κατέληξε μάλιστα στο συμπέρασμα ότι είναι δυνατόν να παραχθεί ενέργεια από την ανάμιξη γλυκού με θαλασσινού νερού χρησιμοποιώντας επιλεκτικά-διαπερατές μεμβράνες. Ωστόσο, το άρθρο του δεν πυροδότησε περαιτέρω ερευνητικό ενδιαφέρον καθώς δεν υπήρχαν αντίστοιχα άρθρα με αυτό το θέμα για τα επόμενα 20 χρόνια.

Όμως, οι έρευνες ξεκίνησαν μόλις το 1963 όταν ο Loeb και ο Sourirajan παρασκεύασαν μια ασύμμετρη οξική κυτταρίνη μεμβράνη με ιδιότητες ανώτερες συγκριτικά με οτιδήποτε είχε δοκιμασθεί μέχρι τότε^[62]. Το 1976, ο Loeb όρισε τη Παρατεταμένης-πίεσης Ώσμωση (PRO, Pressure Retarded Osmosis) ως όρο για τις εφαρμογές των ωσμωτικών μεμβρανών^[70,71]. Με τις τιμές του πετρελαίου εκείνη τη περίοδο να είναι χαμηλές, το ενδιαφέρον για περαιτέρω έρευνα ήταν λίγο.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, η τεχνολογία των μεμβρανών έχει βελτιωθεί. Τα χαρακτηριστικά των μεμβρανών συνεχώς βελτιώνονται έχοντας οδηγήσει τη μείωση των τιμών στις μεμβράνες, πυροδοτώντας νέες έρευνες οι οποίες βρίσκονται ακόμη σε εξέλιξη, για τη χρήση μεμβρανών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη μέθοδο PRO.

3.3 Κατηγορίες ώσμωσης

Οι τρεις πιθανές ωσμωτικές διαδικασίες που συντελούνται όταν γλυκό νερό και θαλασσινό νερό έρθουν σε επαφή δια μέσω μιας ημι-διαπερατής μεμβράνης είναι: FO (Forward Osmosis), RO (Reverse Osmosis) και PRO (Pressure Retarded Osmosis).

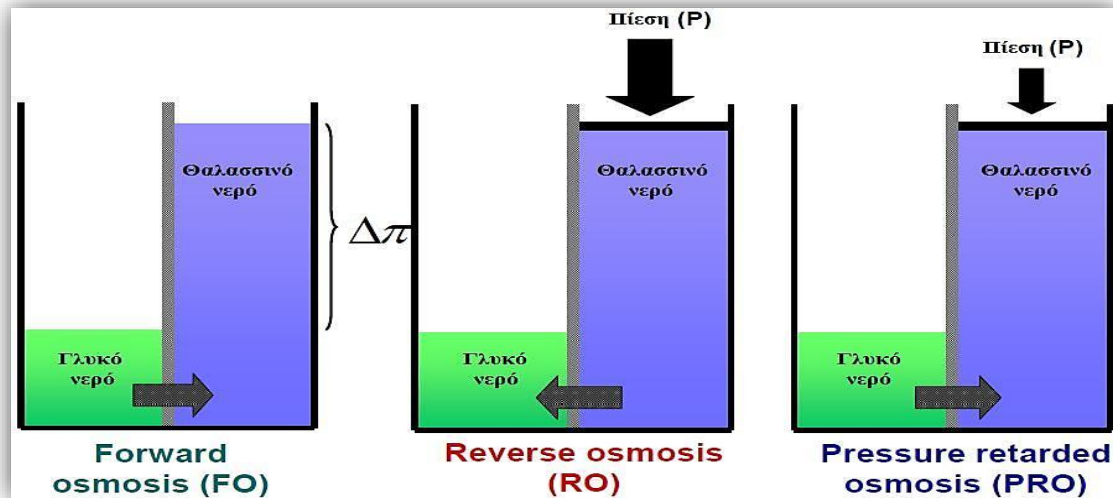
FO (Forward Osmosis, Ευθεία ώσμωση): Είναι ένα φυσικό φαινόμενο στο οποίο ο διαλύτης ρέει κατά μήκος μιας ημι-διαπερατής μεμβράνης πραγματοποιώντας διαχωρισμό του νερού από τις διαλυμένες ουσίες, σε ιδανικές συνθήκες. Η κινητήρια δύναμη για τον διαχωρισμό είναι η διαφορά στην ωσμωτική πίεση ($\Delta\pi$) των διαλυμάτων. Η ροή στο σχήμα 2.3 γίνεται από το γλυκό νερό (χαμηλή συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας, $\pi \approx 0$) προς το θαλασσινό νερό (υψηλή συγκέντρωση διαλυμένων ουσιών, συγκέντρωση άλατος $\approx 3.0\%$ και $\pi \approx 26$ bars). Η διαφορά ωσμωτικής πίεσης σε αυτή τη περίπτωση είναι 26 bars. Στις βιβλιογραφίες αναφέρονται εφαρμογές που χρησιμοποιείται η τεχνολογία FO για επεξεργασία νερού, επεξεργασία βιομηχανικών αποβλήτων^[72-76].

RO (Reverse Osmosis, Αντίστροφη ώσμωση): Όταν στο διάλυμα που έρχεται σε επαφή μέσω της ημι-διαπερατής μεμβράνης με τον καθαρό διαλύτη ασκηθεί πίεση μικρότερη από την ωσμωτική πίεση του διαλύματος (δηλ. όταν $P < \Delta\pi$), τότε στο διάλυμα θα συνεχίσει να εισέρχεται διαλύτης, αλλά με μικρότερο ρυθμό. Όταν στο διάλυμα ασκηθεί *εξωτερική πίεση μεγαλύτερη από την ωσμωτική πίεση του διαλύματος* (δηλ. $P > \Delta\pi$), τότε το φαινόμενο αντιστρέφεται και μόρια διαλύτη θα εξέρχονται από το διάλυμα προς τον καθαρό διαλύτη (ή από το πυκνότερο προς το αραιότερο διάλυμα). Η ροή όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3 είναι αντίθετη με την περίπτωση FO. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κατά κόρων για ανάκτηση πόσιμου νερού από θαλασσινό νερό (αφαλάτωση)^[77,78].

PRO (Pressure Retarded Osmosis, Παρατεταμένης-πίεσης ώσμωση): Η περίπτωση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως μια ενδιάμεση διαδικασία μεταξύ FO και RO, όπου η υδραυλική πίεση ασκείται στο διάλυμα (περίπτωση RO), αλλά η ροή νερού είναι προς τη κατεύθυνση του διαλύματος (περίπτωση FO)^[58]. Σε αυτή τη περίπτωση, ο διαλύτης ρέει αντίθετα από την υδραυλική πίεση. Η μέθοδος PRO μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκμεταλλευόμενη τη διαφορά ωσμωτικής πίεσης μεταξύ δύο διαλυμάτων (γλυκό νερό και θαλασσινό νερό) τα οποία διαχωρίζονται από μια ημι-διαπερατή μεμβράνη. Σε αυτή τη μέθοδο βασίζεται η πτυχιακή εργασία για να αποδειχθεί εάν είναι συμφέρουσα με οικονομικά κριτήρια η αξιοποίηση της.

Η κατεύθυνση ροής για τρεις περιπτώσεις ώσμωσης (FO, RO και PRO) παριστάνονται στο σχήμα 3.2. Για την περίπτωση FO η υδραυλική διαφορά πίεσης είναι μηδέν ($P=0$), για την περίπτωση RO η υδραυλική διαφορά πίεσης είναι μεγαλύτερη από τη διαφορά ωσμωτικής πίεσης ($P > \Delta\pi$) και για την περίπτωση PRO η υδραυλική διαφορά πίεσης είναι μικρότερη από τη διαφορά ωσμωτικής πίεσης ($P <$

$\Delta\pi$) και παίρνει τιμές από μηδέν έως $\Delta\pi$. Τέλος, εάν η ωσμωτική πίεση είναι ίση με την υδραυλική πίεση ($\Delta\pi=P$) τότε έχουμε ωσμωτική ισοροπία, δηλ. $J=0$.



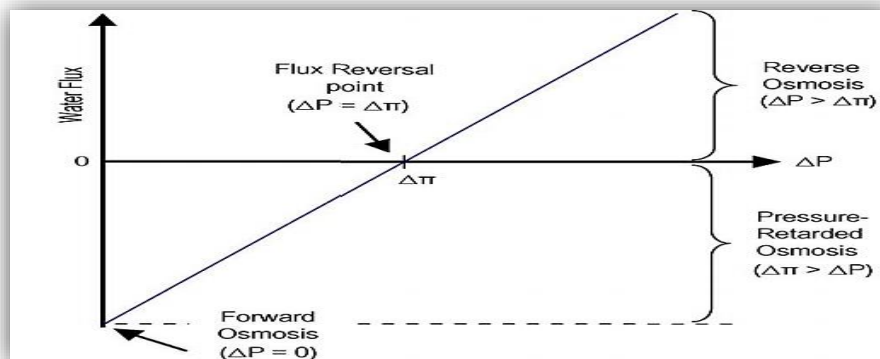
Σχήμα 3.2: Κατεύθυνση ροής στην FO, RO, PRO περίπτωση. Ανάκτηση από^[72].

Η εξίσωση που περιγράφει τη μεταφορά νερού σε ιδανικές συνθήκες και στις τρεις περιπτώσεις είναι^[70]:

$$J_w = A(\Delta\pi - \Delta P) \quad (3.2)$$

Όπου J_w είναι η ροή του διαλύτη (m^3/m^2 ανά ημέρα), A είναι ο συντελεστής διαπερατότητας του νερού δια μέσω της μεμβράνης, $\Delta\pi$ διαφορά ωσμωτικής πίεσης (atm), ισούται με $\Delta\pi=\pi_D-\pi_F$ όπου π_D η ωσμωτική πίεση του θαλασσινού νερού και π_F η ωσμωτική πίεση του γλυκού νερού, P η υδραυλική διαφορά πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης, ισούται με $\Delta P=P_D-P_F$.^[58]

Ο βαθμός ροής του διαλύτη μέσω της μεμβράνης εξαρτάται από την ωσμωτική πίεση, π , και από την υδραυλική πίεση, ΔP .



Σχήμα 3.3: Κατεύθυνση ροής νερού ως συνάρτηση εφαρμοζόμενης πίεσης στην FO,RO και PRO περίπτωση. Ανάκτηση από^[72].

Από το σχήμα 3.3 παρατηρείται ότι η FO λαμβάνει χώρα όταν η διαφορά υδροστατικής πίεσης, ΔP , είναι μηδέν και η ροή πραγματοποιείται από την διαφορά ωσμωτικής πίεσης, $\Delta\pi$. Η RO εμφανίζεται όταν η εφαρμοζόμενη διαφορά υδροστατικής πίεσης είναι μεγαλύτερη από την διαφορά ωσμωτικής πίεσης. Η περίπτωση PRO διεξάγεται όταν η διαφορά υδροστατικής πίεσης είναι ανάμεσα από το μηδέν έως την διαφορά ωσμωτικής πίεσης.

3.4 Αναμιγνύοντας γλυκό και θαλασσινό νερό με τη μέθοδο PRO

Ελεύθερη ενέργεια Gibbs προκύπτει στις εκβολές των ποταμών όταν το γλυκό νερό ρέει στη θάλασσα. Η μέθοδος *Παρατεταμένης-Πίεσης Ώσμωση (PRO, Pressure Retarded Osmosis)* έχει προταθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη φυσική διαφορά αλατότητας (salinity gradient) μεταξύ των διαλυμάτων. Η διαφορά στην ελεύθερη ενέργεια (ενέργεια Gibbs) μεταξύ των δύο διαλυμάτων προκαλεί τη ροή των μορίων από τη πλευρά χαμηλής συγκέντρωσης άλατος (γλυκό νερό) προς τη πλευρά υψηλότερης συγκέντρωσης άλατος (θαλασσινό νερό). Η ελεύθερη μοριακή ενέργεια (μ) δίνεται από την εξίσωση^[42]:

$$\mu_i = \mu_i^0 + \bar{u}_i \cdot \Delta p + R \cdot T \cdot \ln(x_i) + |z_i| \cdot F \cdot \Delta\phi \quad (3.3)$$

Όπου μ^0 είναι η μοριακή ελεύθερη ενέργεια σε κανονικές συνθήκες (J/mol), \bar{u} ο μερικός γραμμομοριακός όγκος, Δp η αλλαγή στην πίεση λόγω ατμοσφαιρικών συνθηκών (Pa), R η σταθερά αερίων (8.314J/mol K), T η απόλυτη θερμοκρασία (K), z το σθένος ενός ιόντος (ισοδύναμο / mol), F η σταθερά Faraday (96,485C/ισοδύναμο), $\Delta\phi$ η διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού (V).

Κατά τη διάρκεια που εξελίσσεται η PRO, δεν υπάρχει μεταφορά ιόντων. Ο τελευταίος όρος της εξίσωσης 3.3 είναι για αυτόν τον λόγο ίσος με το μηδέν ($|z_i| \cdot F \cdot \Delta\phi = 0$). Η πίεση στη πλευρά του γλυκού νερού είναι ίση με την ατμοσφαιρική πίεση, οπότε δεν εφαρμόζεται πίεση στη πλευρά του γλυκού νερού ($\Delta p = 0$). Η αλλαγή σε ενέργεια Gibbs για την ανάμιξη 1 mol γλυκού νερού με μια άπειρη ποσότητα θαλασσινού νερού εκφράζεται^[51]:

$$\Delta G_{mix} = RT \ln(x_{H_2O}) \quad (3.4)$$

Το μοριακό κλάσμα H_2O , για τη μέτρηση της συγκέντρωσης νερού, του διαλυτή (γλυκό νερό) είναι μεγαλύτερο από το μοριακό κλάσμα H_2O της διαλυμένης ουσίας (θαλασσινό νερό) και η διαφορά πίεσης συγκριτικά με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες στη πλευρά της διαλυμένης ουσίας είναι μικρή. Για παράδειγμα, για διάλυμα 600mM NaCl, το οποίο αντιστοιχεί στο θαλασσινό νερό το μοριακό κλάσμα ισούται με, $\ln(x_{αλατος}) = \ln(0.0107) = -4.54$ ^[51].

Καθώς το σύστημα επιδιώκει για να φθάσει στην ωσμωτική ισορροπία, το μοριακό κλάσμα H_2O της διαλυμένης ουσίας θα αυξηθεί. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μεταφορά μορίων νερού από το διαλύτη προς τη διαλυμένη ουσία αυξάνοντας τη διαφορά της υδροστατικής πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης. Η ανάπτυξη αυτής της

υδροστατικής πίεσης περιορίζεται από την ωσμωτική ισορροπία που επιδιώκει να φθάσει το διάλυμα, κάτι που όμως *παρταίνεται (retarded)* από τη συνεχή μεταφορά μορίων νερού δια μέσω της μεμβράνης. Η μεταφορά των μορίων του νερού από το διαλύτη με ατμοσφαιρικές συνθήκες προς τη πλευρά συγκέντρωσης άλατος υψηλότερης πίεσης οδηγεί σε μία συμπίεση του όγκου της πλευράς της διαλυμένης ουσίας, με τον όρο Δr στην εξίσωση να αυξάνεται. Τα επιπρόσθετα μόρια νερού οδηγούν σε αύξηση του μοριακού κλάσματος και σε μείωση της αλατότητας στη πλευρά της διαλυμένης ουσίας όπου το νερό καταλήγει να γίνεται υφάλμυρο. Η ωσμωτική ροή συνεχίζεται μέχρι να υπάρξει ωσμωτική ισορροπία. Στην ωσμωτική ισορροπία η ελεύθερη μοριακή ενέργεια και στις δυο πλευρές της μεμβράνης είναι ίση.

Ο συμπιεσμένος όγκος στη πλευρά της διαλυμένης ουσίας μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρισμό με την απαλλαγή της υφάλμυρης εκροής μέσω τουρμπίνων. Όταν όμως η διαδικασία φθάσει στην ωσμωτική ισορροπία, η ωσμωτική ροή σταματά και ως αποτέλεσμα σταματά και η παραγωγή ενέργειας. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με συνεχή ροή του εισερχόμενου γλυκού και θαλασσινού νερού στη μονάδα και με συνεχή αποβολή του υφάλμυρου νερού έξω από τη μονάδα. Με αυτό τον τρόπο, η ωσμωτική ισορροπία δεν επέρχεται ποτέ και ο ηλεκτρισμός παράγεται αδιάκοπα.

3.5 Άλλοι μέθοδοι πέρα από το γλυκό και το θαλασσινό νερό

Ροές εισόδου σε ένα σύστημα PRO πέρα από φυσικό περιβάλλον μπορούν να προέρχονται και από τη βιομηχανία. Ο συνδυασμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη διαδικασία PRO σε συνδυασμό με τη βιομηχανία αφαλάτωσης εικάζεται ότι μπορεί να αποτελέσει σημαντικό ρόλο στη μείωση του κόστους^[79]. Κάθε μονάδα θα παρέχει αυτό που χρειάζεται η άλλη. Ο συνδυασμός φαίνεται να είναι αποδοτικότερος από τη ξεχωριστή λειτουργία τους, μειώνοντας το κόστος προκατεργασίας του εισερχόμενου διαλύματος. Την ίδια στιγμή, η μονάδα που θα παράγει ενέργεια από την ώσμωση θα παρέχει μέρος της ενέργειας για τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης, μειώνοντας το κόστος παραγωγής νερού. Εκτιμάται, σύμφωνα με τον Sim^[80], μείωση έως 23% στην κατανάλωση ενέργειας με τη χρήση του υβριδικού συστήματος βασισμένο στην αφαλάτωση και στην PRO. Με την τεχνολογία να είναι παρόμοια και στις δυο μονάδες, αναμένεται το κόστος συντήρησης και λειτουργίας να είναι χαμηλό.

Η μέθοδος PRO μπορεί να χρησιμοποιήσει επίσης ανθρωπογενή απόβλητα, όπως συμπυκνωμένη άλμη από μονάδες αφαλάτωσης ως διάλυμα αντί για θαλασσινό νερό^[70].

Τέλος, μια κατηγορία PRO κλειστού κύκλου που έχει προταθεί είναι η ωσμωτική μηχανή καύσεως (osmotic heat engine), η οποία χρησιμοποιεί μια θερμολυτική αμμωνία και διοξείδιο του άνθρακα ως διαλυμένη ουσία για να μετατρέψει τα απόβλητα θερμικής ενέργειας σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια^[81].

Κεφάλαιο 4

Θεωρητική ανάλυση ωσμωτικής μονάδας PRO

4.1 Κύκλος λειτουργίας PRO για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

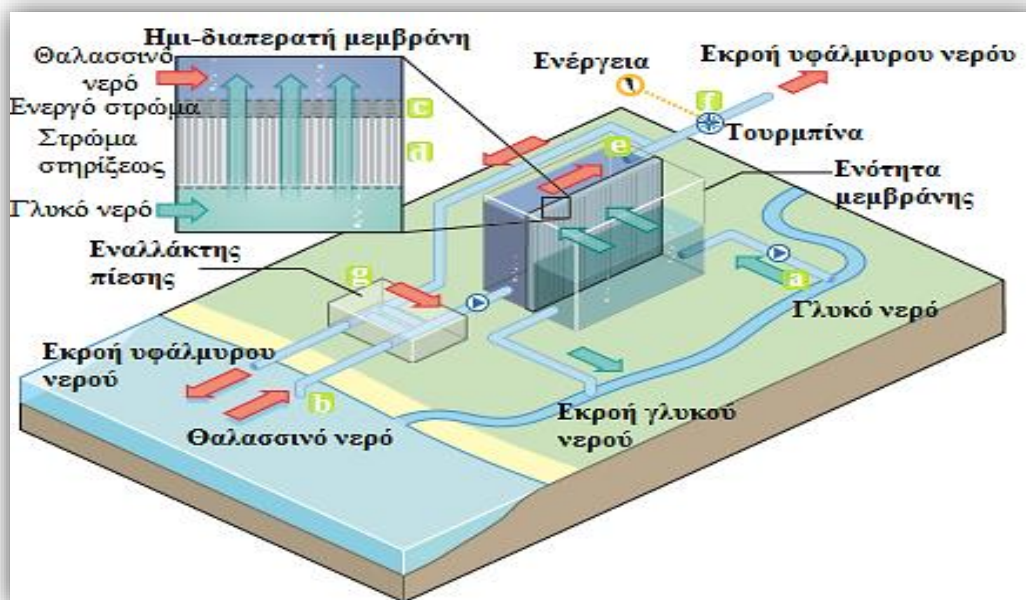
Η μέθοδος PRO (Pressure-Retarded Osmosis) μπορεί να αποτελέσει αξιόπιστη λύση για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται εκμεταλλεύομενη τη διαφορά ωσμωτικής πίεσης που αναπτύσσεται όταν μια ημι-διαπερατή μεμβράνη διαχωρίζει δύο διαλύματα διαφορετικών συγκεντρώσεων, νερό από ποταμό (χαμηλή συγκέντρωση διαλύματος ή διαλύτης) και θαλασσινό νερό (μεγαλύτερη συγκέντρωση διαλύματος ή διαλυμένη ουσία). Το γλυκό νερό ρέει προς τη πλευρά του θαλασσινού νερού λόγω της μεγαλύτερης ωσμωτικής πίεσης, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο τον όγκο της ροής του θαλασσινού νερού. Η ροή διαρκεί για όσο χρόνο η διαφορά ωσμωτικής πίεσης ($\Delta\pi$) παραμένει μεγαλύτερη από την διαφορά υδροστατικής πίεσης (P). Σε αυτόν τον κανόνα βασίζεται η ιδέα της παραγωγής ενέργειας. Μία υδραυλική πίεση μικρότερη από την διαφορά ωσμωτικής πίεσης εφαρμόζεται στη διαλυμένη ουσία, με τον τρόπο αυτό "*παραινόντας*" τη ροή νερού διαμέσου της μεμβράνης.

Για μια σταθερή παραγωγή ενέργειας, η πλευρά που περιέχει το θαλασσινό νερό πρέπει να διατηρείται σε μια σταθερή πίεση και συγκέντρωση ενώ η πλευρά που περιέχει το γλυκό νερό να έχει συνεχή ροή δια μέσω της μεμβράνης, αυξάνοντας τον όγκο ροής στην πλευρά του θαλασσινού νερού. Η ελεύθερη ενέργεια ανάμειξης (ενέργεια Gibbs) που προκύπτει μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια, και ως εκ τούτου μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενέργεια που παράγεται με τη μέθοδο PRO ονομάζεται "*ωσμωτική ενέργεια*"^[51,70,82].

4.1.1 Ανάλυση κύκλου λειτουργίας PRO

Η μονάδα PRO ακολουθεί έναν κύκλο λειτουργίας, ο οποίος μπορεί να χωριστεί σύμφωνα με τη σειρά των σταδίων που την αποτελούν όπως εικονίζονται σε ιδανικές συνθήκες στο σχήμα 4.1. Αρχικά, με αντλίες εισέρχεται νερό από τον ποταμό (a) και το θαλασσινό νερό (b) και ακολουθεί προκατεργασία του νερού πριν εισέλθουν στον θάλαμο όπου διαχωρίζονται από μια ημι-διαπερατή μεμβράνη. Ένα ποσοστό 80-90% του γλυκού νερού μεταφέρεται με την ώσμωση δια μέσω της μεμβράνης στην πλευρά του θαλασσινού νερού. Η μεμβράνη η οποία είναι διαπερατή μόνο για το γλυκό νερό, αποτελείται από το ενεργό στρώμα (active layer, c) και το στρώμα στηρίξεως (support layer, d). Το ενεργό στρώμα βρίσκεται από την πλευρά του θαλασσινού νερού καθώς αυξάνει τον όγκο του νερού από τη πλευρά του θαλασσινού νερού. Το υφάλμυρο νερό που δημιουργήθηκε από την ανάμειξη των δυο διαλυμάτων με την πίεση να έχει αυξηθεί, εξέρχεται από την μεμβράνη και διαχωρίζεται σε δύο μέρη (e): μέρος της ροής χρησιμοποιείται για την περιστροφή του ρυμπίνιας (f) παράγοντας ενέργεια, και το άλλο

μέρος επιστρέφει στον εναλλάκτη πίεσης (pressure exchanger, g). Η πίεση λειτουργίας είναι της τάξης 11-15bars. Ο εναλλάκτη πίεσης χρησιμοποιείται για να μεταφέρει την πίεση από το υφάλμυρο νερό που έχει υψηλή πίεση προς το εισερχόμενο θαλασσινό νερό^[51,58,82-84]. Με αυτή τη διάταξη, η υδραυλική πίεση είναι λιγότερη από την ωσμωτική πίεση ώστε η ροή νερού να είναι αντίθετη της υδραυλικής διαφοράς πίεσης. Το γεγονός αυτό είναι απαραίτητο για παραγωγή ενέργειας.



Σχήμα 4.1: Σχηματικό διάγραμμα μονάδας PRO με χρήση νερού από ποταμό και θαλασσινού νερού, ιδανικές συνθήκες. Ανάκτηση από^[84].

Συνοπτικά λοιπόν έχουμε:

- Αντληση θαλασσινού και γλυκού νερού.
- Προκατεργασία θαλασσινού και γλυκού νερού πριν εισαχθεί στις μεμβράνες.
- Συμπύεση εισερχόμενου θαλασσινού νερού σε εναλλάκτη πίεσης και στην συνέχεια εισέρχεται στην άλλη πλευρά των μεμβρανών.
- Το υφάλμυρο νερό, που προέκυψε από την ανάμειξη των δύο διαλυμάτων, οδηγείται στον εναλλάκτη πίεσης ή στον στρόβιλο.
- Ανάκτηση ενέργειας με την περιστροφή του στρόβιλου και,
- Τέλος, το υφάλμυρο νερό που πλέον δεν έχει πίεση εξέρχεται από την μονάδα.

Η διαδικασία αυτή είναι συνεχής ώστε να εξασφαλίζεται ότι δεν θα επέλθει ποτέ ωσμωτική ισορροπία (κεφάλαιο 3.1) μεταξύ των δύο διαλυμάτων.

Για να πραγματοποιηθεί η μοντελοποίηση της μονάδας PRO (κεφάλαιο 4.9), τα μέρη που χρήζουν ανάλυσης είναι α) οι παράμετροι των διαλυμάτων, β) το σύστημα πρόσληψης/αποβολής του νερού, γ) η προκατεργασία νερού, δ) η ωσμωτική μεμβράνη, ε) ο εναλλάκτης πίεσης και στ) η αντλία, στρόβιλος, τουρμπίνα και σωλήνες της μονάδας.

4.2 Παράμετροι των διαλυμάτων

Οι παράμετροι που ισχύουν για τα τρία διαλύματα (γλυκό νερό, θαλασσινό νερό, υφάλμυρο νερό) και χρησιμοποιήθηκαν στην πτυχιακή εργασία είναι:

4.2.1. Πυκνότητα ρευστού

Η πυκνότητα ενός ρευστού (ρ) είναι το πηλίκο της μάζας m στοιχείου του ρευστού προς τον όγκο V . Για το γλυκό νερό, το θαλασσινό νερό και το υφάλμυρο νερό η πυκνότητα είναι^[85]:

- Γλυκό νερό: $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
- Θαλασσινό νερό: $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$
- Υφάλμυρο νερό: $\rho = 1013 \text{ kg/m}^3$

4.2.2 Ειδικό βάρος ρευστού

Το ειδικό βάρος ενός ρευστού (γ) είναι το πηλίκο της πυκνότητας του ρευστού και της επιτάχυνσης της βαρύτητας (g , με τιμή $g = 9,81 \text{ m/s}^2$). Για τα τρία ρευστά το ειδικό βάρος είναι^[85]:

- Γλυκό νερό: $\gamma_\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$
- Θαλασσινό νερό: $\gamma_\theta = 24 \text{ kN/m}^3$
- Υφάλμυρο νερό: $\gamma_\upsilon = 20 \text{ kN/m}^3$

4.2.3 Κινηματικό ιξώδες

Το κινηματικό ιξώδες του νερού (ν) είναι ίσο με $\nu = 10^{-6} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)$ σε κανονικές συνθήκες νερού ($T=20^\circ\text{C}$)^[85].

4.2.4 Τραχύτητα

Η τραχύτητα (k) είναι ένα μέτρο για την παρέκκλιση από την πραγματική τραχύτητα του πραγματικού τοιχώματος από το ιδεατό λείο τοίχωμα. Η απόλυτη πραγματική τραχύτητα της επιφάνειας των αγωγών δεν είναι δυνατόν να βρεθεί αφού οι μικροανωμαλίες μετά από οποιαδήποτε επεξεργασία λείανσης δεν είναι άμεσα μετρήσιμες. Γι' αυτό το μήκος υπολογισμού k αποτελεί μια μέση τιμή.

Η μέση τραχύτητα για σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε στη πτυχιακή εργασία είναι $3 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ ^[86].

4.3 Σύστημα πρόσληψης / αποβολής

Οι εγκαταστάσεις άντλησης του θαλασσινού νερού αποτελούν το πρώτο βασικό σημείο της εγκατάστασης, διότι πρέπει να εξασφαλίζεται η συνεχής και επαρκής τροφοδοσία θαλασσινού και γλυκού νερού στη μονάδα. Το τελευταίο στάδιο είναι η αποβολή του υφάλμυρου νερού που απαιτεί σύστημα αποβολής^[87]. Το σύστημα πρόσληψης θα αποτελείται από ένα πύργο πρόσληψης για να εισέρχεται το νερό, μια σήραγγα έως τη μονάδα και στο τέλος της σήραγγας ένα φρεάτιο. Αντίστοιχα, το σύστημα αποβολής θα αποτελείται από ένα φρεάτιο στην έξοδο της μονάδας, μια σήραγγα που θα οδηγεί σε έναν πύργο αποβολής του νερού πίσω στη θάλασσα. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η ανάλυση του ολικού ύψους απωλειών του νερού σε ένα τέτοιο σύστημα.

4.3.1 Γενικά

Η κινητήρια δύναμη για τη μεταφορά νερού και στις δύο περιπτώσεις (σύστημα πρόσληψης / αποβολής) είναι η διαφορά στο επίπεδο ενέργειας, που παρουσιάζεται ως διαφορά στο επίπεδο νερού, στην κάθε πλευρά του συστήματος. Η διαφορά αυτή θα μετακινήσει το νερό από τη πλευρά με το υψηλό επίπεδο ενέργειας στη πλευρά χαμηλού επιπέδου ενέργειας. Το επίπεδο ενέργειας μιας υδάτινης στήλης είναι ένα άθροισμα τριών όρων και περιγράφεται σε διαστάσεις μήκους (m) από την εξίσωση Bernoulli^[85,88]:

$$\frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2g} + z = \text{σταθερό} = H \quad (4.1)$$

Η σταθερά H είναι το ολικό ύψος (ή ολικό φορτίο). Οι υπόλοιποι τρεις όροι ονομάζονται:

- z : Ύψος θέσης ή δυναμικό ύψος (m)
- $\frac{P}{\rho g}$: Πιεζομετρικό ύψος ή ύψος ενέργειας υδροστατικής πίεσης
- $\frac{v^2}{2g}$: Ύψος ταχύτητας ή κινηματικό ύψος

Όπου P η πίεση στο σημείο, ρ (kg/m^3) η πυκνότητα του ρευστού, v (m/s) η μέση ταχύτητα του ρευστού, g η επιτάχυνση της βαρύτητας (με τιμή $g = 9,81 \text{ m/s}^2$).

Η εξίσωση Bernoulli ισχύει μόνο για άτριβη, μονοδιάστατη και ασυμπίεστη ροή.

Κατά τη μεταφορά, ενέργεια χάνεται εξαιτίας **των απωλειών τριβής (h_f) και τοπικών απωλειών (h_L)**. Η μεταφορά νερού σταματά όταν το επίπεδο ενέργειας (το άθροισμα του ολικού ύψους και των απωλειών) στο επίπεδο χαμηλής ενέργειας είναι ίσο με το επίπεδο υψηλής ενέργειας.

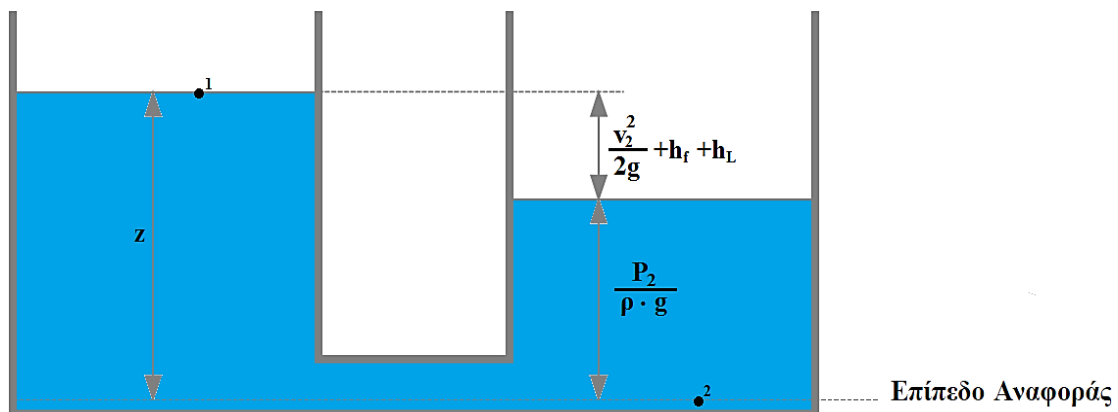
Η παραπάνω μεταφορά μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση Bernoulli^[85,88]:

$$z + \frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_f + h_L \quad (4.2)$$

Με την παραδοχή ότι η πηγή νερού στη πλευρά του υψηλού επιπέδου ενέργειας είναι άπειρη και ο οριζόντιος άξονας της σήραγγας ορίζεται ως σημείο αναφοράς, η εξίσωση γίνεται:

$$z = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_f + h_L \quad (4.3)$$

Η εξίσωση 4.3 απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4.2: Απεικόνιση της συμπιεσμένης μεταφοράς νερού.

4.3.2 Υπολογισμός απωλειών

Οι ολικές απώλειες ύψους (Δh) είναι το άθροισμα των απωλειών τριβής (h_f) και των τοπικών απωλειών (h_L). Ακολουθεί η συνοπτική περιγραφή της κάθε περίπτωσης.

4.3.2.1 Απώλειες ύψους ταχύτητας

Οι απώλειες ύψους λόγω της ταχύτητας (h_v) καθορίζονται από το σχεδιασμό του ρυθμού ροής στη σήραγγα είναι ίση με^[88]:

$$h_v = \frac{v^2}{2g} \quad (4.4)$$

Η μέση ταχύτητα υπολογίζεται ως εξής^[85]:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} d^2} \quad (4.5)$$

Όπου Q (m^3/s) είναι ο ρυθμός ροής του ρευστού, A (m^2) το εμβαδόν της διατομής τους αγωγού και d (m) η διάμετρος της σήραγγας.

Η εξίσωση 4.4 με αντικατάσταση από την εξίσωση 4.5 γίνεται τελικά:

$$h_v = \frac{8Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot d^4} \quad (4.6)$$

Η εξίσωση 4.6 δηλώνει ότι η απώλεια ύψους λόγω της ταχύτητας εξαρτάται από τη διατομή της σήραγγας πρόσληψης. Οι απώλειες ταχύτητας εμπεριέχονται στις απώλειες τριβής και στις τοπικές απώλειες.

4.3.2.2 Απώλειες τριβής

Οι απώλειες ύψους λόγω τριβής (h_f) υπολογίζεται από την εξίσωση Darcy-Weissbach^[88]:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = f \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{8Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot d^4} \quad (4.7)$$

Η εξίσωση 4.7 δηλώνει ότι οι απώλειες ύψους λόγω τριβής καθορίζονται από το μήκος της σήραγγας (L), την εσωτερική διατομή (d) και ένα συντελεστή τριβής (f). Το μέγεθος του συντελεστή τριβής καθορίζεται από τον αριθμό Reynolds. Ο αριθμός Reynolds είναι αδιάστατος και εκφράζει ποσοτικά το είδος της ροής στη σήραγγα πρόσληψης^[85]:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (4.8)$$

Όπου ν η μέση ταχύτητα (m/s), d η διατομή του σωλήνα (m) και ν το κινηματικό ιξώδες (m^2/s). Το είδος της ροής μπορεί να είναι στρωτή (laminar) ή τυρβώδης (turbulent) και καθορίζεται από την τιμή που θα έχει ο αριθμός Re:

- Στρωτή ροή όταν $Re < 2000$
- Τυρβώδης ροή όταν $Re > 4000$

Για τιμή εντός των ορίων $2000 < Re < 4000$, η ροή είναι σε μια μεταβατική περιοχή.

Η μεταφορά της ροής νερού υπό πίεση δια μέσω μιας σήραγγας είναι πάντα τυρβώδης επειδή η ταχύτητα εντός της σήραγγας και η εσωτερική διατομή θα ισούται με μεγάλο αριθμό Reynolds:

$$\frac{v \cdot d}{\nu} \gg 4000$$

Ο συντελεστής τριβής (f , σε m) για τυρβώδη ροή δίνεται από τη μη – γραμμική σχέση των Von Karman – Nikuradse, όπως εξελίχθηκε από τους Colebrook και White^[85]:

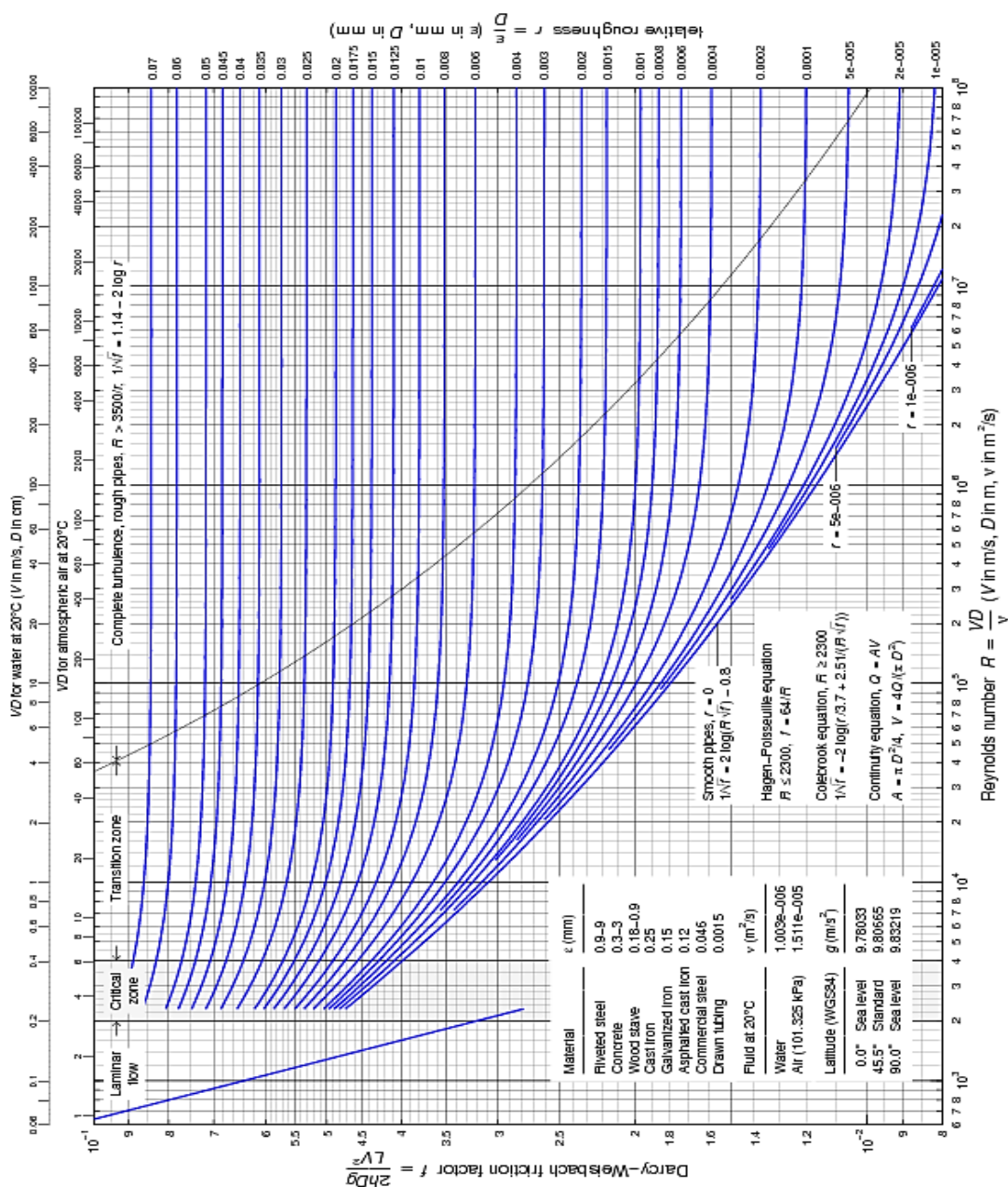
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{f}} + \frac{k}{3,71d} \right) \quad (4.9)$$

Η εξίσωση “αναπαραγωγής” των τιμών της σχέσης Colebrook – White ως προς τον συντελεστή τριβής f , με ακρίβεια $\pm 1\%$ δίνεται από τη σχέση του Ευαγγελίδης – Παπαευαγγέλου – Τζιμόπουλος [89]:

$$f = \frac{0,2479 - 0,0000947 \cdot (7 - \log(Re))^4}{\left[\log \left(\frac{k}{3,615 \cdot d} + \frac{7,366}{Re^{0,9142}} \right) \right]^2} \quad (4.10)$$

Ισχύει για αριθμούς Reynolds από 4000 έως 10^8 και εύρος σχετικής τραχύτητας k/d από 0,00001 έως 0,05.

Εναλλακτικά ο συντελεστής τριβής μπορεί να βρεθεί από το διάγραμμα Moody:



Διάγραμμα 4.1: Διάγραμμα Moody. Ανάκτηση από [90].

4.3.2.3 Τοπικές απώλειες

Οι τοπικές απώλειες (h_L) προκαλούνται από απότομες αλλαγές στη διατομή ή την κατεύθυνση και καθορίζονται από την ταχύτητα κατά μήκος της σήραγγας. Εκφράζεται από την εξίσωση^[85]:

$$h_L = \sum \xi \frac{u^2}{2g} = \sum \xi \frac{8Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot d^4} \quad (4.11)$$

Η εξίσωση 4.11 δηλώνει ότι το ύψος απωλειών εξαρτάται από την εσωτερική διατομή της σήραγγας πρόσληψης και το άθροισμα του συντελεστή απωλειών (ξ). Ο συντελεστής απωλειών παρέχεται από εγχειρίδια μηχανικών.

4.3.2.4 Ολική απώλεια ύψους

Η ολική απώλεια ύψους (Δh) λόγω της μεταφοράς νερού μπορεί τώρα να υπολογισθεί:

$$\Delta h = h_f + h_L = \frac{8Q^2}{g\pi^2 d^4} \left(f \cdot \frac{L}{d} + \sum \xi \right) \quad (4.12)$$

Η ολική απώλεια ύψους της εξίσωσης 4.12 είναι η διαφορά στο επίπεδο νερού που πρέπει να πρέπει να ξεπεραστεί με άντληση. Η άντληση αυτή μειώνει τη καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και για αυτό το λόγο πρέπει να έχει τη μικρότερη δυνατή τιμή. Αυτό επιτυγχάνεται με το σχεδιασμό που θα έχει το σύστημα πρόσληψης.

4.4 Προκατεργασία

Το θαλασσινό και το γλυκό νερό που εισέρχεται στη μονάδα περιέχει πλήθος συστατικών, που πρέπει να απομακρυνθούν πλήρως ή να μειωθεί δραστικά ο αριθμός τους, για να αποφευχθεί το μπούκωμα των μεμβρανών και η μείωση της διάρκειας ζωής των μεμβρανών^[51,54,91].

4.4.1 Γενικά

Στο θαλασσινό νερό πέρα από άλατα, περιέχονται επίσης:

- Αιωρούμενα στερεά (μεγέθους $>5\mu\text{m}$), είναι μη διαλυμένες ουσίες σε ένα ρευστό.
- Κολλοειδή σωματίδια (μεγέθους $0.4 - 5 \mu\text{m}$), είναι ουσίες διασπειρόμενες σε ένα ρευστό.
- Διαλυμένα στερεά (μεγέθους $<0.4\mu\text{m}$), είναι διαλυμένες ουσίες σε ένα ρευστό.
- Μικροοργανισμοί (μεγέθους $0.01 - 10\mu\text{m}$), όπως οι ιοί, βακτήρια και φύκια.

Η παρουσία τους ρυπαίνει και αποσαθρώνει τις μεμβράνες, ελαττώνοντας έτσι την απόδοση της μονάδας και τον χρόνο ζωής των μεμβρανών και ως επακόλουθο την παραγωγή ενέργειας. Τα προβλήματα που αναμένονται να παρουσιαστούν είναι:

- Τα αιωρούμενα στερεά ή τα κολλοειδή σωματίδια μπορούν να κολλήσουν στην επιφάνεια των μεμβρανών από υπέρβαση του ορίου διαλυτότητας ή λόγω σχηματισμού αδιάλυτων αλάτων εξαιτίας τοπικών αντιδράσεων (*σωματιδιακή ρύπανση*),
- Καθίζηση στην επιφάνεια της μεμβράνης διαλυμένων στερεών (*ρύπανση καθίζησης*),
- Προσρόφιση από τις πολυμερείς ομάδες της μεμβράνης διαφόρων μικροοργανισμών που περιέχονται στο νερό και σχηματισμός λεπτού στρώματος ζελατινοειδούς μορφής (*βιορύπανση*),
- Απόφραξη των καναλιών κυκλοφορίας της άλμης, από τα λεπτά αιωρούμενα σωματίδια.

Τα ανωτέρω προβλήματα έχουν καταγραφεί σε μελέτες για τις μονάδες αφαλάτωσης^[92,93] και θα είναι ίδιες και στην περίπτωση της ωσμωτικής μονάδας PRO.

Ο καθορισμός της ευαισθησίας της ωσμωτικής μεμβράνης είναι η πυκνότητα στοιβαξης της ενότητας μεμβρανών (κεφάλαιο 4.5). Σε μια ωσμωτική μονάδα PRO οι μεμβράνες καταλαμβάνουν μεγάλο χώρο, όπου με τις μεμβρανοθήκες θα βρίσκονται σε έναν μεγάλο αριθμό ενοτήτων. Οι ενότητες έχουν ορισμένη πυκνότητα στοιβαξης, δηλαδή συγκεκριμένος χώρος μεμβράνης ανά ενότητα. Με μεγάλη τη πυκνότητα στοιβαξης, μικρότερος αριθμός των ενοτήτων απαιτούνται, με αποτέλεσμα να μειωθεί το κόστος κεφαλαίου και να αυξηθεί η παραγόμενη ενέργεια της μονάδας. Όμως η μεγάλη πυκνότητα στοιβαξης έχει ένα κύριο μειονέκτημα. Με μεγάλη την πυκνότητα στοιβαξης, η απόσταση των καναλιών ροής μεταξύ των μεμβρανών είναι μικρή. Με μικρή την απόσταση μεταξύ των καναλιών, η πιθανότητα ένα σωματίδιο να κολλήσει μέσα στο χώρο είναι μεγάλη και θα οδηγήσει σε μόλυνση.

4.4.2 Ανάλυση του νερού

Για του ανωτέρω λόγους απαιτείται ανάλυση του νερού που περιλαμβάνει ^[78]:

- Θολότητα, χρώμα, pH και μέση θερμοκρασία άντλησης.
- Δείκτης πυκνότητας ιλύος (Silt density Index, SDI) για τα περιεχόμενα κολλοειδή συστατικά.
- Περιεκτικότητα σε κολοβακτηρίδια και σε διάφορα άλλα βακτηρίδια.
- Περιεχόμενα αέρια πχ. οξυγόνο, CO₂, υδροθείο κ.λ.π.
- TDS (συνολικά διαλυμένα στερεά).
- Άλατα του νερού: ασβέστιο, μαγνήσιο, κάλιο, σίδηρο, μαγγάνιο, βάριο και στρόντιο, πυρίτιο θειικά νιτρικά, αμμωνία, φωσφορικά, φθοριούχα και χλωριούχα.

4.4.3 Μέθοδοι προκατεργασίας

Η προκατεργασία του νερού είναι σημαντική κυρίως για το γλυκό νερό καθώς θα περάσει μέσα από το πορώδες στρώμα της μεμβράνης για να βρεθεί στη πλευρά του θαλασσινού νερού^[94]. Η χρήση συστήματος προκατεργασίας του νερού απαιτεί ενέργεια, οπότε θα πρέπει να αναμένεται μείωση της καθαρής παραγόμενης ενέργειας.

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί μέθοδοι για την επίτευξη προκατεργασίας και όλες υπόκεινται σε μια από τις τρεις κατηγορίες^[95,96]:

- Φυσικό φιλτράρισμα
- Χημικό φιλτράρισμα
- Βιολογικό φιλτράρισμα

Ακολουθεί στη συνέχεια συνοπτική αναφορά των διαθέσιμων μεθόδων.

4.4.3.1 Φυσικό φιλτράρισμα νερού (physical water filtration)

Το φυσικό φιλτράρισμα του νερού αναφέρεται κατά κύριο λόγο στις τεχνικές φιλτραρίσματος. Φιλτράρισμα είναι ένα μέσο καθαρισμού για την απομάκρυνση στερεών από υγρά. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές τεχνικές φιλτραρίσματος. Ένα τυπικό φίλτρο αποτελείται από μια δεξαμενή, το είδος του φίλτρου και έναν ελεγκτή για να ενεργοποιήσει την αντίστροφη ροή. Οι περιπτώσεις σε αυτή τη μέθοδο είναι:

A) Φιλτράρισμα με σίτες

Φιλτράρισμα με χρήση σιτών (screen) γίνεται συνήθως κατά την έναρξη της διαδικασίας καθαρισμού του νερού. Το σχήμα των σιτών εξαρτάται από τα σωματίδια που πρέπει να αφαιρεθούν.

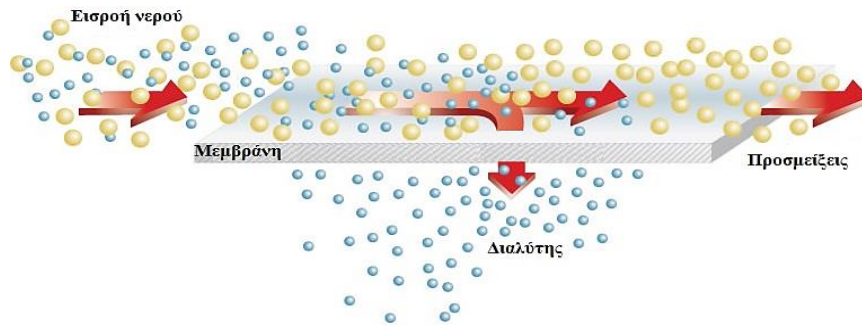
B) Φιλτράρισμα άμμου

Το φιλτράρισμα άμμου (sand filtration) είναι μια συχνά χρησιμοποιούμενη, πολύ ανθεκτική μέθοδος για την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών από το νερό. Το φίλτρο αποτελείται από ένα πολλαπλές στρώσεις άμμου με μια ποικιλία στο μέγεθος και στη πυκνότητα. Όταν το νερό ρέει μέσα από το φίλτρο, τα αιωρούμενα στερεά συσσωρεύονται στα στρώματα άμμου ως υπόλειμμα και το νερό το οποίο έχει μειωθεί σε αιωρούμενα στερεά, ρέει έξω από το φίλτρο. Όταν τα φίλτρα γεμίζουν με σωματίδια η κατεύθυνση της ροής αντιστρέφεται, προκειμένου να καθαριστεί. Μικρότερα αιωρούμενα στερεά έχουν τη δυνατότητα να περάσουν μέσα από ένα φίλτρο άμμου, έτσι ώστε δεύτερο φιλτράρισμα συχνά να απαιτείται.

Γ) Φιλτράρισμα εγκάρσιας ροής

Το φιλτράρισμα εγκάρσιας ροής (cross-flow filtration) ή διήθηση εγκάρσιας ροής, αφαιρεί άλατα και διαλυμένη οργανική ύλη χρησιμοποιώντας μια διαπερατή μεμβράνη που την διαπερνάνε μόνο οι προσμείξεις. Η υπόλοιπη συγκέντρωση ρέει

κατά μήκος της μεμβράνης και εξέρχεται από το σύστημα και οι προσμείξεις που έχουν διαπεράσει στην άλλη πλευρά της μεμβράνης απομακρύνονται.



Σχήμα 4.3: Σχηματική απεικόνιση φιλτραρίσματος εγκάρσιας ροής. Πηγή ^[97].

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές τεχνικές διήθησης εγκάρσιας ροής και αυτές είναι: *μικροδιήθηση* (micro-filtration), *υπερδιήθηση* (ultra-filtration), *νανοδιήθηση* (nano-filtration) και *διήθηση αντίστροφης ώσμωσης* (RO, Reverse Osmosis). Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής εξαρτάται από το είδος των ενώσεων που πρέπει να αφαιρεθούν και το μέγεθος των σωματιδίων τους. Παρακάτω αναλύονται οι τεχνικές της διήθησης εγκάρσιας ροής.

Γ.1) Μικροδιήθηση (Micro-filtration)

Μικροδιήθηση είναι μια τεχνική διαχωρισμού μέσω μεμβράνης στην οποία πολύ λεπτά σωματίδια με μέγεθος από 0,1 έως 1,5 μm απομακρύνονται από ένα υγρό. Η μικροδιήθηση είναι ικανή να απομακρύνει αιωρούμενα στερεά, βακτήρια ή άλλες ακαθαρσίες. Μεμβράνες μικροδιήθησης έχουν ονομαστικό μέγεθος πόρου 0,2 μm.

Γ.2) Υπερδιήθηση (Ultra-filtration)

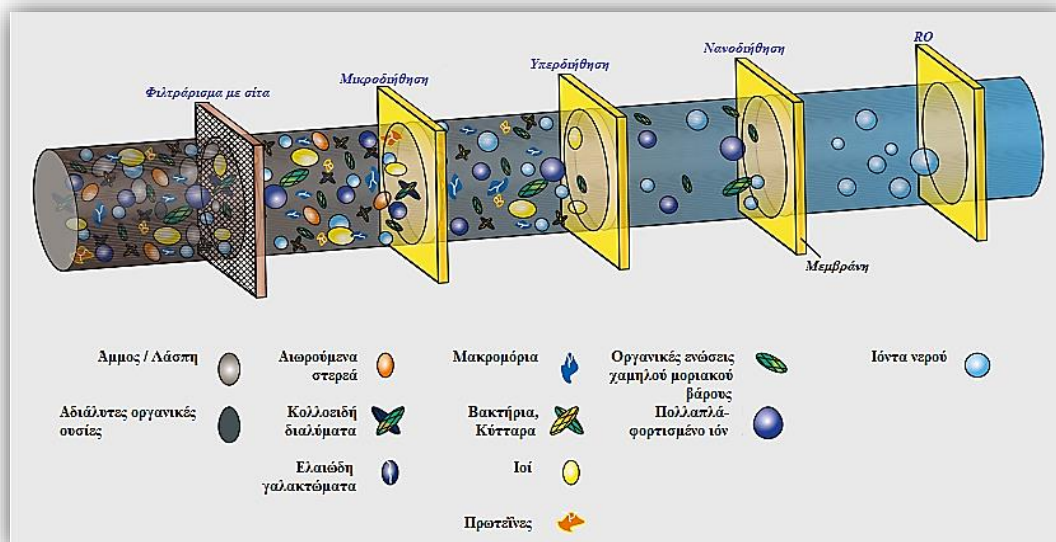
Η υπερδιήθηση είναι μια τεχνική διαχωρισμού μέσω μεμβράνης στην οποία πολύ λεπτά σωματίδια με μέγεθος από 0,005 έως 0,1 μm, χωρίζονται από ένα υγρό. Η υπερδιήθηση είναι ικανή να απομακρύνει άλατα, πρωτεΐνες και άλλες ακαθαρσίες που έχουν μέγεθος από 0,005 – 1 μm. Οι μεμβράνες υπερδιήθησης έχουν ονομαστικό μέγεθος πόρου 0.0025 έως 0,1 μm.

Γ.3) Νανοδιήθηση (Nano-filtration)

Η νανοδιήθηση είναι μια τεχνική διαχωρισμού μέσω μεμβράνης στην οποία πολύ λεπτά σωματίδια με μέγεθος από 0,0001 έως 0,005 μm, χωρίζονται από ένα υγρό. Η νανοδιήθηση είναι ικανή να απομακρύνει ιούς, φυτοφάρμακα και ζιζανιοκτόνα.

Γ.4) Αντίστροφη Ωσμωση (RO, Reverse Osmosis)

Η αντίστροφη ώσμωση ή RO είναι η καλύτερη διαθέσιμη τεχνική διαχωρισμού μέσω μεμβράνης. Η RO μεμβράνη χωρίζει πολύ λεπτά σωματίδια μέχρι την κλίμακα 0,001 μm. Απομακρύνει ιόντα μετάλλου και υδατικά άλατα.



Σχήμα 4.4: Η διαπερατότητα σε κάθε τεχνική φιλτραρίσματος εγκάρσια ροής. Απεικονίζεται επίσης και η διαπερατότητα με χρήση φιλτραρίσματος με σίτα. Πηγή^[98].

4.4.3.2 Χημικό φιλτράρισμα νερού (chemical water purification)

Ο χημικός καθαρισμός νερού χρησιμοποιεί πολλές μεθόδους. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από το είδος της μόλυνσης στο νερό. Ακολουθούν οι τεχνικές χημικού καθαρισμού.

A) Διαύγαση

Διαύγαση (clarification) είναι μια διαδικασία πολλών σταδίων για την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών. Πρώτα, προστίθενται πηκτικά (coagulants). Τα πηκτικά σωματίδια μειώνουν τα φορτία των ιόντων, έτσι ώστε να συσσωρεύονται σε μεγαλύτερα σωματίδια που ονομάζονται κροκίδες (floculants). Οι κροκίδες στη συνέχεια θα καταλήξουν με τη βαρύτητα σε δεξαμενές καθίζησης ή θα αφαιρεθούν καθώς οι ροές του νερού θα περάσουν μέσα από ένα φίλτρο βαρύτητας. Σωματίδια μεγαλύτερα από 25 μm απομακρύνονται αποτελεσματικά με τη μέθοδο της διαύγασης. Το νερό μπορεί να περιέχει ακόμα κάποια αιωρούμενα στερεά και ως εκ τούτου χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία.

B) Απιονισμός και αποσκλήρυνση

Ο απιονισμός (deionisation) συνήθως χρησιμοποιείται μέσω ανταλλαγής ιόντων. Τα συστήματα ανταλλαγής ιόντων αποτελούνται από μία δεξαμενή με μικρές κλίνες συνθετικής ρητίνης, το οποίο εκλεκτικά απορροφά ορισμένα κατιόντα ή ανιόντα και

να τα αντικαθιστά με αντίθετα ιόντα. Η διαδικασία ανταλλαγής ιόντων διαρκεί, έως ότου όλοι οι διαθέσιμοι χώροι γεμίζουν με ιόντα. Στη συνέχεια πρέπει να αναγεννηθεί με κατάλληλες χημικές ουσίες.

Ως εναλλάκτες ιόντων χρησιμοποιείται συνήθως αποσκληρυντικό νερού. Αυτή η συσκευή απομακρύνει τα ιόντα ασβεστίου και μαγνησίου από το σκληρό νερό, με την αντικατάστασή τους με άλλα θετικά φορτισμένα ιόντα, όπως νάτριο.

Γ) Απολύμανση

Η απολύμανση (disinfection) είναι ένα από τα πιο σημαντικά βήματα στον καθαρισμό του νερού που χρησιμοποιείται σε πόλεις και κοινότητες. Εξυπηρετεί το σκοπό της θανάτωσης των ανεπιθύμητων μικροοργανισμών που βρίσκονται στο νερό, τα απολυμαντικά συχνά αναφέρεται ως βιοκτόνα. Υπάρχει μια ποικιλία τεχνικών διαθέσιμων για την απολύμανση υγρών και επιφανειών, όπως: απολύμανση με όζον, την απολύμανση με υπεριώδη ακτινοβολία (UV) και την απολύμανση με χλώριο.

Α) Χλώριο

Το χλώριο έχει ένα μειονέκτημα: μπορεί να αντιδράσει σε χλωραμίνες και χλωριωμένους υδρογονάνθρακες, οι οποίες είναι επικίνδυνες καρκινογόνες ουσίες. Για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιείται διοξείδιο του χλωρίου. Το διοξείδιο του χλωρίου είναι ένα αποτελεσματικό βιοκτόνο σε συγκεντρώσεις τόσο χαμηλές όσο 0,1 ppm και επί μιας ευρείας κλίμακας pH. Το ClO₂ διαπερνά το κυτταρικό τοίχωμα των βακτηρίων και αντιδρά με αμινοξέα στο κυτταρόπλασμα του κυττάρου για να σκοτώσουν τον οργανισμό. Το παραπροϊόν αυτής της αντίδρασης είναι χλωρίτη. Τοξικολογικές μελέτες έχουν δείξει ότι η απολύμανση διοξειδίου χλωρίου με το παραπροϊόν, τον χλωρίτη, δεν ενέχει σημαντικές δυσμενείς κίνδυνο για την υγεία του ανθρώπου.

Ε) Όζον

Το όζον χρησιμοποιείται για την απολύμανση του πόσιμου νερού στη βιομηχανία ύδρευσης στην Ευρώπη για πάνω από εκατό χρόνια και χρησιμοποιείται από ένα μεγάλο αριθμό εταιριών ύδρευσης. Όταν το όζον αντιμετωπίζει βακτήρια ή ιούς, το επιπλέον άτομο οξυγόνου τους καταστρέφει εντελώς από την οξείδωση. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας το επιπλέον άτομο οξυγόνου καταστρέφεται και δεν υπάρχουν βακτήρια ή επιπλέον άτομα. Το όζον δεν είναι μόνο ένα αποτελεσματικό απολυμαντικό, είναι επίσης ιδιαίτερα ασφαλές για χρήση.

ΣΤ) Υπεριώδη ακτινοβολία

Η υπεριώδη ακτινοβολία (UV radiation) χρησιμοποιείται επίσης για την απολύμανση στις μέρες μας. Όταν εκτίθενται στο φως του ήλιου, τα μικρόβια, τα βακτήρια και οι μύκητες σκοτώνονται αποτρέποντας την εξάπλωσή τους. Αυτή η φυσική διαδικασία απολύμανσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί πιο αποτελεσματικά με την εφαρμογή υπεριώδους ακτινοβολίας με έναν ελεγχόμενο τρόπο.

Z) Απόσταξη

Απόσταξη (distillation) είναι η συλλογή των υδρατμών, μετά από βρασμό του εισερχόμενου στη μονάδα νερού. Χρειάζεται ένα σωστά σχεδιασμένο σύστημα απομάκρυνσης των οργανικών και ανόργανων ρυπαντών και βιολογικών προσμίξεων, επειδή οι περισσότεροι προσμείξεις δεν εξατμίζονται. Το νερό θα περάσει από το να το συμπύκνωμα και οι ξένες προσμίξεις θα παραμείνουν στη μονάδα εξάτμισης.

H) Ηλεκτροδιάλυση

Η ηλεκτροδιάλυση (electrodialysis) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί ηλεκτρικό ρεύμα και ειδικές μεμβράνες, οι οποίες είναι διαπερατές σε ιόντα, με βάση το φορτίο τους. Οι μεμβράνες που την διαπερνούν κατιόντα και μεμβράνες που την διαπερνούν ανιόντα τοποθετούνται εναλλάξ, με κανάλια ροής μεταξύ τους, και τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε κάθε πλευρά των μεμβρανών. Τα ηλεκτρόδια συντάζει αντίθετα τα ιόντα τους μέσα από τις μεμβράνες, έτσι ώστε αυτά να απομακρύνονται από το νερό.

Θ) Ρύθμιση του pH

Το νερό από τον Δήμο έχει συχνά ρυθμισμένο pH, προκειμένου να αποτρέψει τη διάβρωση στους σωλήνες και να αποτραπεί η διάλυση από μόλυβδο στις παροχές νερού. Το pH ρυθμίζεται μέσω της προσθήκης υδροχλωρίου, σε περίπτωση ενός βασικού υγρού, ή υδροξειδίου και νατρίου, στην περίπτωση ενός όξινου υγρού. Το pH θα μετατραπεί σε περίπου 7 έως 7,5 μετά την προσθήκη ορισμένων συγκεντρώσεων των ουσιών αυτών.

I) Οργανική εκκαθάριση

Οι περισσότερες οργανικές ουσίες έχουν ένα ελαφρώς αρνητικό φορτίο. Η οργανική εκκαθάριση (scavenging) γίνεται με την προσθήκη ισχυρής βάσεως ρητίνης ανιόν. Τα οργανικά θα γεμίσουν τη ρητίνη και όταν αυτό έχει φορτωθεί αναγεννάται με υψηλές συγκεντρώσεις χλωριούχου νατρίου.

4.4.3.3 Βιολογικό φιλτράρισμα νερού (biological water purification)

Ο βιολογικός καθαρισμός του νερού γίνεται για να μειωθεί το οργανικό φορτίο των διαλυμένων οργανικών ενώσεων. Μικροοργανισμοί, κυρίως βακτήρια, κάνουν την αποσύνθεση των ενώσεων αυτών. Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες της βιολογικής επεξεργασίας: αερόβια επεξεργασία και αναερόβια επεξεργασία.

Η BOD (Biochemical Oxygen Demand) ορίζει το οργανικό φορτίο. Σε αερόβια συστήματα το νερό αερίζεται με πεπιεσμένο αέρα (σε ορισμένες περιπτώσεις απλώς οξυγόνο), ενώ σε αναερόβια συστήματα εκτελούνται σε συνθήκες χωρίς οξυγόνο.

4.5 Μέθοδος προκατεργασίας ωσμωτικής μονάδας PRO

Από τη δημοσίευση του Gerstandt^[83], προκύπτει ότι μηχανικό φίλτράρισμα μέχρι 50μm σε συνδυασμό με σταθερό καθαρισμό των μεμβρανών είναι αρκετό για να διατηρηθούν οι μεμβράνες έως 7-10 χρόνια. Η χαμηλή θερμοκρασία (κάτω των 10 °C) είναι σημαντική για την μείωση της πιθανότητας βιορύπανσης^[99].

Στη δημοσίευση του Yip και Elimelech^[51] αναφέρεται ότι με τη χρήση υπόγειων υδάτων όπου θα φιλτράρονται φυσικά από το υπέδαφος (subsurface), θα μειωθούν οι απώλειες ενέργειας για τη χρήση προκατεργασίας νερού, και κατά συνέπεια θα μειωθεί η ρύπανση των μεμβρανών. Ένας άλλος τρόπος για τον καθαρισμό μπορεί να αποτελέσει, σύμφωνα πάλι με τους Yip και Elimelech^[94], η διακοπτόμενη ωσμωτική ανάστροφη πλύση των βουλωμένων μεμβρανών, απαιτώντας μόνο την ενέργεια άντλησης με τον χρόνο λειτουργίας να θεωρείται αμελητέος.

Η επιλογή της μεθόδου προκατεργασίας στην ωσμωτική μονάδα PRO (κεφάλαιο 5) θα γίνει βάσει οικονομικών κριτηρίων για την επίτευξη χαμηλού κόστους κεφαλαίου. Όμως, η αντιμετώπιση της ρύπανσης των μεμβρανών θα πρέπει να γίνει μέσω της βελτίωσης των μεμβρανών παρά με την ανάπτυξη τεχνολογιών προκατεργασίας νερού. Η ρύπανση των μεμβρανών παραμένει ένα σημαντικό ζήτημα της τεχνολογίας PRO.

Η μέθοδος καθαρισμού των μεμβρανών έχει προταθεί από τον Thorsen^[100] σε συντήρηση της μονάδας και περιλαμβάνει σωλήνες που θα οδηγούν τα δύο διαλύματα ανάστροφα στις πλευρές της μεμβράνης ώστε να μειώνεται η συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας. Η χημική προσθήκη θα είναι το χλώριο.

4.5 Ωσμωτική μεμβράνη

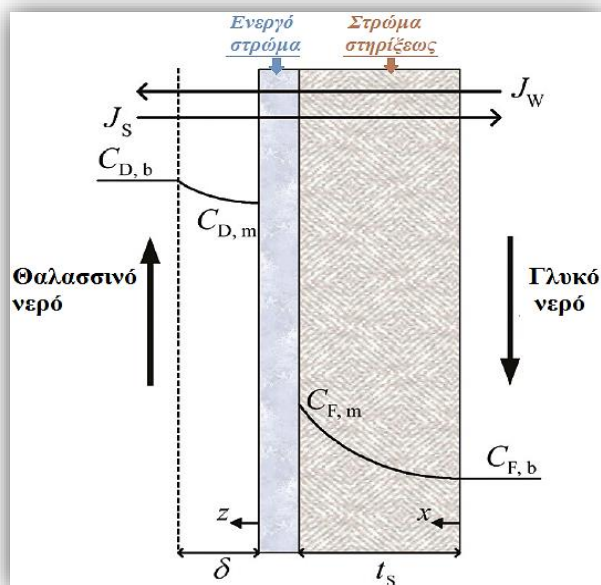
4.5.1 Ορισμός μεμβράνης

Ο πρωταρχικός ρόλος μιας μεμβράνης είναι να ενεργεί ως ένα εκλεκτικό φράγμα (selective barrier). Επιτρέπει το πέρασμα ορισμένων συστατικών και συγκρατεί άλλα συστατικά ενός μίγματος, διαχωρίζοντας δύο φάσεις και περιορίζοντας την μεταφορά των διαφόρων χημικών ειδών με ένα ειδικό τρόπο. Ο διαχωρισμός λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια της μεμβράνης, ή στην μεμβράνη την ίδια.

Μια μεμβράνη μπορεί να είναι ομοιογενής ή ετερογενής, συμμετρική ή ασύμμετρη ως προς τη δομή, μπορεί να είναι στερεή ή υγρή, μπορεί να είναι ουδέτερη, μπορεί να φέρει θετικά ή αρνητικά φορτία, ή μπορεί να είναι διπολική. Το πάχος της μπορεί να κυμαίνεται από μερικά nm έως ενός εκατοστού. Η μεταφορά μάζας μέσω μιας μεμβράνης μπορεί να προκληθεί από την μετάδοση θερμότητας ή με διάχυση μεμονωμένων μορίων, περιλαμβανόμενα από ένα ηλεκτρικό πεδίο, ή μια βαθμίδα συγκέντρωσης από πίεση ή θερμοκρασία^[101].

4.5.2 Δομή ωσμωτικής μεμβράνης

Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται σε ωσμωτικές εφαρμογές περιορίζουν την διέλευση του άλατος (J_s) και επιτρέπουν τη διέλευση του γλυκού νερού (J_w). Στο σχήμα 4.5 απεικονίζεται η μεταφορά νερού και άλατος δια μέσω μιας ωσμωτικής μεμβράνης όταν συντελείται η μέθοδος PRO.



Σχήμα 4.5: Η ροή νερού και άλατος δια μέσω ωσμωτικής μεμβράνης. Πηγή ^[102].

Η δομή των ωσμωτικών μεμβρανών είναι συνήθως ασύμμετρες, αποτελούμενες από μια λεπτή μη-πορώδη πυκνή στρώση, που ονομάζεται ενεργό στρώμα (active layer), πάνω σε ένα πορώδες στρώμα στήριξης (support layer), όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5 ^[41,101]. Τα διαλύματα εισέρχονται στην μεμβράνη με εγκάρσια ροή. Η ωσμωτική διαδικασία πραγματοποιείται στην ημι-διαπερατή στρώση της μεμβράνης. Η μεταφορά μάζας μέσα στο υπόλοιπο της μεμβράνης κυριαρχείται από υδραυλική ροή. Οι πορώδεις δομές στην μεμβράνη, χρησιμεύουν κυρίως στην μηχανική υποστήριξη του ενεργού στρώματος, μειώνοντας όμως την αποδοτικότητα της μεμβράνης.

Στις PRO εφαρμογές, το ενεργό στρώμα της μεμβράνης είναι προς τη πλευρά του θαλασσινού νερού και η πορώδης στρώση στήριξης είναι προς την πλευρά του διαλύματος τροφοδοσίας (σχήμα 4.5). Αυτός ο προσανατολισμός είναι απαραίτητος να εξασφαλίζει ότι η μεμβράνη μπορεί να αντέξει την υδραυλική πίεση που προκαλείται από την πλευρά του θαλασσινού νερού.

Η ροή του άλατος (J_s) γίνεται από το θαλασσινό νερό μέσω της μεμβράνης προς στο γλυκό νερό. Το σχήμα 4.5 δείχνει την βαθμίδωση άλατος μέσω της μεμβράνης. $C_{F,b}$ είναι η συγκέντρωση άλατος στη πλευρά του γλυκού νερού, το $C_{F,m}$ είναι η συγκέντρωση άλατος στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ του στρώματος στήριξης της

μεμβράνης και του ενεργού στρώματος της μεμβράνης, $C_{D,m}$ είναι η συγκέντρωση άλατος στην επιφάνεια του ενεργού στρώματος της μεμβράνης, ενώ το $C_{D,b}$ είναι η συγκέντρωση άλατος στη πλευρά του θαλασσινού νερού.

Το σχήμα 4.5 απεικονίζει ότι υπάρχει μια σημαντική βαθμίδα άλατος στο στρώμα στήριξης της μεμβράνης, η οποία είναι η διαφορά μεταξύ των $C_{F,m}$ και $C_{F,b}$. Αυτή η βαθμίδωση άλατος πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, κάτι που επιτυγχάνεται όταν το στρώμα στήριξης επιτρέπει τη γρήγορη διάχυση των μορίων άλατος στο γλυκό νερό. Ομοίως, είναι σημαντικό να ελαχιστοποιηθεί η βαθμίδωση άλατος στην πλευρά του νερού της θάλασσας ($C_{D,m} - C_{D,b}$) η οποία επιτυγχάνεται όταν έχει επαρκή ταχύτητα κατά μήκος της μεμβράνης τόσο στο θαλασσινό νερό. Η βαθμίδωση άλατος δια μέσου του δέρματος της μεμβράνης ($C_{D,m} - C_{F,m}$) πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο υψηλή, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της υψηλής διαπερατότητας νερού και χαμηλής διαπερατότητα άλατος της μεμβράνης^[53,101].

4.5.3 Ροή νερού και άλατος δια μέσω της μεμβράνης

Η ροή του διαλύτη, J_w , δια μέσω της μεμβράνης σε ιδανικές συνθήκες δίνεται από την εξίσωση 3.2 (κεφάλαιο 3), $J_w = A(\Delta\pi - P)$.

Κανένα δέρμα δεν είναι ιδανικά ημι-διαπερατό και γι' αυτό μικρή ποσότητα άλατος θα διαχυθεί μέσω του δέρματος. Με αλμυρό νερό στο ενεργό στρώμα της μεμβράνης το αλάτι θα διαχυθεί μέσα στην πορώδη υποδομή προς τη πλευρά του γλυκού νερού με αποτέλεσμα η συγκέντρωση άλατος να αυξηθεί στη πλευρά του γλυκού νερού. Η αντίστροφη ροή άλατος, J_s , περιγράφεται από την εξίσωση^[41,76,101,103]:

$$-J_s = B(C_{D,m} - C_{F,m}) \quad (4.13)$$

Όπου B είναι ο συντελεστής διαπερατότητας του άλατος δια μέσω της μεμβράνης, $C_{D,m}$ and $C_{F,m}$ είναι οι συγκεντρώσεις της διαλυμένης ουσίας στην επιφάνεια του ενεργού στρώματος από την πλευρά του θαλασσινού και του γλυκού νερού αντίστοιχα. Η ροή άλατος έχει αρνητικό πρόσημο επειδή είναι αντίθετη της ροής του νερού.

4.5.4 Ροή του νερού σε ένα σύστημα PRO κάτω από πραγματικές συνθήκες - Η επίδραση της πόλωσης συγκέντρωσης και της αντίστροφης ροής άλατος

Σε ένα σύστημα PRO πρέπει να ληφθούν υπόψιν η επίδραση της πόλωσης συγκέντρωσης (concentration polarization) και της αντίστροφης ροής άλατος (reverse salt flux) και η. Ακολουθεί στη συνέχεια η ανάλυση των δυο αυτών επιδράσεων.

4.5.4.1 Πόλωση συγκέντρωσης

Με ροή άλατος διαμέσου της μεμβράνης ένα φαινόμενο που λαμβάνει χώρα και μειώνει την διαφορά ωσμωτικής πίεσης ονομάζεται **πόλωση συγκέντρωσης** (concentration polarization). Οι αρχικές μελέτες ωσμωτικής ενέργειας βασίστηκαν σε μεμβράνες RO εγκαταστημένες σε διάταξη PRO εργαστηριακής κλίμακας όπου και

παρατηρήθηκε το φαινόμενο επειδή συνέβαλε στην δραστική μείωση της αποτελεσματικότητας της μεμβράνης^[50,104-109]. Ως αποτέλεσμα η ροή νερού, J_w , δια μέσω των μεμβρανών μειώνεται.

Η πόλωση συγκέντρωσης είναι η συσσώρευση ή μείωση των διαλυμένων ουσιών κοντά σε μια διεπαφή και προκαλείται από τη ροή άλατος και ύδατος μέσω της μεμβράνης σε αντίθετες κατευθύνσεις^[110]. Η πόλωση συγκέντρωσης συμβαίνει μέσα στο πορώδες στρώμα στήριξης και δεν μπορεί να μειωθεί μεταβάλλοντας την ταχύτητα της ροής κατά μήκος της μεμβράνης^[111]. Χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, την εσωτερική πόλωση συγκέντρωσης (ICP) και την εξωτερική πόλωση συγκέντρωσης (ECP).

4.5.4.1 Εσωτερική πόλωση συγκέντρωσης (ICP)

Καθώς το νερό διέρχεται μέσω της μεμβράνης, ο διαλύτης επιλεκτικά συγκρατείται από το ενεργό στρώμα της ημι-διαπερατής μεμβράνης και συσσωρεύεται μέσα στο στρώμα στηρίξεως. Ως επακόλουθο, η συγκέντρωση άλατος στην διεπαφή ενεργού στρώματος-στρώματος στηρίξεως, $C_{F,m}$, αυξάνεται, μειώνοντας την απόδοση της μεμβράνης και κατά συνέπεια τη ροή J_w . Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **εσωτερική πόλωση συγκέντρωσης (ICP, Internal Concentration Polarization)**. Συμβαίνει όταν το ενεργό στρώμα της μεμβράνης βρίσκεται από τη πλευρά της διαλυμένης ουσίας^[3A39].

Η διάχυση του διαλύτη προσπαθεί να αποκαταστήσει αυτή την τοπική συγκέντρωση, $C_{F,b}$, αλλά εμποδίζεται από το πορώδες στρώμα στηρίξεως^[54,111,112]. Η επίδραση της ICP φαίνεται από την παρατήρηση της εξίσωσης 4.14 όπου η ωσμωτική πίεση π_F του διαλύτη μεγαλώνει κατά έναν παράγοντα $\exp(J_w S/D)$.

4.5.4.2 Εξωτερική πόλωση συγκέντρωσης (ECP)

Η δεύτερη κατηγορία είναι η (μειωτική) **εξωτερική πόλωση συγκέντρωσης (ECP, External Concentration Polarization)**. Καθώς το νερό διέρχεται δια μέσω της μεμβράνης, αραιώνει η διαλυμένη ουσία και μειώνει τη συγκέντρωση άλατος στο ενεργό στρώμα, $C_{D,m}$, με αποτέλεσμα να μειώνει την ωσμωτική πίεση μεταξύ διαλύματος-επιφάνειας μεμβράνης $\Delta\pi$, ελαττώνοντας την προκύπτουσα ροή του νερού (η εξωτερική συγκέντρωση πόλωσης στο στρώμα στήριξης είναι αμελητέα). Η επίδραση της ECP θεωρείται αμελητέα για μικρές τιμές πυκνότητας ενέργειας, αλλά σε μεγάλες τιμές της πυκνότητας ενέργειας η επίδραση είναι δυσμενή για τη μείωση της απόδοσης PRO^[54,111,112]. Η επίδραση της ECP στη ροή νερού αντικατοπτρίζεται στην εξίσωση 4.14 όπου η ωσμωτική πίεση της διαλυμένης ουσίας μειώνεται κατά έναν παράγοντα $\exp(-J_w/k)$. Για την μείωση της επίδρασης ECP πρέπει να επιλεγθεί η κατάλληλη τιμή υδροδυναμικής ροής, καθώς, ενώ με αύξηση της υδροδυναμικής ροής θα αυξηθεί τη πυκνότητα ενέργειας, θα αυξηθούν επίσης και οι παρασιτικές υδραυλικές απώλειες οδηγώντας σε αύξηση του κόστους αντλιών^[54].

4.5.4.2 Αντίστροφη ροή άλατος (Reverse salt flux)

Η επιβλαβή επίδραση της ICP επιδεινώνεται από την αντίστροφη ροή της διαλυμένης ουσίας, J_s^R , όπου η διαλυμένη ουσία διαπερνά από τη πλευρά διαλυμένης ουσίας προς τη πλευρά του διαλύτη. Η διαρροή διαλυμένης ουσίας συσσωρεύεται στην πορώδη στήριξη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαφοράς ωσμωτικής πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης, $\Delta\pi$, καθώς η ωσμωτική πίεση είναι ανάλογη της συγκέντρωσης άλατος, και κατά συνέπεια της ωσμωτικής κινητήριας δύναμης και της ροής νερού^[50,54,103,113]. Η αρνητική επίδραση της σύνδεσης της αντιστροφής ροής άλατος μαζί με την ICP αντικατοπτρίζεται στον παρονομαστή της εξίσωση 4.14, όπου η διαφορά ωσμωτικής πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης μειώνεται κατά έναν παράγοντα $1+B/J_w[\exp(J_w S/D)-\exp(-J_w/k)]$.

Ο Phillip^[76] εισήγαγε τον όρο “επιλεκτικότητα αντίστροφης ροής” (reverse flux selectivity) για να περιγράψει τη αντιστροφή της διαλυμένης ουσίας προς τον διαλύτη. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η επιλεκτικότητα αντίστροφης ροής καθορίζεται μόνο από την διαπερατότητα του ενεργού στρώματος της μεμβράνης.

4.5.5 Πραγματική ροή νερού (J_{act})

Η πραγματική ροή νερού (J_{act}) στη μέθοδο PRO περιλαμβάνοντας τα φαινόμενα ICP, ECP και την αναστροφή άλατος είναι ^[102]:

$$J_{act} = A(\Delta\pi - \Delta P) = A \left\{ \frac{\pi_D \exp\left(-\frac{J_w}{k}\right) - \pi_F \exp\left(\frac{J_w S}{D}\right)}{1 + \frac{B}{J_w} \left[\exp\left(\frac{J_w S}{D}\right) - \exp\left(-\frac{J_w}{k}\right) \right]} - \Delta P \right\} \quad (4.14)$$

Όπου π_D και π_F είναι οι ωσμωτικές πιέσεις της διαλυμένης ουσίας και του διαλύτη αντίστοιχα, k είναι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας για ένα κύτταρο μεμβράνης και υπολογίζεται από συσχετισμούς στην γεωμετρία της μεμβράνης^[103,114], S η δομική παράμετρος του στρώματος στήριξης της μεμβράνης και D είναι ο συντελεστής διάχυσης του διαλύτη. Ο παράγοντας ICP, $\exp(J_w S/D)$, παίρνει τιμές από 1 έως ∞ , ο παράγοντας ECP, $\exp(-J_w/k)$, παίρνει τιμές από 0 έως 1^[3A31]. Στην εξίσωση 4.14 θεωρήθηκε ότι ωσμωτική πίεση είναι γραμμικά ανάλογη της συγκέντρωσης άλατος ώστε η εξίσωση van't Hoff να είναι εφαρμόσιμη^[103].

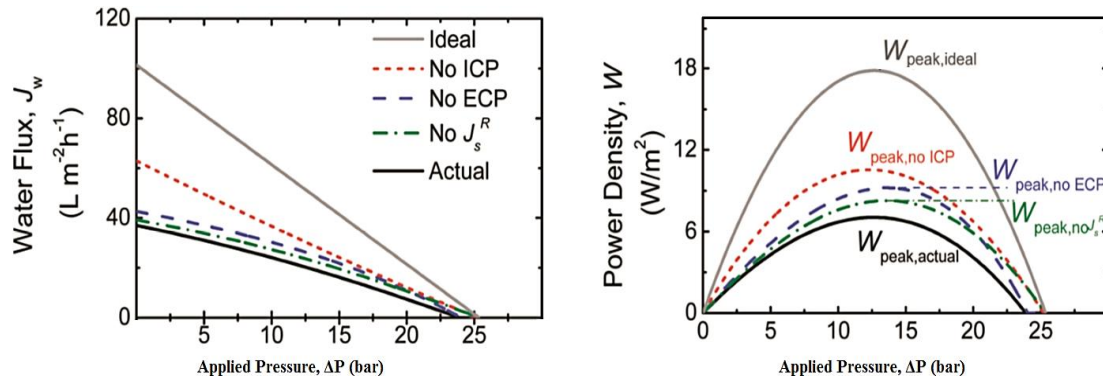
4.5.6 Πυκνότητα ενέργειας (W)

Η ισχύς η οποία μπορεί να παραχθεί ανά μονάδα επιφάνειας της μεμβράνης (δηλ. η πυκνότητα ενέργειας, W) είναι ίση με το γινόμενο της ροής του νερού και της διαφοράς της υδραυλικής πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης^[83]:

$$W = J_{act} \Delta P \quad (4.15)$$

όπου η πυκνότητα ενέργειας της μεμβράνης έχει μονάδα μέτρησης σε W/m^2 , ΔP σε bar. Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει η πυκνότητα ενέργειας τόσο μειώνει τον συνολικό αριθμό μεμβρανών που απαιτούνται για την ίδια ποσότητα ενέργειας.

Στο σχήμα 4.6 που ακολουθεί αναπαριστώνται η πραγματική ροή (J_{act}) και η πυκνότητα ενέργειας (W) συναρτήσει της εφαρμοζόμενης υδραυλικής πίεσης, ΔP . Παρατηρείται και γραφικά ότι σε συνδυασμό τα τρία επιζήμια φαινόμενα ECP, ICP και η αναστροφή ροής άλατος μειώνουν τη ροή και τη πυκνότητα ενέργειας.



Σχήμα 4.6: Η ροή νερού (αριστερά) και πυκνότητα ενέργειας (δεξιά) σε σχέση με την εφαρμοζόμενη υδραυλική πίεση. Η ιδανική ροή νερού και πυκνότητα ενέργειας (άνω καμπύλη) στην οποία δεν υφίσταται καμία επίδραση έχουν υπολογισθεί από την εξίσωση 3.2 (για τη ροή νερού) και την εξίσωση 4.15 (για την πυκνότητα ενέργειας), με την παράμετρο $A = 4.0 m^3 m^{-2} h^{-1} bar^{-1}$. Η μαύρη καμπύλη (κάτω καμπύλη) παριστάνει την πραγματική ροή νερού και πυκνότητα ενέργειας έχοντας υπολογισθεί από την εξίσωση 4.14 και 4.15. Οι διακεκομμένες γραμμές αναφέρονται στη ροή νερού και πυκνότητα ενέργειας όταν το κάθε φαινόμενο επιδρά ξεχωριστά (ICP=Internal Concentration Polarization, ECP=External Concentration Polarization και J_s^R =αντιστροφή ροής άλατος). Το σχήμα ανακτήθηκε από ^[54].

Από το σχήμα 4.6 παρατηρείται επίσης ότι, σε ιδανικές συνθήκες η ροή νερού είναι της τάξης των $50 L m^{-2} h^{-1}$ και η πυκνότητα ενέργειας περίπου $18 W m^{-2}$. Όμως, σε πραγματικές συνθήκες η ροή νερού είναι μόνο $20 L m^{-2} h^{-1}$ και η πυκνότητα ενέργειας περίπου $6 W m^{-2}$ λόγω της επίδρασης των φαινομένων ICP, ECP και αναστροφή ροής άλατος στην απόδοση ενός PRO συστήματος.

4.5.6.1 Μέγιστη πυκνότητα ενέργειας

Μια μονάδα PRO πρέπει να λειτουργεί με μεγάλη πυκνότητα ενέργειας για να μεγιστοποιήσει την αξιοποιήσιμη περιοχή της μεμβράνης και να μειώσει το κόστος κεφαλαίου^[115,116]. Για την επίτευξη της μέγιστης τιμής πυκνότητας ενέργειας (W_{peak}) πρέπει η υδραυλική πίεση (ΔP) να είναι περίπου η μισή της διαφοράς ωσμωτικής πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης ($\Delta\pi$). Με διαφοροποίηση της εξίσωσης 4.15 ως προς ΔP , μπορεί να αποδειχθεί ότι το W φθάνει σε ένα μέγιστο, όταν $\Delta P = \Delta\pi/2$. Αντικαθιστώντας το ΔP προκύπτει:

$$W_{max} = A \cdot \frac{\Delta\pi^2}{4} \quad (4.16)$$

4.5.6.2 Πυκνότητα ενέργειας στην σταθερή κατάσταση

Η τιμή της μέγιστη πυκνότητας ενέργειας είναι στην αρχική συνθήκη λειτουργίας. Λόγω της ωσμωτικής διαδικασίας, η πυκνότητα ενέργειας μειώνεται με τη πάροδο του χρόνου. Η μεταβολή στη βέλτιστη πυκνότητα ισχύος σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα δίνει τη μέση πυκνότητα ενέργειας^[42]:

$$W_{avg} = \frac{\int_{t_0}^t W_{max} dt}{t - t_0} \quad (4.17)$$

Από την εξίσωση 4.17 παρατηρείται ότι η μέση βέλτιστη πυκνότητα είναι αμελητέα όταν ο χρόνος λειτουργίας είναι απείρως μικρός ή μεγάλος. Ο χρόνος λειτουργίας πρέπει λοιπόν να βελτιστοποιηθεί έτσι ώστε η μέση πυκνότητα ισχύος να είναι περίπου ίση με τη μέγιστη πυκνότητα ισχύος. Αυτό επιτυγχάνεται με ρύθμιση των ροών εισόδου και εξόδου. Έτσι η μέση πυκνότητα ενέργειας συγκλίνει στη πυκνότητα ενέργειας στην σταθερή κατάσταση^[42].

4.5.7 Παράμετροι της μεμβράνης (A,B,S)

Οι κύριοι παράμετροι που επηρεάζουν την ροή και την πυκνότητα ενέργειας και χαρακτηρίζουν τη μεμβράνη είναι η δομική παράμετρος του στρώματος στηρίξεως (S), η διαπερατότητα άλατος στο ενεργό στρώμα (B) και η διαπερατότητα νερού στο ενεργό στρώμα (A).

Η παράμετρος S (δομική παράμετρος, σε m) αντιπροσωπεύει την αντίσταση στη μεταφορά άλατος στο πορώδες υπόστρωμα (στρώμα στήριξης της μεμβράνης), είναι δηλαδή η μέση απόσταση που πρέπει να διανύσει ένα μόριο διαλυμένης ουσίας δια μέσω του στρώματος στήριξης, όταν μεταφέρεται από το ενεργό στρώμα προς τον διαλύτη. Περιγράφεται από τον τύπο^[39,41,50,83,103,117,118]:

$$S = \frac{\tau \cdot t}{\varepsilon} \quad (4.18)$$

Όπου τ , t και ε είναι η ελίκωση της μεμβράνης (tortuosity, χωρίς διαστάσεις, εξαρτάται από το γεωμετρικό σχεδιασμό της μεμβράνης), το μέσο πάχος της (σε m), και την πορώδη δομή της μεμβράνης (porosity, χωρίς διαστάσεις) αντίστοιχα. Η παράμετρος S καθορίζει την έκταση της ICP και πρέπει να έχει τη μικρότερη δυνατή τιμή για την επίτευξη υψηλής ροής νερού^[54], κάτι που επιβεβαιώνεται από την εξίσωση 4.14 όπου ο παράγοντας ICP αυξάνεται εκθετικά με αύξηση της παραμέτρου S, ($\exp[J_w S/D]$). Οι μεμβράνες RO (Reverse Osmosis) έχουν μεγάλη τιμή S, δηλαδή το στρώμα στήριξης της μεμβράνης είναι παχύ και πυκνό, επειδή οι μεμβράνες αυτές έχουν να αντέξουν μεγάλη υδραυλική πίεση. Στις εφαρμογές PRO, το στρώμα στηρίξεως μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να είναι πολύ λεπτό και με μεγαλύτερους πόρους, αυξάνοντας τη ροή νερού δια μέσω της μεμβράνης.

Η παράμετρος B (διαπερατότητα άλατος, σε $\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$), είναι η μέτρηση της αντίστροφης ροής της διαλυμένης ουσίας προς το διαλύτη. Η διαρροή διαλυμένης ουσίας συσσωρεύεται στο στρώμα στήριξης και αυξάνει περαιτέρω τη διεπιφανειακή ωσμωτική πίεση, παράγοντας μια πρόσθετη μείωση της ωσμωτικής κινητήριας δύναμης. Σε ιδανικές συνθήκες, η παράμετρος αυτή θα είχε τη μικρότερη δυνατή τιμή για την αποφυγή τη συγκέντρωση άλατος στα στρώματα της μεμβράνης.

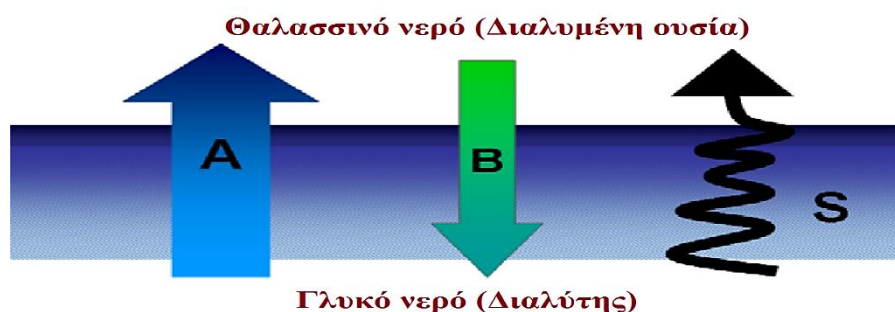
Ο συντελεστής B υπολογίζεται από την εξίσωση^[39,54,75,118,119]:

$$B = J_{act} \left(\frac{1-R}{R} \right) \exp \left(-\frac{J_w}{k} \right) \quad (4.19)$$

όπου J_{act} (εξ.4.14) είναι η πραγματική μεταφορά νερού, k είναι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας για ένα κύτταρο μεμβράνης, υπολογίζεται από συσχετισμούς στην γεωμετρία της μεμβράνης^[103,114] και R είναι η είναι η απόρριψη άλατος που ορίζεται ως εξής:

$$R = 1 - \frac{\text{συγκέντρωση άλατος στον διαλύτη}}{\text{συγκέντρωση άλατος στη διαλυμένη ουσία}} = 1 - \frac{C_{F,b}}{C_{D,b}} \quad (4.20)$$

Η παράμετρος A (διαπερατότητα νερού, $\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{bar}^{-1}$), πρέπει να έχει τη μεγαλύτερη δυνατή τιμή, για να επιτευχθεί η μέγιστη ροή του διαλύτη. Οι τυπικές τιμές που κυμαίνεται η παράμετρος διαπερατότητας A είναι από $0.40 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$ έως $7.7 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$, βάσει των χαρακτηριστικών της μεμβράνης και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες προσδιορίζεται η παράμετρος. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την παράμετρο A είναι η θερμοκρασία, η πίεση γλυκού νερού, η πίεση θαλασσινού νερού, η συγκέντρωση άλατος του θαλασσινού νερού, η ταχύτητα ροής του γλυκού και του θαλασσινού νερού^[39,103,120,121].



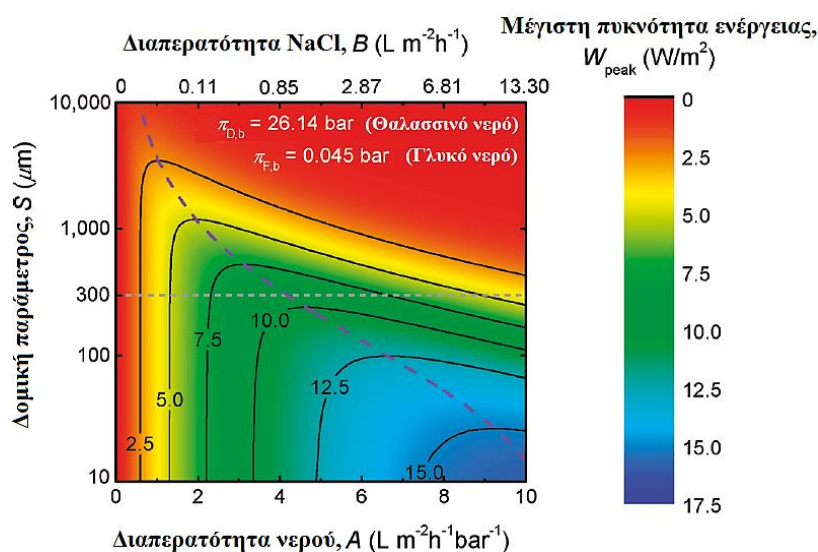
Σχήμα 4.7: Απεικόνιση των παραμέτρων A, B και S σε ωσμωτική μεμβράνη στην περίπτωση PRO. Ανάκτηση από^[111].

4.5.7.1 Εύρεση του συνδυασμού ισορροπίας των παραμέτρων A, B

Σύμφωνα με τη μελέτη του Yip^[103], η αύξηση της διαπερατότητας νερού συνοδεύεται πάντα με αύξηση της διαπερατότητας άλατος, το οποίο είναι ανεπιθύμητο. Για τη μεγιστοποίηση της πυκνότητας ενέργειας σε ένα σύστημα PRO, το ενεργό στρώμα πρέπει να είναι σχεδιασμένο έχοντας σε ισορροπία τις παραμέτρους A και B ,

οι τιμές των οποίων θα εξαρτηθούν από τη τιμή της δομικής παραμέτρου S . Οι μεμβράνες με χαμηλή τιμή S επιτρέπουν ταχύτερη διάχυση διατηρώντας το διάλυμα στο εσωτερικό του στρώματος στήριξης επαρκώς αναμιγμένο, μετριάζοντας έτσι την βλαπτική επίδραση της αναστροφής διαλυμένης ουσίας, οπότε η παράμετρος B μπορεί να είναι μεγαλύτερης τιμής και να μην επηρεαστεί η πυκνότητα ενέργειας.

Ο συνδυασμός ισορροπίας των παραμέτρων A, B μπορεί να προκύψει από το σχήμα 4.8 των Yip και Elimelech^[54]. Για μια τιμή πυκνότητας ενέργειας 5 W m^{-2} που θα καθιστούσε εμπορικά συμφέρουσα λύση τη μονάδα PRO, η παράμετρος S θα πρέπει να έχει τιμή χαμηλότερη από $1,000 \mu\text{m}$.



Σχήμα 4.8: Μέγιστη πυκνότητα ενέργειας (W_{peak}) συναρτήσεως των παραμέτρων της μεμβράνης A, B και S . Η διακεκομμένη οριζόντια γραμμή αντιπροσωπεύει την δομική παράμετρο S με τιμή $300 \mu\text{m}$. Η διαγώνια μωβ γραμμή αντιπροσωπεύει τις βέλτιστες ιδιότητες του ενεργού στρώματος για την επίτευξη της μέγιστης πυκνότητας ενέργειας για τη συγκεκριμένη δομική παράμετρο. Η τιμή της ωσμωτικής πίεσης του draw διαλύματος και του διαλύματος τροφοδοσίας επιλέχθηκαν να έχουν τιμές $\pi_D=26.14\text{bar}$ και $\pi_F=0.045\text{bar}$ αντίστοιχα. Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας στο στρώμα που βρίσκεται η πλευρά του draw διαλύματος τέθηκε στην τιμή $k=38.5\mu\text{m s}^{-1}$. Ανάκτηση από ^[54].

Από το σχήμα 4.8 παρατηρείται επίσης ότι καθώς η μεμβράνη γίνεται πιο διαπερατή για το νερό, αύξηση της παραμέτρου A (από αριστερά προς τα δεξιά) μια αντίστοιχη αύξηση στην τιμή W_{peak} παρατηρείται μέχρι ένα σημείο, μετά το πέρας του οποίου η τιμή W_{peak} μειώνεται με αύξηση της παραμέτρου A . Η μέγιστη τιμή είναι στα 9.29W/m^2 με $S=300\mu\text{m}$ (διακεκομμένη διαγώνια γραμμή), $A = 4.2\text{Lm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$ και $B = 0.99 \text{ Lm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ^[54]. Σε ένα σύστημα PRO η απόδοση της πυκνότητας ενέργειας μεγιστοποιείται με ισορρόπηση των παραμέτρων μεταξύ διαπερατότητας και επιλεκτικότητας στο ενεργό στρώμα της μεμβράνης

4.5.8 Εμπορικά διαθέσιμες ωσμωτικές μεμβράνες

Οι εμπορικά διαθέσιμες ωσμωτικές μεμβράνες δεν είναι ειδικά σχεδιασμένες για εφαρμογές PRO αλλά για εφαρμογές FO και RO. Οι δύο κατηγορίες είναι:

4.5.8.1 Ασύμμετρη μεμβράνη οξικής κυτταρίνης (CA)

Η εμπορικά διαθέσιμη μεμβράνη οξικής κυτταρίνης (CA, Cellulose Acetate) σχεδιασμένη για τη διαδικασία FO, δημιουργεί σχετικά χαμηλή εσωτερική πόλωση συγκέντρωσης (ICP) λόγω του ειδικά σχεδιασμένου στρώμα στηρίξεως^[67,73-75,110,111]. Η σχετικά χαμηλή ενδογενή διαπερατότητα νερού της μεμβράνης, περιορίζει την πυκνότητα ενέργειας που μπορεί να επιτύχει. Επιπλέον, οι οξικής κυτταρίνης μεμβράνες μπορούν να λειτουργήσουν μόνο εντός των ορίων του pH 4-6^[101,103,122], μειώνοντας την αποτελεσματικότητά τους. Οι μεμβράνες CA έδειξαν να συσσωρεύουν ελάχιστη οργανική ύλη (natural organic matter, NOM) και ήταν εύκολο να καθαριστούν. Η PRO διαδικασία εκμεταλλεύεται την ελεγχόμενη ανάμειξη των διαλυμάτων για την παραγωγή ενέργειας και ως εκ τούτου χρειάζεται μόνο αρκετή απόρριψη άλατος για να διατηρηθεί η ωσμωτική κινητήρια δύναμη^[50]. Με τροποποιήσεις η απόδοση της μεμβράνης CA βελτιώθηκε από 0.5W/m² σε 1.6W/m².^[50,83] Πρέπει να βελτιωθούν περαιτέρω οι μεμβράνες CA με μικρότερη μηχανική αντίσταση αλλά με μεγαλύτερη διαπερατότητα ροής^[67]. Η μεμβράνη οξικής κυτταρίνης παράγεται από την εταιρία Hydration Technology Innovations (HTI, Albany, OR).

4.5.8.2 Συνθετική μεμβράνη λεπτού υμένα (TFC-RO)

Η εμπορικά διαθέσιμη συνθετική μεμβράνη λεπτού υμένα (TFC, Thin-Film Composite) σχεδιασμένη για τη διαδικασία RO, έχει ογκώδες στρώμα στήριξης το οποίο δημιουργεί μεγάλη εσωτερική πόλωση συγκέντρωσης (ICP), μειώνοντας δραματικά τη ροή νερού^[50,83,84]. Οι μεμβράνες TFC-RO είχαν μέχρι πρόσφατα απόδοση 0.1W/m² ενώ μόλις πρόσφατα η απόδοση έφθασε στα 3.5W/m², ακόμη και με βέλτιστο ενεργό στρώμα ($A = 0.6 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$ και $B = 0.003 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Για την επίτευξη του στόχου των 5W/m² πρέπει η παράμετρος S να έχει τιμή χαμηλότερη από 1000μm και οι παράμετροι A,B να έχουν το βέλτιστο συνδυασμό (σχήμα 4.9)^[54]. Οι εμπορικά διαθέσιμες μεμβράνες είναι οι BW30, SW30-HR, SW30-XLE από την εταιρία Dow Chemical Company (Dow, Midland, MI).

4.5.9 Παρατηρήσεις - Τελευταίες εξελίξεις για τις ωσμωτικές μεμβράνες

Τις τελευταίες δεκαετίες, η βελτίωση των μεμβρανών διαμορφώθηκε για την κάλυψη των απαιτήσεων σε διεργασίες που σχετιζόταν με πίεση. Η περαιτέρω βελτίωση των διαθέσιμων μεμβρανών είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας PRO. Προς το παρόν, οι μεμβράνες απέχουν κατά πολύ από τον στόχο των 5W/m².^[123,124]

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, για την αύξηση της ροής νερού και κατά συνέπεια της πυκνότητας ενέργειας, οι μεμβράνες πρέπει να συνδυάζουν μεγάλη διαπερατότητα νερού, χαμηλή διαπερατότητα άλατος και υψηλό ποσοστό διάχυσης άλατος στο πορώδες υπόστρωμα. Η ικανότητα της PRO να λειτουργεί με χαμηλή υδραυλική πίεση επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό λεπτού στρώματος στήριξης το οποίο θα συνεπάγεται μεγαλύτερη ροή και θα μπορεί να ανταποκριθεί στις μηχανικές πιέσεις που θα εφαρμόζονται κατά τη λειτουργία. Επίσης, οι PRO μεμβράνες θα πρέπει να αντέχουν τη συνεχή πίεση από τη ροή νερού δια μέσω αυτών.

Σε μια μονάδα PRO, οι μεμβράνες θα στοιβάζονται σε ενότητες μεμβρανών (όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 5). Όπως περιγράφεται και στη βιβλιογραφία^[123], οι υπάρχουσες σπειροειδής ενότητες έχουν σοβαρούς περιορισμούς σε σχέση με το πρότυπο της εσωτερικής ροής και απωλειών πίεσης, καθιστώντας ακατάλληλες για μονάδα μεγάλης κλίμακας λόγω της μικρής χωρητικότητας μεμβράνης. Εφόσον μια μονάδα PRO θα απαιτεί αρκετά εκατομμύρια τετραγωνικά μέτρα μεμβράνης, οι μονάδες μεμβράνης θα πρέπει να περιέχουν αρκετές δεκάδες ή και χιλιάδες τετραγωνικά μέτρα. Για το λόγο αυτό έχουν τεθεί διάφορα κριτήρια σχεδιασμού νέων στοιχείων μεμβράνης. Τα στοιχεία θα πρέπει να έχουν την ικανότητα να μεταφέρουν τη ροή και στις δύο πλευρές της μεμβράνης, θα πρέπει να διαθέτουν μια πολύ μεγαλύτερη περιοχή μεμβράνης και θα πρέπει να είναι πολύ λιγότερο ευαίσθητες στις ακαθαρσίες των μεμβρανών σε σύγκριση με τις υπάρχουσες ενότητες μεμβράνης.

Αξίζει να σημειωθεί τέλος ότι, η πραγματική ενέργεια εξόδου σε μονάδα αναμένεται να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή που έχει μετρηθεί σε συνθήκες εργαστηρίου για μεμβράνες TFC^[54]. Η πιο πρόσφατη αναφορά για βελτίωση των ιδιοτήτων της μεμβράνης είναι από τη μελέτη του Chou^[121], ο οποίος τροποποίησε τη δομή μιας TFC κοίλων ινών μεμβράνη και η ροή νερού έφθασε σε πυκνότητα ενέργειας περίπου 5.7 W/m².

4.6 Εναλάκτης πίεσης

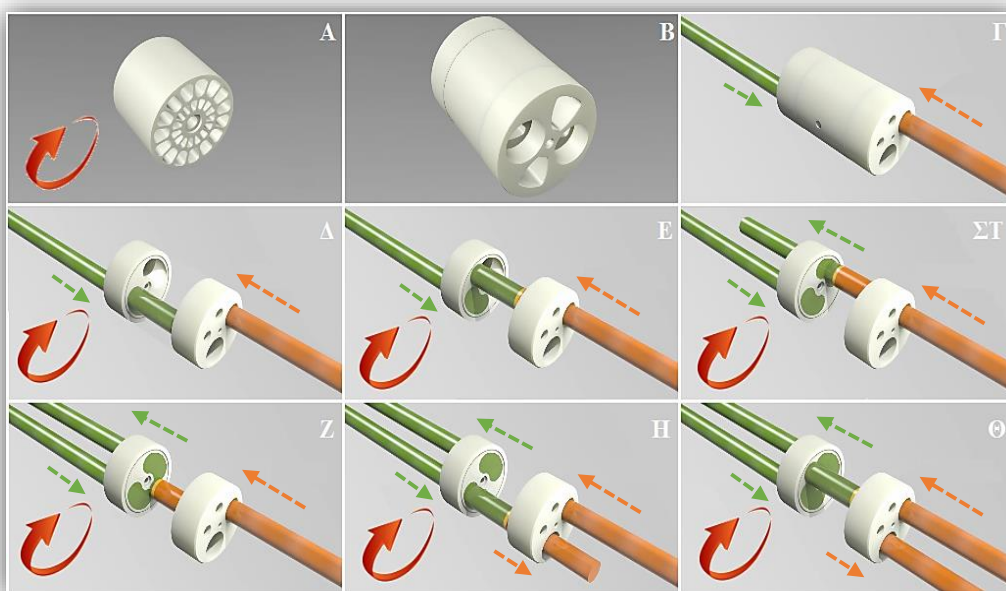
4.6.1 Γενικά

Η απόδοση μιας μονάδας PRO μπορεί να αυξηθεί σημαντικά με τη χρήση συσκευών ανάκτησης ενέργειας (εναλλάκτες πίεσης, pressure exchangers) οι οποίοι ανακτούν την πίεση του υφάλμυρου νερού με την πίεση του εισερχόμενου θαλασσινού νερού ^[39,41,82,-84,123,125-128]. Ο S. Loeb^[127] ήταν ο πρώτος που ανέδειξε τη σημασία χρήσης εναλλακτών πίεσης για την επίτευξη οικονομικά αποδοτικής μονάδας PRO, εξαιτίας της σημαντικής μείωσης της παρασιτικής κατανάλωσης ισχύος. Χωρίς την χρήση συσκευών ανάκτησης ενέργειας, η παραγόμενη ενέργεια οριακά θα υπερβαίνει το κόστος λόγω της μεγάλης κατανάλωσης ενέργειας της αντλίας συμπίεσης των εισερχόμενων διαλυμάτων (κυρίως το θαλασσινό νερό)^[41]. Σύμφωνα με τη μελέτη του Skilhagen και Aaberg ^[126], με την ύπαρξη βελτιωμένων μεμβρανών, βελτιστοποιημένες ροές και ελάχιστες απώλειες ενέργειας, η απόδοση του συστήματος φθάνει στο 70% για μια επίγεια μονάδα που χρησιμοποιεί εναλλάκτες πίεσης.

4.6.2 Αρχή λειτουργίας εναλλάκτη πίεσης

Ένας εναλλάκτης πίεσης μεταφέρει ενέργεια με τη μορφή πίεσης από ένα διάλυμα υψηλής πίεσης (υφάλμυρο νερό) προς ένα διάλυμα χαμηλότερης πίεσης (θαλασσινό νερό). Ο κύκλος λειτουργίας ενός εναλλάκτη πίεσης απεικονίζεται στο σχήμα 4.9. Ο εναλλάκτης πίεσης περιέχει ένα εσωτερικό ρότορα (εικόνα Α), το μόνο κινούμενο εξάρτημα σε όλη τη συσκευή. Τον περιστρεφόμενο ρότορα τον στελεχώνουν δυο κεραμικά εξαρτήματα (εικόνα Β) στα δύο άκρα του ρότορα παρέχοντας στεγανότητα. Τα δύο διαλύματα που αλληλοεπιδρούν με τον εναλλάκτη πίεσης είναι το υφάλμυρο νερό σε υψηλή πίεση και το εισερχόμενο στη μονάδα θαλασσινό νερό με χαμηλότερη πίεση.

Το υφάλμυρο νερό που έχει υψηλή πίεση και το θαλασσινό νερό με χαμηλή πίεση εισέρχονται στον εναλλάκτη πίεσης (Γ). Όταν ξεκινήσει η λειτουργία της μονάδας το χαμηλής πίεσης θαλασσινό νερό εισέρχεται στον εναλλάκτη πίεσης γεμίζοντας τον ρότορα (Δ) και τότε ξεκινάει να περιστρέφεται (Ε). Η ενέργεια από την υδραυλική πίεση τότε μεταφέρεται απευθείας από το υφάλμυρο νερό προς το θαλασσινό νερό μέσα στο ρότορα (ΣΤ). Το υψηλής πίεσης πλέον θαλασσινό νερό επιστρέφει πίσω στη μονάδα μέσω μιας υψηλής πίεσης αντλίας (αντλία κυκλοφορίας). Το υφάλμυρο νερό με χαμηλή πλέον πίεση εξέρχεται από τον εναλλάκτη πίεσης (Η) και εκβάλλεται από τη μονάδα πίσω στη θάλασσα μέσω της βαρύτητας. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται καθ' όλο το χρόνο λειτουργίας της μονάδας. Ο ρότορας λειτουργεί σαν ένα να λειτουργήσει σαν ένα φυσίγγιο φόρτισης και εκφόρτισης καθώς η μεταφορά πίεσης επαναλαμβάνεται. Ο ρότορας χρησιμοποιώντας μόνο την ροή του νερού μπορεί να περιστραφεί έως 1200 φορές το λεπτό.



Σχήμα 4.9: Τα εξαρτήματα και ο κύκλος λειτουργίας ενός εναλλάκτη πίεσης. Με πράσινο απεικονίζεται το θαλασσινό νερό, ενώ με πορτοκαλί το υφάλμυρο νερό.

4.6.3 Απόδοση εναλλάκτη πίεσης

Η απόδοση του εναλλάκτη πίεσης υπολογίζεται από την αποδοτικότητα της μεταφοράς ενέργειας και από το βαθμό ανάμιξης των δύο διαλυμάτων μέσα στο ρότορα. Η ενέργεια των ροών είναι το γινόμενο του ρυθμού των ροών και πιέσεων. Η απόδοση είναι το κλάσμα της διαφοράς πίεσης και των ογκομετρικών απωλειών (διαρροή) δια μέσω της συσκευής και υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\eta = \frac{\sum \text{ενέργεια εξόδου}}{\sum \text{ενέργεια εισόδου}} = \frac{(Q_G - L) \cdot (P_G - HDP) + (Q_B + L) \cdot (P_B - LDP)}{(Q_G \cdot P_G) + (Q_B \cdot P_B)} \quad (4.21)$$

Όπου Q είναι η ροή, P η πίεση, L η ροή διαρροής, HDP είναι η υψηλή διαφορική πίεση, LDP είναι η χαμηλή διαφορική πίεση, ο δείκτης B αναφέρεται στη τροφοδοσία θαλασσινού νερού στη συσκευή και ο δείκτης G αναφέρεται στη τροφοδοσία υφάλμυρου νερού στη συσκευή. Η ανάμιξη είναι η εξίσωση των συγκεντρώσεων του εισερχόμενου θαλασσινού και υφάλμυρου νερού και το κλάσμα των ρυθμών ροής που οδηγούνται στη συσκευή.

Ο εναλλάκτης πίεσης μεταφέρει την αυξημένη πίεση, 2/3, που εξέρχεται από τον θάλαμο της μεμβράνης. Μεταφέρει την πίεση από την υψηλή πίεση που έχει προκύψει από την ανάμιξη του γλυκού νερού με το θαλασσινό νερό προς την χαμηλότερη πίεση που βρίσκεται στην είσοδο του θαλασσινού νερού στην μονάδα με απόδοση 98 %.

4.7 Αντλία, υδροστρόβιλος, γεννήτρια και σωληνώσεις

4.7.1 Αντλία

4.7.1.1 Γενικά

Η αντλία είναι μια μηχανική διάταξη με την οποία προσδίδεται ενέργεια σε ένα υγρό προκειμένου να επιτευχθεί η διακίνηση του από μια στάθμη σε μια υψηλότερη στάθμη ή/και από μια πίεση σε μια υψηλότερη πίεση^[85].

4.7.1.2 Ισχύς αντλίας

Η ενέργεια (σε Watt) που προσδίδει η αντλία στο υγρό υπολογίζεται από την εξίσωση Bernoulli:

$$P_A = \frac{\Delta P \cdot Q}{n_A} \quad (4.22)$$

Όπου ΔP (σε bar) η αλλαγή στην ολική πίεση μεταξύ του εισερχόμενου εξερχόμενου από την αντλία υγρού, Q (σε m³/s) ο ρυθμός ροής του υγρού και n_A ο βαθμός απόδοσης της αντλίας και παρέχεται από την κατασκευαστική εταιρία.

4.7.1.3 Ταξινόμηση αντλιών

Η ταξινόμηση των αντλιών γίνεται με βάση την αρχή λειτουργίας τους, δηλαδή το μηχανισμό με τον οποίο προσδίδεται η ενέργεια στο υγρό. Οι δύο μεγάλες κατηγορίες που κατατάσσονται οι αντλίες είναι:

- Φυγοκεντρικές (ή κινητικού τύπου), και
- Θετικής μετατόπισης (ή στατικού τύπου).

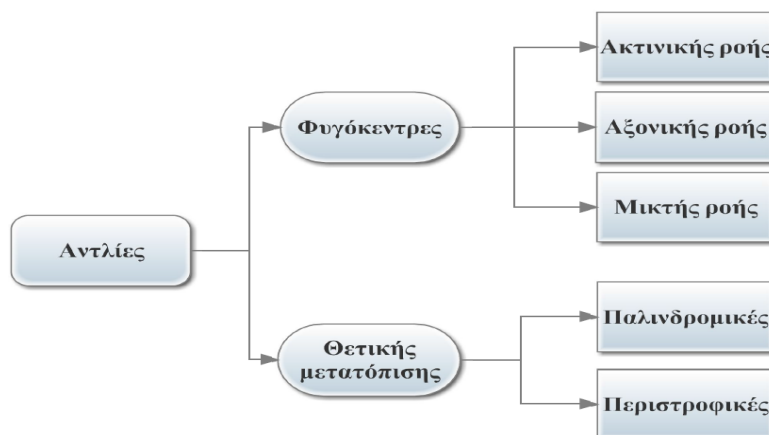
Στις **φυγοκεντρικές αντλίες** προσδίδεται στο υγρό κινητική ενέργεια με φυγοκεντρικές δυνάμεις. Οι κύριες κατηγορίες των φυγοκεντρικών αντλιών είναι:

- Ακτινικής ροής
- Αξονικής ροής
- Μικτής ροής

Στις **αντλίες θετικής μετατόπισης** το υγρό εκτοπίζεται από ένα χώρο και προωθείται σε ένα άλλο είτε με μηχανικό μέσο (ένα έμβολο, ένα παλλόμενο διάφραγμα ή ένα περιστρεφόμενο μηχανισμό) είτε με ένα άλλο ρευστό (πχ αέρας). Οι κύριες κατηγορίες των αντλιών θετικής μετατόπισης είναι:

- Παλινδρομικές
- Περιστροφικές

Η ανωτέρω βασική κατάταξη δίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Διάγραμμα 4.2: Κατάταξη αντλιών με βάση την αρχή λειτουργίας.

Στη συνέχεια αναλύεται η αρχή λειτουργίας του κάθε είδους αντλίας.

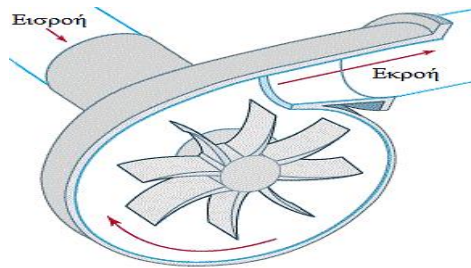
4.7.1.4 Φυγόκεντρες αντλίες

Η φυγόκεντρη αντλία^[85,129-131,137] χρησιμοποιείται για τη μεταφορά υγρών με την μετατροπή από την περιστροφική κινητική ενέργεια προς την υδροδυναμική ενέργεια της ροής του ρευστού. Η περιστροφική ενέργεια προέρχεται από έναν

κινητήρα. Το υγρό εισέρχεται στην περωτή της αντλίας κατά μήκος ή κοντά στον περιστρεφόμενο άξονα και επιταχύνεται από τη περωτή, που ρέει ακτινικά προς τα έξω σε έναν διασκορπιστή από όπου εξέρχεται.

4.7.1.4.1 Αρχή λειτουργίας

Όπως οι περισσότερες αντλίες, η φυγόκεντρη αντλία μετατρέπει μηχανική ενέργεια από έναν κινητήρα σε ενέργεια ενός κινούμενου ρευστού. Ένα τμήμα της ενέργειας μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια κίνησης του ρευστού, και ορισμένη σε δυναμική ενέργεια, που αντιπροσωπεύεται από την πίεση ρευστού (υδραυλική κεφαλή) ή με την ανύψωση του ρευστού, ενάντια στη βαρύτητα, σε μεγαλύτερο υψόμετρο.



Σχήμα 4.10 Αρχή λειτουργίας φυγόκεντρης αντλίας. Ανάκτηση από^[130].

Το υγρό κατευθύνεται απευθείας στο κέντρο της περωτής και εξαναγκάζεται σε κυκλική κίνηση από την κίνηση των πτερυγίων της περωτής. Ως αποτέλεσμα αυτής της περιστροφής, τα πτερύγια της περωτής μεταφέρουν μηχανική ενέργεια στο υγρό. Στη συνέχεια το υγρό εκτοξεύεται έξω από τη περωτή μέσω της φυγόκεντρης δύναμης και εξέρχεται από αυτή με αυξημένη πίεση και ταχύτητα. Ένα μέρος της ταχύτητας του υγρού μετατρέπεται σε πίεση από το περίβλημα της αντλίας πριν αποβληθεί από την αντλία.

4.7.1.4.2 Πλεονεκτήματα

- Καλή απόδοση, μικρός όγκος και βάρος.
- Συνεχή και ομοιόμορφη κίνηση.
- Η πίεση και η παροχή δεν παρουσιάζουν διακυμάνσεις.
- Χαμηλό κόστος αγοράς και λειτουργίας

A) Φυγόκεντρη αντλία ακτινικής ροής

Όταν γίνεται αναφορά σε φυγόκεντρη αντλία συνήθως εννοείται η αντλία ακτινικής ροής. Το υγρό σε αυτή τη περίπτωση εξέρχεται από την αντλία ακτινικά, δηλαδή κάθετα προς τον άξονα της αντλίας. Το ρευστό με τη φυγοκεντρική δύναμη που του ασκείται εκτινάσσεται από το κέντρο προς την περιφέρεια και καταλήγει στο σωλήνα κατάθλιψης. Αυτή η μεταφορά του νερού μειώνει την πίεση στο κέντρο, εκεί όπου η νέα ποσότητα υγρού θα εισέλθει. Η περωτή περιστρέφεται από τον κινητήρα. Επιλέγεται για εφαρμογές μεσαίας παροχής έως 0.16 m³/s και ολικό ύψος απωλειών έως 120m.

B) Φυγόκεντρη αντλία αξονικής ροής

Η πτερωτή σε αυτή τη περίπτωση αποτελείται από μια κεντρική πλήμνη με μια σειρά από πτερύγια σε αυτό. Η πτερωτή περιστρέφεται μέσα σε ένα κυλινδρικό περίβλημα με διάκενο μεταξύ των πτερυγίων και τα τοιχώματα του περιβλήματος. Τα πτερύγια είναι υπό γωνία ως προς το επίπεδο που περνάει τον κεντρικό άξονα, έτσι ώστε ένα εξασκούν ώθηση στο υγρό που κινείται αξονικά, δηλαδή κατά μήκος του άξονα της αντλίας. Κατάλληλη σε μεγάλες παροχές.

Γ) Φυγόκεντρη αντλία μικτής ροής

Η μορφή αυτών των αντλιών είναι μια ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ των αντλιών ακτινικής και αξονικής ροής. Λειτουργούν σε υψηλότερες πιέσεις από τις αντλίες αξονικής ροής, παρέχοντας παράλληλα υψηλότερες απορρίψεις από τις αντλίες ακτινικής ροής. Κατάλληλες για μέσες παροχές.

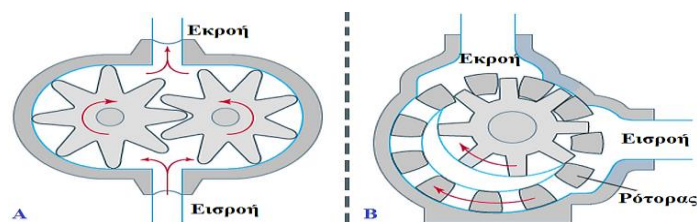
Δ) Πολυβάθμιες φυγόκεντρες αντλίες

Όταν η επιθυμητή πίεση στην έξοδο της αντλίας είναι αρκετά μεγάλη, γίνεται εφαρμογή των πολυβάθμιων αντλιών, με περισσότερες από μια πτερωτές και η είσοδος του ρευστού στην εκάστοτε πτερωτή είναι η έξοδος του ρευστού από την προηγούμενη πτερωτή.

4.7.1.5 Αντλία θετικής μετατόπισης

4.7.1.5.1 Αρχή λειτουργίας

Στις αντλίες θετικής μετατόπισης^[85,132] το υγρό αναγκάζεται σε κίνηση από τον σωλήνα αναρρόφησης προς το σωλήνα κατάθλιψης με κάποια μηχανική δράση (έμβολο). Το υγρό εξαναγκάζεται να μετατοπιστεί ανεξάρτητα από την υδραυλική αντίσταση των σωλήνων μεταφοράς. Από αυτή την αντίσταση ροής δημιουργείται η πίεση. Οι κατηγορίες είναι Α)περιστροφική αντλία και Β)παλινδρομική αντλία.



Σχήμα 4.11: Αρχή λειτουργίας Α) περιστροφικής αντλίας, Β)παλινδρομικής αντλίας. Ανάκτηση από ^[132].

A) Περιστροφική αντλία θετικής μετατόπισης

Η κίνηση σε αυτή τη περίπτωση δίνεται στο ένα γρανάζι ενώ το άλλο παρασύρεται από το πρώτο. Το υγρό εγκλωβίζεται ανάμεσα στο περίβλημα και τα κενά των δοντιών και μετατοπίζεται προς την κατάθλιψη. Το διάκενο μεταξύ των γραναζιών

και του περιβλήματος είναι πολύ μικρό. Επιλέγεται για μικρές παροχές και μέσες πιέσεις και παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία τύπων.

B) Παλινδρομική αντλία θετικής μετατόπισης

Καθώς το έμβολο κινείται σε αυτή τη περίπτωση προς τα δεξιά μέσα στον κύλινδρο, κλείνει η βαλβίδα κατάθλιψης και ο θάλαμος γεμίζει με υγρά μέσα από την ανοιχτή βαλβίδα αναρρόφησης. Όταν το έμβολο κινείται προς τα αριστερά κλείνει η βαλβίδα αναρρόφησης και ανοίγει η βαλβίδα κατάθλιψης και το υγρό εκτοπίζεται προς το στόμιο εξόδου. Το έμβολο κινείται παλινδρομικά. Η ταχύτητα περιορίζεται από την αδράνεια παρουσιάζοντας διακυμάνσεις το οποίο αποτελεί και το κύριο μειονέκτημα.

4.7.1.6 Κριτήρια επιλογής αντλίας

Τα κριτήρια επιλογής τύπου αντλίας γίνεται είναι ο τύπος του υγρού, η θερμοκρασία, η πίεση, η παροχή, η θέση λειτουργίας, και τη διαθέσιμη ενέργεια. Γενικά ισχύει:

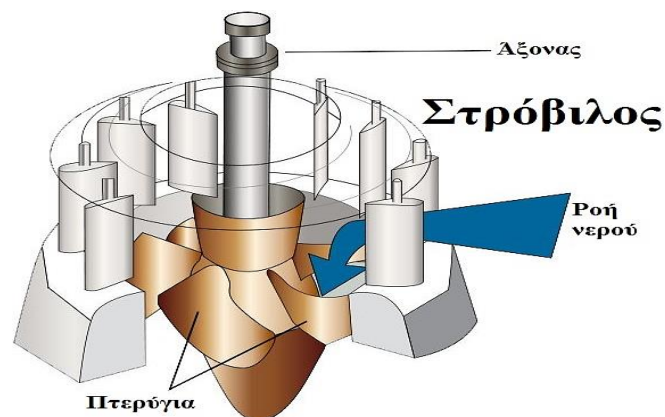
- Μεγάλο ιξώδες: αντλίες θετικής μετατόπισης.
- Μίγματα στερεών με υγρά: φυγόκεντρες αντλίες.
- Αφρώδη και ευπαθή υγρά: αντλίες θετικής μετατόπισης επειδή οι υψηλές ταχύτητες και οι στροβιλισμοί των φυγόκεντρων αντλιών τα καταστρέφουν.
- Αντλίες πόσιμου, ζεστού νερού, θάλασσας, τροφοδοτικού νερού λεβήτων είναι συνήθως φυγόκεντρες αντλίες με ανάλογη επιλογή υλικών για κάθε περίπτωση.

4.7.2 Υδροστρόβιλος

Ο υδροστρόβιλος (ή τουρμπίνα νερού) είναι ένας περιστροφικός κινητήρας που αντλεί ενέργεια από την πίεση του διερχόμενου νερού.

4.7.2.1 Αρχή λειτουργίας

Το διερχόμενο νερό κατευθύνεται στα πτερύγια του δρομέα του στρόβιλου δημιουργώντας μια δύναμη επί των λεπίδων. Δεδομένου ότι ο δρομέας περιστρέφεται, η δύναμη δρα από μια απόσταση. Με αυτόν τον τρόπο, η ενέργεια μεταφέρεται από την πίεση του νερού προς το στρόβιλο.



Σχήμα 4.12: Αρχή λειτουργίας στρόβιλου. Ανάκτηση από ^[133].

4.7.2.2 Ταξινόμηση υδροστροβίλων

Οι υδροστροβίλοι χωρίζονται ανάλογα με τη διαδικασία που χρησιμοποιείται σε δυο κατηγορίες^[85,134]:

- Α) δράσης (action, impulse)
- Β) αντίδρασης (reaction)

A) Υδροστροβίλος δράσης

Ο υδροστροβίλος δράσης αλλάζει την ταχύτητα σε ένα πίδακα νερού. Ο πίδακας σπρώχνει τα καμπύλα πτερύγια του υδροστροβίλου αλλάζοντας την κατεύθυνση ροής. Η προκύπτουσα μεταβολή στην ορμή προκαλεί μια δύναμη επί των πτερυγίων του υδροστροβίλου. Δεδομένου ότι ο υδροστροβίλος περιστρέφεται, η δύναμη ενεργεί εξ αποστάσεως (έργο) και η ροή που έχει εκτραπεί είναι με μειωμένη ενέργεια. Στον υδροστροβίλο δράσης η πίεση του υγρού ρέει πάνω στα πτερύγια του ρότορα είναι συνεχής και όλη το παραγόμενο έργο εξόδου οφείλεται στη μεταβολή της κινητικής ενέργειας του ρευστού.

Πριν από το χτύπημα των πτερυγίων του υδροστροβίλου, η πίεση του νερού (δυνητική ενέργεια) μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια από ένα ακροφύσιο. Καμία μεταβολή της πίεσης δεν εμφανίζεται στα πτερύγια, έτσι ο στροβίλος δεν απαιτεί περίβλημα για ασφαλή λειτουργία. Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα περιγράφει τη μεταφορά ενέργειας για τον υδροστροβίλο δράσης.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι εξής υδροστροβίλοι^[85,134]:

- Waterwheel
- Pelton
- Turgo
- Crossflow (Ossberger turbine)
- Jonval turbine
- Reverse overshot water-wheel
- Archimedes' screw turbine
- Barkh Turbine

B) Υδροστροβίλος αντίδρασης

Οι υδροστροβίλοι αντίδρασης ενεργούν με το νερό, το οποίο αλλάζει την πίεση καθώς κινείται μέσω του υδροστροβίλου και δίνει την ενέργεια του. Θα πρέπει να είναι στεγανοποιημένα τα ανοίγματα μεταξύ δρομέα και υδροστροβίλου καθώς η διαρροή νερού συνεπάγεται με μεγάλες απώλειες ισχύος.. Ο τρίτος νόμος του Νεύτωνα περιγράφει τη μεταφορά της ενέργειας για υδροστροβίλου αντίδρασης.

Οι περισσότεροι υδροστρόβιλοι που χρησιμοποιούνται είναι οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης. Στον υδροστρόβιλο αντίδρασης λαμβάνει χώρα η πτώση πίεσης τόσο στα σταθερά όσο και στα κινούμενα πτερύγια. Η χρήση του είναι συνήθως σε μεγάλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της κατηγορίας υδροστρόβιλων είναι ότι έχουν μεγάλο βαθμό απόδοσης και πιάνουν μεγάλες ταχύτητες περιστροφής. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι εξής υδροστρόβιλοι^[85,134]:

- VLH
- Francis
- Kaplan, Propeller, Bulb, Tube, Straflo
- Tyson
- Gorlov
- Βολβοειδής
- Υδροστρόβιλος αξονικής ροής

4.7.2.3 Ισχύς υδροστρόβιλου

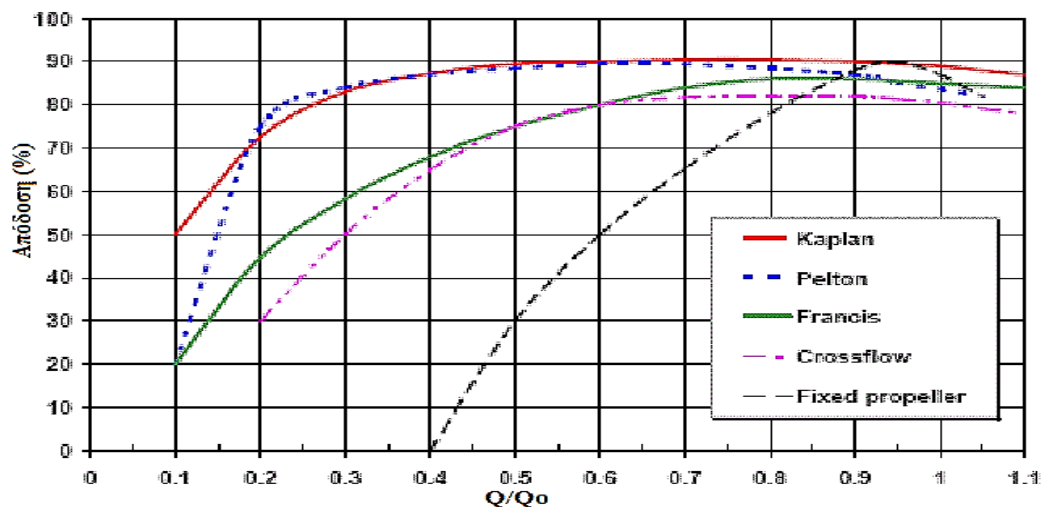
Η ισχύς (P , σε Watt ή J/s) που μπορεί να ανακτηθεί από μια ροή νερού είναι:

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot Q \quad (4.23)$$

Όπου: η : απόδοση του υδροστρόβιλου, συνήθως μεγαλύτερη από 90%, ρ : πυκνότητα του νερού (kg/m^3), g : επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s^2), h : κεφαλή (m), ισούται με το άθροισμα της πίεσης κεφαλής και κεφαλής ταχύτητας, Q : ροή νερού (m^3/s)

4.7.2.4 Βαθμός απόδοσης υδροστρόβιλου

Ως βαθμός απόδοσης υδροστρόβιλου ορίζεται το πηλίκο της μηχανικής ισχύος στον άξονα του υδροστρόβιλου ως προς την προδιδόμενη ισχύ από το νερό. Η τελευταία υπολογίζεται από την παροχή και το ύψος πτώσης του νερού. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα γράφημα με τους βαθμούς απόδοσης διάφορων υδροστροβίλων.

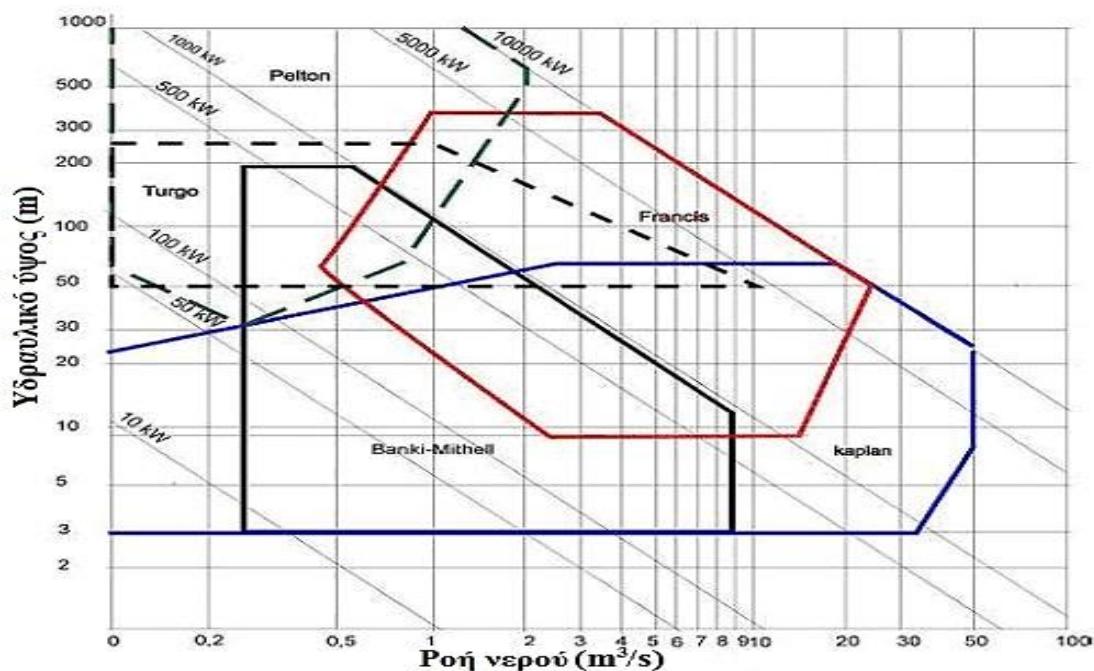


Διάγραμμα 4.3: Βαθμός απόδοσης διάφορων τύπων υδροστροβίλων. Πηγή ^[135].

Οι υδροστρόβιλοι Cross-flow ή Banki έχουν βαθμό απόδοσης περίπου 80% και ο οποίος παραμένει σταθερός για κάτι παραπάνω από το μισό της περιοχής λειτουργίας. Ο υδροστρόβιλος Francis έχει αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης της τάξης του 95% αλλά παρουσιάζει απότομες μεταβολές. Όσον αφορά τον υδροστρόβιλο Kaplan παρουσιάζει έναν ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης μέχρι και 90%, ο οποίος μπορεί να μεταβληθεί εάν ρυθμίσουμε τα πτερύγια του συγκεκριμένου υδροστρόβιλου. Τέλος, οι υδροστρόβιλοι Pelton παρουσιάζουν έναν αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης της τάξης του 90% και για φορτία άνω του 25% του ονομαστικού τους^[134,135].

4.7.2.5 Επιλογή υδροστρόβιλου

Η επιλογή του κατάλληλου υδροστρόβιλου βασίζεται κυρίως στο διαθέσιμο υδραυλικό ύψος και λιγότερο στη διαθέσιμη ροή νερού. Γενικά, οι υδροστρόβιλοι δράσης χρησιμοποιοούνται για υψηλής κεφαλής απαιτήσεις ενώ οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης για χαμηλής κεφαλής απαιτήσεις. Το διάγραμμα ανά είδος εφαρμογής των συνηθέστερων ειδών υδροστρόβιλων παρουσιάζονται στη συνέχεια.



Διάγραμμα 4.4: Εφαρμογή υδροστρόβιλου ανά είδος. Ανάκτηση από^[136].

Η περιοχή της μπλε γραμμής αναπαριστά τη περιοχή λειτουργίας ενός υδροστρόβιλου Kaplan ή ενός βολβοειδούς, η περιοχή της κόκκινης γραμμής ενός υδροστρόβιλου Francis, εντός της πράσινης διακεκομμένης γραμμής ενός υδροστρόβιλου Pelton, εντός της μαύρης διακεκομμένης γραμμής ενός υδροστρόβιλου Turgo και η περιοχή εντός της μαύρης γραμμής την περιοχή λειτουργίας ενός υδροστρόβιλου Cross-Flow (Banki-Mithell). Εάν οι συνθήκες ροής και υδραυλικού ύψους οδηγούν σε κάποιο σημείο, στο παραπάνω διάγραμμα, που βρίσκεται σε περιοχή λειτουργίας που ανήκει σε περισσότερους από έναν υδροστρόβιλους, τότε η διαδικασία επιλογής του τύπου υδροστρόβιλου βασίζεται κυρίως στη σύγκριση του κόστους των

υδροστρόβιλων. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του είδους υδροστρόβιλου είναι^[134,136]:

- Οι υδροστρόβιλοι Cross-Flow ή ενός τύπου Turgo προτιμάται σε σχέση με έναν υδροστρόβιλο Pelton όταν απαιτείται μεγάλη ταχύτητα και διαχείριση μεγάλων παροχών.
- Οι Kaplan είναι κατάλληλοι για ευρύ φάσμα της ροής, καθώς μέγιστη απόδοσή τους μπορεί να επιτευχθεί σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών ροής.
- Ο Pelton είναι φθηνότερος σε αντίθεση με τον Kaplan ο οποίος λειτουργεί σε μικρότερες τιμές παροχής νερού έχει το μειονέκτημα του μεγάλου κόστους.

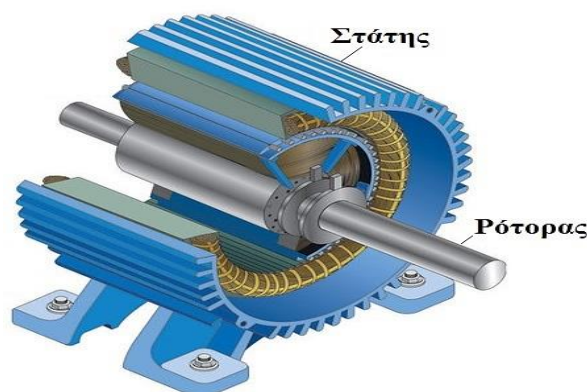
4.7.3 Γεννήτρια

Οι ηλεκτρικές μηχανές διακρίνονται σε κινητήρες και γεννήτριες ανάλογα το είδος ενέργειας που δέχονται και αποδίδουν. Κινητήρας είναι η μηχανή που μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Γεννήτρια (generator)^[138,139] είναι η μηχανή που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια που δέχεται (πχ από υδροστρόβιλο) σε ηλεκτρική ενέργεια.

4.7.3.1 Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας της γεννήτριας βασίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Ένα πηνίο μέσα στην γεννήτρια περιστρέφεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, με αποτέλεσμα στις άκρες του πηνίου να παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα.

Η γεννήτρια αποτελείται από δύο μέρη: το σταθερό μέρος που λέγεται στάτης (ή επαγωγέας) στο οποίο τοποθετούνται μαγνήτες (μόνιμοι μαγνήτες ή ηλεκτρομαγνήτες) και το κινητό μέρος που λέγεται ρότορας (ή δρομέας) στο οποίο υπάρχουν τα πηνία. Με περιστροφή του ρότορα μέσα στο στάτη παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Η περιστροφή του άξονα του ρότορα γίνεται με διάφορες μεθόδους, στην περίπτωση της πτυχιακής εργασίας γίνεται με υδροστρόβιλο.



Σχήμα 4.13: Απεικόνιση τομής γεννήτριας. Ανάκτηση από ^[140].

4.7.3.2 Τύποι γεννητριών

Η κατηγοριοποίηση γίνεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του υφιστάμενου δικτύου και χωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

- Α) Σύγχρονη γεννήτρια
- Β) Ασύγχρονη γεννήτρια

A) Σύγχρονη γεννήτρια

Η σύγχρονη γεννήτρια (ή εναλλακτήρας) παράγει τριφασική εναλλασσόμενη τάση με συχνότητα εναλλαγής, ανάλογη των ζευγών μαγνητικών πόλων και της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα. Για να λειτουργήσει προϋποθέτει τη τροφοδότηση του τυλίγματος του δρομέα με συνεχές ρεύμα. Το ρεύμα αυτό δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της γεννήτριας και καθώς ο δρομέας περιστρέφεται παίρνοντας κίνηση (πχ από υδροστρόβιλο), το πεδίο περιστρέφεται μαζί του. Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει τριφασική τάση στα τυλίγματα του στάτη, η οποία εμφανίζεται στην έξοδο της μηχανής. Κύριο χαρακτηριστικό της σύγχρονης γεννήτριας είναι ότι μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα από το δίκτυο και να παράγει ισχύ, δεδομένου ότι η ισχύς διέγερσης δεν εξαρτάται από το δίκτυο.

B) Ασύγχρονη γεννήτρια

Η ασύγχρονη γεννήτρια (ή επαγωγική γεννήτρια) έχει τον ίδιο στάτη όπως η σύγχρονη αλλά διαφέρει στη δομή του δρομέα. Η τάση στο δρομέα (που παράγει το ρεύμα διέγερσης και το πεδίο του δρομέα) ουσιαστικά επάγεται στα τυλίγματα αντί να προσφέρεται σ' αυτό με κάποια ηλεκτρική σύνδεση. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό μιας ασύγχρονης γεννήτριας είναι ότι δεν μπορούν να παράγουν άεργο ισχύ. Αντίθετα καταναλώνουν άεργο ισχύ, για αυτό για την λειτουργία τους απαιτείται μια μόνιμα συνδεδεμένη εξωτερική πηγή άεργης ισχύος. Αυτή η εξωτερική πηγή είναι εκείνη που θα ρυθμίσει και την τάση στην έξοδο της γεννήτριας καθώς λόγω έλλειψης ρεύματος διέγερσης αυτό είναι αδύνατο να το καταφέρει από μόνη της η γεννήτρια. Επίσης, η τάση στα άκρα της έχει άμεση εξάρτηση από το φορτίο και όταν αυτό έχει ισχυρό επαγωγικό χαρακτήρα μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την πτώση της τάσης της γεννήτριας. Το πλεονέκτημα της έγκειται στο γεγονός ότι δεν απαιτείται ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης και ότι η συχνότητα είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας περιστροφής.

4.7.3.3 Επιλογή τύπου γεννήτριας

Για την ορθή επιλογή γεννήτριας πρέπει να ληφθούν υπόψιν τα παρακάτω:

Το βασικό χαρακτηριστικό μια ασύγχρονης γεννήτριας είναι ότι λειτουργεί ως γεννήτρια μόνο όταν είναι συνδεδεμένος με ένα εξωτερικό σύστημα ηλεκτρικής ισχύος, σε αντίθεση με την σύγχρονη γεννήτρια η οποία λειτουργεί με ή χωρίς σύνδεση σε εξωτερικό κύκλωμα. Όταν λοιπόν η εγκατάσταση ωσμωτικής μονάδας επιλεγθεί να έχει ανεξαρτησία από το ηλεκτρικό δίκτυο (Δ.Ε.Η.) ή όταν υπάρχει έλλειψη τότε επιλέγεται σύγχρονη γεννήτρια.

Όσον αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά η σύγχρονη γεννήτρια επιτυγχάνει καλύτερο βαθμό απόδοσης και έχει μεγαλύτερη εκκίνηση συγκριτικά με την ασύγχρονη γεννήτρια. Στα πλεονεκτήματα επιλογής ασύγχρονης γεννήτριας είναι οι χαμηλές τιμές στις οποίες κυμαίνεται η ταχύτητα λειτουργίας, είναι ευρέως διαθέσιμες στο εμπόριο και έχουν σαφώς χαμηλότερο κόστος από τις σύγχρονες γεννήτριες. Επίσης, η ασύγχρονη γεννήτρια έχει απλή και στιβαρή κατασκευή, καθιστώντας τον ιδιαίτερα ανθεκτικό ακόμα και σε λειτουργίες υψηλών συχνοτήτων.

4.7.4 Σωληνώσεις μεταφοράς νερού

4.7.4.1 Γενικά

Ο αγωγός μεταφοράς του νερού είναι ο σωλήνας ο οποίος μεταφέρει το νερό από την περιοχή της υδροληψίας στην ωσμωτική μονάδα. Οι αγωγοί αυτοί ξεκινούν κατευθείαν από την πηγή του νερού. Τοποθετείται συνήθως βαλβίδα για έλεγχο της παροχής του νερού. Η επιλογή των αγωγών εξαρτάται από την τοποθέτηση του (στην επιφάνεια του εδάφους ή αν τοποθετηθεί υπόγεια ανάλογα με τη μορφολογία του εδάφους), από το υλικό του αγωγού που θα χρησιμοποιηθεί, τις θερμοκρασίες περιβάλλοντος και τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Ένας αγωγός χαρακτηρίζεται από^[85]:

- Το υλικό του, το οποίο επιλέγεται με βάση τις εδαφολογικές συνθήκες, την πρόσβαση στην περιοχή, το βάρος, το σύστημα σύνδεσης των σωληνώσεων και το κόστος.
- Τη διάμετρο του, η οποία επιλέγεται τέτοια ώστε οι υδραυλικές απώλειες να βρίσκονται εντός αποδεκτών ορίων.
- Το πάχος του τοιχώματος, το οποίο επιλέγεται έτσι ώστε ο εκάστοτε αγωγός να αντέχει στην ασκούμενη εσωτερική υδραυλική πίεση.

4.7.4.2 Ροή νερού σε σωλήνα

Η ροή νερού μέσα σε σωλήνα δέχεται πίεση σε όλο το μήκος του τμήματος της σωληνώσεως. Η πτώση πίεσης (ΔP σε bar) σε σωλήνα είναι^[88]:

$$\Delta P = \frac{f \cdot L \cdot Q \cdot v}{2 \cdot d \cdot g} \quad (4.24)$$

Όπου f ο συντελεστής τριβής, L (σε m) το μήκος του σωλήνα, Q (σε m^3/s) η παροχή νερού, v (σε m/s) η μέση ταχύτητα, d (σε m) η διατομή του σωλήνα και g (σε m^2/s) η επιτάχυνση της βαρύτητας.

4.7.4.3 Χαρακτηριστικά σωληνώσεων

Η εσωτερική διάμετρος του αγωγού καθορίζει τη διαθέσιμη ισχύ. Επίσης, παρόλο που η εσωτερική επιφάνεια φαίνεται λεία στην πραγματικότητα εμφανίζει κάποια τραχύτητα η οποία επιβραδύνει τη ροή του νερού. Τέλος, όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση του αγωγού τόσο μεγαλύτερο πρέπει να είναι και το πάχος των τοιχωμάτων του

αγωγού ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος σπασίματος του αγωγού από την μεγάλη πίεση του νερού. Τα υλικά που συνήθως επιλέγονται είναι χάλυβας, πολυαιθυλένιο ή σκυρόδεμα.

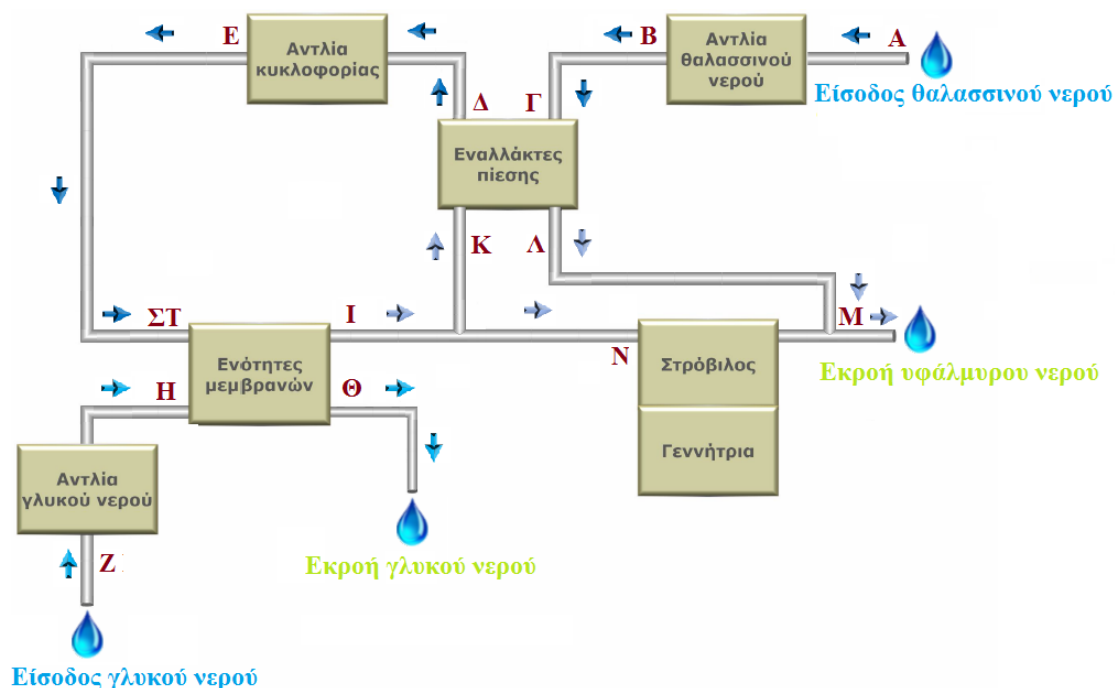
4.8 Σχεδιασμός

Έχουν προταθεί 2 τρόποι κατασκευής της ωσμωτικής μονάδας PRO:

- 1) Η πρώτη περίπτωση περιλαμβάνει την μονάδα να είναι τοποθετημένη στην επιφάνεια της Γης. Το γλυκό νερό αντλείται από ένα κοντινό ποτάμι. Το θαλασσινό νερό τροφοδοτείται στην μονάδα υπογείως από αντλία. Το υφάλμυρο νερό αφήνεται στο φυσική ζώνη υφάλμυρου νερού των εκβολών διατηρώντας έτσι τη ροή του νερού στο ποτάμι. Απαραίτητος ο εναλλάκτης πίεσης^[40,83]. Αυτός ο τρόπος θα επιλεγεί στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας.
- 2) Ένας άλλος τρόπος κατασκευής που εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα για αύξηση πίεσης του θαλασσινού νερού έναντι της χρήσης εναλλάκτη πίεσης είναι η μονάδα να είναι τοποθετημένη 100 – 130m κάτω από τη Γη^[125], κάτι που αυξάνει πολύ την απόδοση του συστήματος (έως 80%^[126]). Το μειονέκτημα έγκειται στο γεγονός του υψηλού κόστους^[83,121,123-125].

4.9 Μοντελοποίηση

Στο σχήμα 4.14 παρουσιάζεται η σχηματική διάταξη του κύκλου λειτουργίας της μονάδας PRO σε πραγματικές συνθήκες με τη ροή να είναι συνεχής και σταθερή. Λαμβάνονται υπόψιν οι απώλειες των περιστρεφόμενων εξαρτημάτων και το γεγονός ότι οι μεμβράνες δεν θα είναι απόλυτα ημι-διαπερατές.



Σχήμα 4.14: Διάγραμμα ροής ωσμωτικής μονάδας PRO σε πραγματικές συνθήκες.

Το θαλασσινό νερό (Α) περνά πρώτα μέσα από την αντλία (Β) στην οποία η υδραυλική πίεση αυξάνεται σε P_D με ρυθμό παροχής V . Η ισχύς της αντλίας του θαλασσινού νερού είναι:

$$P_{A,\theta} = \frac{P_D \cdot V}{n_{A,\theta}} \quad (4.25)$$

Όπου $n_{A,\theta}$ ο βαθμός απόδοσης της αντλίας. Το θαλασσινό νερό στη συνέχεια οδηγείται στους εναλλάκτες πίεσης (Γ) και όταν εξέρχεται (Δ) έχει αυξηθεί πίεση σε $(P_D + P_E)$ με σταθερό ρυθμό παροχής. Η αντλία κυκλοφορίας (Ε) δεν αυξάνει περαιτέρω την πίεση αλλά κυκλοφορεί το θαλασσινό νερό μέχρι τις ενότητες μεμβρανών (ΣΤ). Η ισχύς της αντλίας κυκλοφορίας συμβολίζεται ως $(P_{A,K})$.

Την ίδια χρονική στιγμή, το γλυκό νερό (Ζ) αντλείται από το ποτάμι με πίεση P_w και ρυθμό παροχής $(\Delta V + F)$ και οδηγείται επίσης στις ενότητες μεμβρανών (Η). Η ισχύς της αντλίας του γλυκού νερού είναι:

$$P_{A,\Gamma} = \frac{P_w \cdot (\Delta V + F)}{n_{A,\Gamma}} \quad (4.26)$$

Όπου $n_{A,\Gamma}$ ο βαθμός απόδοσης της αντλίας. Το γλυκό νερό αφού έχει εισέλθει στις μεμβράνες ρέει, λόγω του φαινομένου της ώσμωσης, προς την πλευρά του θαλασσινού νερού. Μια μικρή ποσότητα γλυκού νερού, με ρυθμό παροχής F , δεν θα περάσει στη πλευρά του θαλασσινού νερού και θα αποβληθεί από τη μονάδα πίσω στο ποτάμι (Θ).

Από την ανάμιξη των δύο διαλυμάτων προκύπτει το υφάλμυρο νερό το οποίο εξέρχεται από τις μεμβράνες (Ι) με πίεση $(P_D + P_E + P_w)$ και ογκομετρικό ρυθμό παροχής $(V + \Delta V)$. Το υφάλμυρο νερό διαχωρίζεται σε δύο μέρη:

- το μεγαλύτερο μέρος (2/3 του υφάλμυρου νερού) οδηγείται στους εναλλάκτες πίεσης (Κ) με πίεση $(P_D + P_E + P_w)$ και ογκομετρικό ρυθμό παροχής $[(V + \Delta V) \cdot 0,66]$. Από εκεί αφού μεταδώσει όλη την πίεση στο εισερχόμενο θαλασσινό νερό εξέρχεται από τους εναλλάκτες πίεσης (Λ) και επιστρέφει πίσω στη θάλασσα αφού πρώτα ενωθεί με το δεύτερο μέρος του υφάλμυρου νερού (Μ).
- Το δεύτερο μέρος (1/3 του υφάλμυρου νερού) οδηγείται στον στρόβιλο (Ν) με πίεση $(P_D + P_E + P_w)$ ογκομετρικό ρυθμό παροχής $[(V + \Delta V) \cdot 0,33]$ όπου εκείνος με τη σειρά του περιστρέφει μια γεννήτρια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το υφάλμυρο νερό μετά τον στρόβιλο ενώνεται με το υφάλμυρο νερό που εξέρχεται από τον εναλλάκτη πίεσης (Μ) έχοντας ρυθμό παροχής $(V + \Delta V)$ και πίεση $P=0$ και με τη βαρύτητα οδηγείται πίσω στη θάλασσα.

Ο στρόβιλος:

$$P_{\Sigma} = (P_D + P_E + P_w) \cdot [(V + \Delta V) \cdot 0,33] \cdot n_{\Sigma} \quad (4.27)$$

Όπου n_{Σ} ο βαθμός απόδοσης του στρόβιλου. Η γεννήτρια:

$$P_{\Gamma} = P_{\Sigma} \cdot n_{\Gamma} \quad (4.28)$$

Όπου n_{Γ} ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας. Η απόδοση του στρόβιλου συμπεριλαμβάνεται μέσα στην απόδοση της γεννήτριας. Άλλες απώλειες ενέργειας προέρχονται από την προκατεργασία (P_{π}).

Η καθαρή παραγόμενη ενέργεια θα είναι τελικά:

$$P_{out}^{real} = [(P_D + P_E + P_w) \cdot ((V + \Delta V) \cdot 0,33)] - (P_{A,\theta} + P_{A,\Gamma} + P_{A,E} + P_{\Gamma}) \quad (4.29)$$

Προκύπτει ότι, η ενέργεια εξόδου του συστήματος PRO εξαρτάται από τα ακόλουθα^[Q, 3A12,3A13]:

- Την πτώση πίεσης λόγω τριβής κατά μήκος της πλευράς του γλυκού νερού,
- την πτώση πίεσης λόγω τριβής κατά μήκος της πλευράς του θαλασσινού νερού,
- τις απώλειες των περιστρεφόμενων εξαρτημάτων (στρόβιλος-γεννήτρια, αντλία γλυκού νερού, αντλία θαλασσινού νερού, εναλλάκτες πίεσης),
- το γεγονός ότι οι μεμβράνες δεν είναι τέλεια ημι-διαπερατές.

4.10 Περιβαλλοντικοί περιορισμοί

Από την ανάλυση του κύκλου λειτουργίας της μονάδας PRO για παραγωγή ενέργειας που προηγήθηκε συμπεραίνεται ότι είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και δεν παράγει CO₂ στο περιβάλλον. Όμως, οι επιπτώσεις των υφάλμυρων υδάτων τοπικά στο θαλάσσιο και στο νερό του ποταμού θα μπορούσε να είναι επιβλαβές για το περιβάλλον εάν δεν ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα.

Το νερό που εισέρχεται από το ποτάμι στη μονάδα δεν καταναλώνεται, αλλά μετά το τέλος του κύκλου λειτουργίας εκχέεται πίσω στο ποτάμι ώστε να συνεχίσει τη φυσική του πορεία. Η ποσότητα που θα αντληθεί όμως για την τροφοδότηση της μονάδας δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 15% του συνολικής ροής, καθώς, σε αντίθετη περίπτωση θα έχει αρνητική επίδραση στο οικοσύστημα. Σε μεγάλης κλίμακας μονάδα ο όγκος της ροής γλυκού νερού θα ξεπερνάει τα 10m³s⁻¹ ^[141]. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να είναι ακόμη απαραίτητο να αλλάξουν οι κανόνες του υδραυλικού συστήματος και διαχείρισης του νερού, λόγω της μεγάλης ποσότητας νερού που απαιτείται^[142].

Την ίδια στιγμή εισέρχεται θαλασσινό νερό στη μονάδα που έχει αντληθεί από μια τοποθεσία που θα βρίσκεται βαθιά μέσα στη θάλασσα. Τα δύο διαλύματα (γλυκό νερό και θαλασσινό νερό) μετά την ανάμιξη τους, θα προκύψει ένα υφάλμυρο νερό. Το εισερχόμενο στη μονάδα θαλασσινό νερό και το υφάλμυρο νερό που εξέρχεται από αυτή, για να οδηγηθεί πίσω στην θάλασσα, έχουν διαφορά στην αλατότητα τους. Η απόρριψη του υφάλμυρου νερού στη θάλασσα όταν γίνει σε μεγάλες ποσότητες μπορεί να τροποποιήσει το υδάτινο περιβάλλον και να επηρεάσει την κοινότητα των ζώων και των φυτών που ζουν σε αυτή την τοποθεσία λόγω της διακύμανσης της αλατότητας οδηγώντας πιθανώς σε ανισορροπία του οικοσυστήματος. Ωστόσο, η διακύμανση αυτή

είναι συνηθισμένη στο σημείο όπου το ποτάμι εκβάλλει στην θάλασσα. Είναι σημαντικό λοιπόν, τα υφάλμυρα ύδατα που εξέρχονται από την μονάδα να διοχετεύονται σε ένα σημείο στη θάλασσα, η οποία έχει την ίδια περιεκτικότητα σε αλάτι^[141].

Στη Νορβηγία η εταιρεία Statkraft^[99] έχει θέσει σε λειτουργία πιλοτική μονάδα από το 2009 (γίνεται αναλυτική περιγραφή στο κεφάλαιο 7) και ο οργανισμός NIVA αναλύει δείγματα για τον εντοπισμό των επιδράσεων που έχει η μονάδα στο περιβάλλον. Σύμφωνα με τον οργανισμό έχουν εντοπιστεί δύο κύρια προβλήματα.

Το πρώτο σχετίζεται με τα χημικά που θα χρησιμοποιηθούν για τον καθαρισμό των μεμβρανών. Τα χημικά είναι παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται για την αφαλάτωση και στις εταιρίες επεξεργασίας νερού^[123]. Το είδος αυτών των χημικών δεν συσσωρεύονται συνήθως στο περιβάλλον, αλλά υπάρχει περίπτωση εμφάνιση τοξικών φαινομένων τοπικά εάν τα χημικά ξεπεράσουν τα αποδεκτά όρια. Τα αποτελέσματα που πραγματοποιήθηκαν στη πιλοτική μονάδα της Statkraft έδειξαν ότι τα χημικά που έχουν χρησιμοποιηθεί δεν έχουν καθόλου επίδραση στο τοπικό περιβάλλον μέχρι σήμερα^[99,141].

Το δεύτερο κύριο πρόβλημα έχει να κάνει με την πιθανότητα αύξησης της ποσότητας ευτροφισμού στα γύρω νερά (ο όρος ευτροφισμός έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 1). Αυτό μπορεί να παραχθεί από την συλλογή αλατόνευρο από μεγάλο βάθος και την έξοδο από την μονάδα ως υφάλμυρο νερό στη επιφάνεια της θάλασσας ή μπορεί να προκληθεί από τις αλλαγές θερμοκρασίας, καθώς, το νερό που βρίσκεται σε μεγάλο βάθος έχει πιο σταθερή διακύμανση από ότι έχει το νερό στην επιφάνεια της θάλασσας. Στη μονάδα της Statkraft, το θαλασσινό νερό αντλείται από βάθος 35 μέτρων, περνάει μέσα από τη μονάδα, και εκχέεται στην επιφάνεια της θάλασσας. Τα αποτελέσματα από τα νερά γύρω από τη μονάδα δεν έδειξαν κάποια σημαντική επίδραση στο περιβάλλον^[99,141].

Άλλες επιδράσεις από τη κατασκευή μονάδας PRO σχετίζονται με το κτίριο της μονάδας, τους δρόμους για πρόσβαση στη μονάδα και τη σύνδεση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Έχει χαρακτηριστεί ότι μια μονάδα PRO απαιτεί σχετικά μικρό χώρο. Για παράδειγμα, μια εγκατάσταση για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 25MW θα καταλαμβάνει επιφάνεια όσο ένα γηπέδου ποδοσφαίρου^[143]. Έχει προταθεί επίσης, η κατασκευή της μονάδας να γίνει εξ ολοκλήρου υπόγεια ή εν μέρει ή κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας για να μειωθεί η επιφάνεια της μονάδας και η επίδραση στο τοπικό περιβάλλον^[121,123-125]. Σε αυτή τη περίπτωση, η απόδοση της μονάδας θα αυξηθεί καθώς το εισερχόμενο θαλασσινό νερό θα εισέρχεται μέσω της βαρύτητας στη μονάδα και χωρίς να χρειαστεί η άντληση της^[125]. Οι αρνητικές επιπτώσεις θα πρέπει να ληφθούν υπόψη από τις μελλοντικές μονάδες ωσμωτικής ενέργειας **καθώς και το γεγονός ότι εφόσον δεν υπάρχει μεγάλης κλίμακας μονάδα για να επιβεβαιωθούν οι επιδράσεις πρέπει να υπάρχει επιφύλαξη.**

Κεφάλαιο 5

Οικονομοτεχνική μελέτη ωσμωτικής μονάδας PRO 1 MW στην Ελλάδα

5.1 Σενάριο

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκε θεωρητικά μια ωσμωτική μονάδα με τη μέθοδο PRO όταν αναμιγνύεται γλυκό νερό και θαλασσινό νερό. Στόχος της πτυχιακής εργασίας είναι να τεκμηριώσει τη δυνατότητα αξιοποίησης μιας μονάδας PRO για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Αφού αναφέρονται όλα τα πιθανά σημεία που έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ενέργεια στον ελληνικό χώρο και τις προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούν, πραγματοποιείται μελέτη σε μια από αυτές τις περιοχές για μια μονάδα ενός (1) MW.

5.2 Τοποθεσία μονάδας

Η τοποθεσία της μονάδας θα βρίσκεται στην εκβολή του ποταμού και η μονάδα θα κατασκευαστεί στην επιφάνεια της γης. Ακολουθεί η συνοπτική περιγραφή των ποταμών της Ελλάδας και τα κριτήρια επιλογής της τοποθεσίας.

5.2.1 Ποταμοί της Ελλάδας

Η γεωγραφική θέση της Ελλάδας στη Μεσόγειο σε συνδυασμό με τη γεωμορφολογική της σύσταση και την ανομοιόμορφη κατανομή των βροχοπτώσεων κατατάσσεται στις άνυδρες χώρες αλλά με τη μεγαλύτερη επάρκεια νερού σε σύγκρισή με άλλες μεσογειακές χώρες. Οι ποταμοί της Ελλάδας είναι επίσης διαφορετικοί ανάλογα με τη γεωγραφική τους θέση. Για παράδειγμα, η Δυτική Ελλάδα δέχεται μεγαλύτερου ύψους βροχόπτωση με αποτέλεσμα το υδρολογικό καθεστώς των ποταμών σε εκείνη τη περιοχή να είναι διαφορετικό από τα ποτάμια της υπόλοιπης χώρας. Επίσης, οι περισσότεροι από τους ποταμούς της Ελλάδας είναι χειμαρρώδεις, προκαλούν διαβρώσεις στα εδάφη και μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες φερτού υλικού στις εκβολές^[144].

Σχετικά με τις λεκάνες απορροής των ποταμών, τρεις (Εβρος, Αξιός, Στρυμόνας) θεωρούνται ως πολύ μεγάλες (>10.000 km²). Ακολουθούν οκτώ ποταμοί με λεκάνη απορροής μεγαλύτερη από 1000 km² (Νέστος, Αλιάκμονας, Πηνειός, Καλαμάς, Άραχθος, Αχελώος, Σπερχειός, Αλφειός). Οι λεκάνες απορροής των ποταμών της δυτικής Ελλάδας χαρακτηρίζονται από υψηλά βροχομετρικά ύψη και η μέση ετήσια παροχή κυμαίνεται από 51 – 188 m³/sec. Οι ποταμοί που εκβάλλουν στο Αιγαίο έχουν μέση ετήσια παροχή από 58 – 157 m³/sec. Το υδρολογικό καθεστώς των ποταμών εξαρτάται από την εποχική κατανομή και τύπο του νετού (βροχή ή χιόνι) και τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά (πχ. βαθμός αλληλεπίδρασης μεταξύ επιφανειακής και υπόγειας ροής των υδάτων).

Στο σύνολο των ποταμών με αξιοποιήσιμη ετήσια παροχή νερού που εκβάλλουν στις ελληνικές θάλασσες είναι οι ακόλουθοι:

a/a	Ποταμοί	Εκβολές	Λεκάνη Απορροής (km ²)	Μέση ετήσια παροχή (m ³ /sec)	Μέση ετήσια απορροή (10 ⁶ /m ³)	Πηγή
1	Αλιάκμονας	Θερμαϊκός	21200	73	2.030	[145]
2	Αλφειός	Ιόνιο	3.660	67	2.100	[146]
3	Αξιός	Θερμαϊκός	25000	158	5.031	[145]
4	Άραχθος	Αμβρακικός	1.894	69,8	1.920	[147]
5	Ασωπός	Νότιος Ευβοϊκός	750	1.6	106	[148]
6	Αχελώος	Ιόνιο	5.572	188	7.800	[149]
7	Βοσπόζης	Θρακικό	349	16	524	[150]
8	Γαλλικός	Θερμαϊκός	1022	39,5	?	[145]
9	Έβρος	Θρακικό	53.000	103	6.800	[151]
10	Εύηνος	Πατραϊκός	1.070	27.6	1.000	[152]
11	Ευρώτας	Λακωνικός	1.605	1.7	360	[153]
12	Θυαμής (Καλαμάς)	Ιόνιο	1.800	37,5	1.619	[154]
13	Λίσσος (Φιλιούρης)	Θρακικό	1.486	20.2	?	[N155]
14	Λουδίας	Θερμαϊκός	1409	23	635	[145]
15	Λούρος	Αμβρακικός	785	19,4	609	[156]
16	Μόρνος	Κορινθιακός	588	7.3	481	[157]
17	Νέστος	Θρακικό	5.761	58	1.819	[158]
18	Πηνειός (Θεσσαλικός)	Θερμαϊκός	10.763	68	2.550	[159]
19	Πηνειός (Πελοπόννησος)	Ιόνιο	794	14	445	[160]
20	Σπειρχειός	Μαλιακός	1.128	2.7	743	[161]
21	Στρυμόνας	Κόλπος Ορφανού	17.300	110	3.440	[162]

Πίνακας 5.1: Ποταμοί του ελληνικού χώρου που εκβάλλουν στη μεσόγειο θάλασσα. Τα δεδομένα που είναι με κόκκινο είναι από ^[163] αλλά λόγω της παλαιότητας της μέτρησης τα σημερινά δεδομένα θα έχουν μια μικρή απόκλιση.

5.2.2 Κριτήρια επιλογής τοποθεσίας

Για την επιλογή της καταλληλότερης θέσης για την ωσμωτική μονάδα, τα ποτάμια του πίνακα 5.1 πρέπει να πληρούν κάποια κριτήρια:

1. Συνεχή διαθεσιμότητα γλυκού νερού (το θαλασσίνο νερό θεωρείται απείρως διαθέσιμο)
2. Διαθεσιμότητα χώρου κοντά στην εκβολή για την εγκατάσταση της μονάδας
3. Η παροχή γλυκού νερού προς τη μονάδα να μην ξεπερνάει το 10-15% της συνολικής ροής, κεφάλαιο 4.10.
4. Η ρύπανση που υφίσταται ο ποταμός να είναι σε χαμηλά επίπεδα.

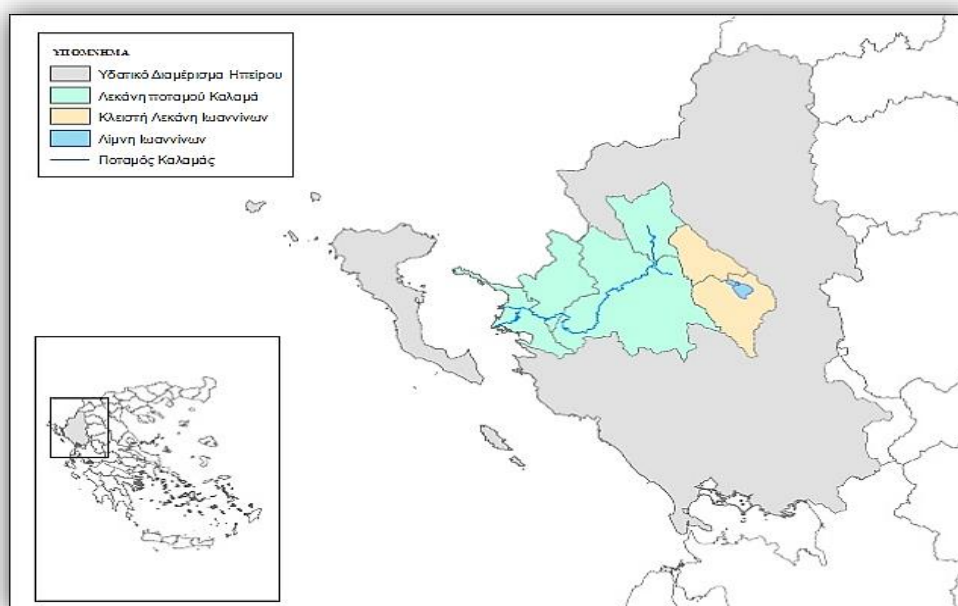
Για μια ωσμωτική μονάδα PRO 1 MW πολλοί από τους παραπάνω ποταμούς (Πίνακας 5.1) μπορούν να τροφοδοτήσουν με γλυκό νερό καθώς η ποσότητα που απαιτείται είναι περίπου 1 m³/s. Η καθαρότητα του γλυκού νερού είναι όμως ένα

σημαντικό κριτήριο για το συνολικό κόστος μιας ωσμωτικής μονάδας, κάτι που καθιστά ακατάλληλους μερικούς ποταμούς για χρήση με τις τωρινές συνθήκες. Πρέπει λοιπόν, να γίνει επιπλέον μελέτη στον ποταμό που θα επιλεγεί για την τροφοδότηση ωσμωτικής μονάδας. Σύμφωνα με το Ινστιτούτο Εσωτερικών Υδάτων του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσιών Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ) τα σημαντικότερα προβλήματα ρύπανσης εντοπίζονται στους ποταμούς Αξιό, Πηνειό, Έβρο και Ασωπό, ενώ μέτρια ή ελλιπής είναι η κατάσταση στο Σπερχειό, το Νέστο, τον Αλιάκμονα, το Στρυμόνα και τον Αχελώο.

Οι παραπάνω ποταμοί στη σημερινή κατάσταση που βρίσκονται χρήζουν κακής διαχείρισης και γι' αυτόν τον λόγο δεν επιλέχθηκαν στην πτυχιακή εργασία. Επίσης, ο ποταμός Ασωπός είναι σχετικά μικρός ποταμός με περιοδική ροή καθιστώντας τον ακατάλληλο για χρήση σε ωσμωτική μονάδα PRO.

5.2.3 Μορφολογικά χαρακτηριστικά επιλεγμένης περιοχής

Η τοποθεσία που επιλέχθηκε είναι ο Θυαμής (Καλαμάς), ποταμός που εκβάλλει στο Ιόνιο Πέλαγος. Το συνολικό μήκος του είναι 115 χιλιόμετρα. Οι πηγές του βρίσκονται στο όρος Δούσκο, κοντά στα σύνορα του νομού Ιωαννίνων με την Αλβανία. Η λεκάνη απορροής του έχει έκταση 1.800 km²[154,164].



Σχήμα 5.1: Απεικόνιση ποταμού Καλαμά και του υδάτινου διαμερίσματος. Πηγή [154].

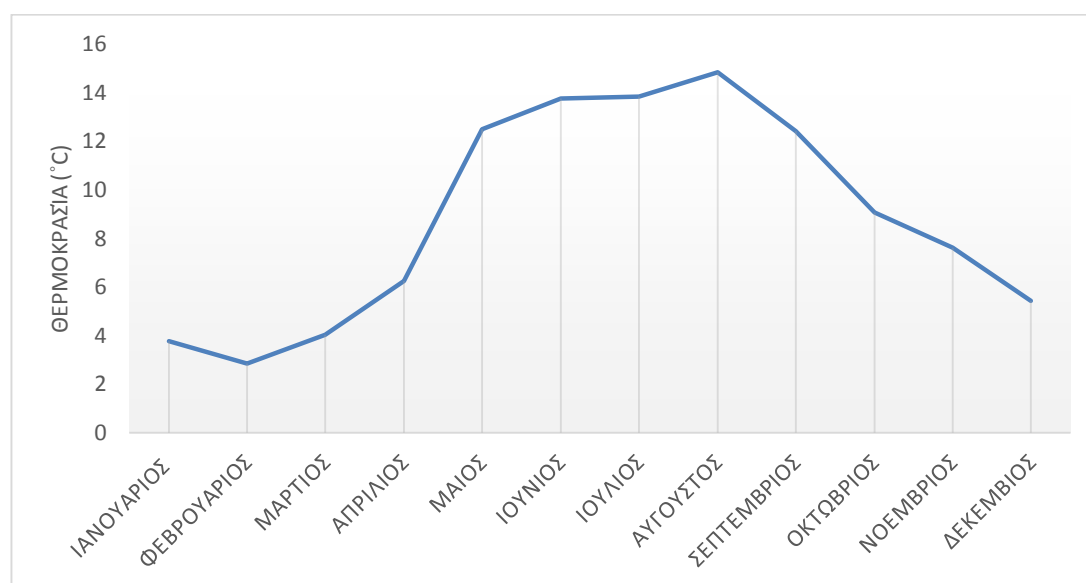
Οι ανθρώπινες δραστηριότητες που αναπτύσσονται στην λεκάνη απορροής και έχουν επίδραση στη ποιότητα του νερού είναι [164]:

- Πτηνο-κτηνοτροφικές μονάδες εντατικής και εκτατικής μορφής,
- Καλλιέργειες αρδευόμενες και ξηρικές,
- Εξορυκτικές δραστηριότητες (μάρμαρα, αδρανή υλικά),

- Βιομηχανικές και βιοτεχνικές μονάδες, κυρίως αξιοποίησης προϊόντων πρωτογενούς τομέα
- Οικισμοί

Για την καταλληλότητα του ποταμού Καλαμά πρέπει να εξεταστούν εάν επιτυγχάνονται οι προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν στην ενότητα 5.2.2 όπου η ελάχιστη ροή γλυκού νερού προς τη μονάδα (περίπου $1\text{m}^3/\text{s}$) να είναι διαρκές όλο το χρόνο σε συνδυασμό με την μέγιστη παροχή γλυκού νερού από τον ποταμό Καλαμά να είναι 10-15% της συνολικής ροής.

Η μέση ετήσια θερμοκρασία του ποταμού Καλαμά για την πάροδο ενός χρόνου είναι $9,17^\circ\text{C}$.

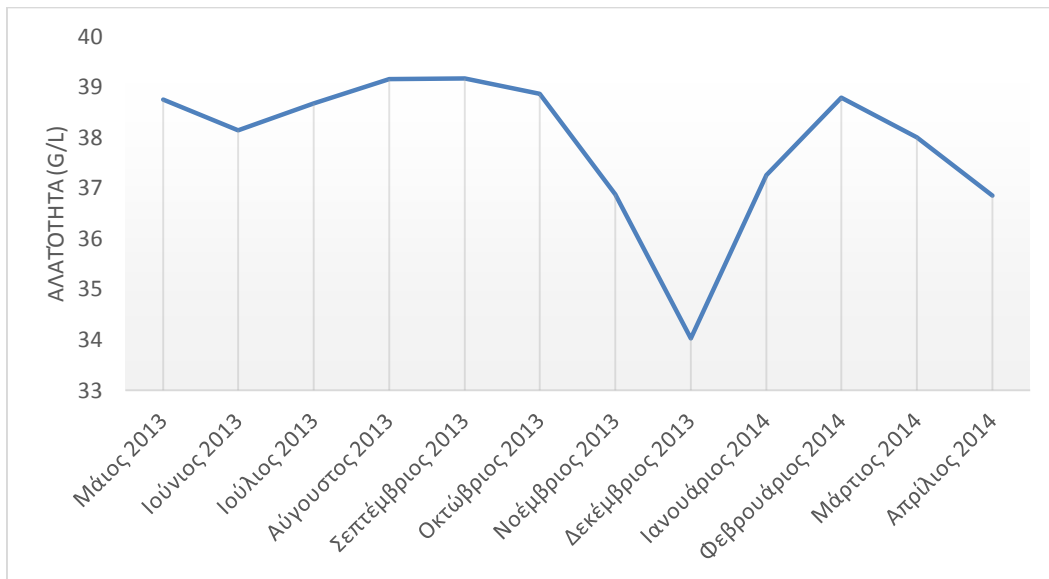


Διάγραμμα 5.1: Μέση μηνιαία θερμοκρασία του ποταμού Καλαμά. Η μέτρηση έγινε για το έτος 1996-1997 από τον σταθμό “ΒΡΟΣΙΝΑ” που ανήκει στη ΔΕΗ. Η χρονοσειρά ανακτήθηκε από το λογισμικό Hydroscope^[165].

5.2.3.1 Στοιχεία της θάλασσας που εκβάλλει ο ποταμός

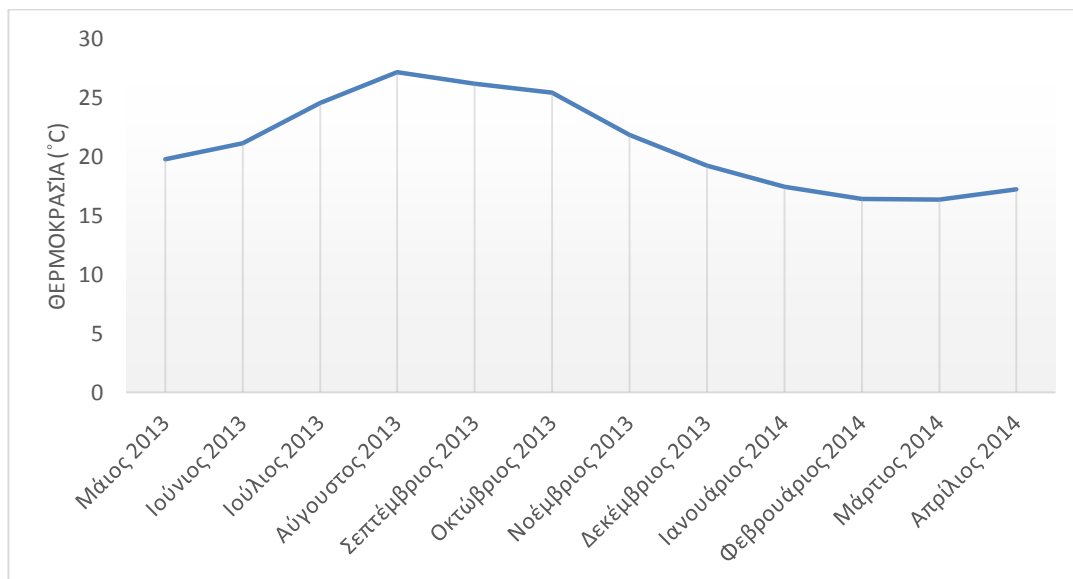
Το Ιόνιο Πέλαγος, που περιβάλλεται από την Ιταλία, την Ελλάδα και την Τυνησία, είναι η μεγαλύτερη σε όγκο νερού ($10,8 \cdot 10^5 \text{ km}^3$) και η βαθύτερη θάλασσα της Μεσογειακής λεκάνης. Η θερμοκρασία αλλάζει μόνο σύμφωνα με τις εποχές από την επιφάνεια μέχρι τα 200 m. Πέραν αυτού του βάθους υπάρχουν ομοιοθερμικές συνθήκες στην υδάτινη στήλη περίπου $13,5-13,8^\circ\text{C}$. Η αλατότητα επίσης εμφανίζει αξιόλογη μεταβλητότητα στα πρώτα 100 m βάθους μέχρι 38,8%, αλλά κάτω από αυτό το βάθος οι τιμές είναι σταθερές, περίπου στα 38,5%. Τα νερά της ανανεώνονται κάθε 100 χρόνια.

Η μέση αλατότητα στο Ιόνιο Πέλαγος για την πάροδο ενός χρόνου (από 1/5/2013 – 1/5/2014) παρουσιάζονται στο διάγραμμα 5.2 και προκύπτει ότι είναι $37,89 \text{ g/L}$.



Διάγραμμα 5.2: Μέση μηνιαία αλατότητα στο Ιόνιο Πέλαγος για περίοδο ενός χρόνου, όπως μετρήθηκε από τον σταθμό ΠΥΛΟΣ, που ανήκει στο ΠΟΣΕΙΔΩΝ^[166].

Η μέση θερμοκρασία στο Ιόνιο Πέλαγος για την πάροδο ενός χρόνου (από 1/5/2013 – 1/5/2014) παρουσιάζονται στο διάγραμμα 5.3 και προκύπτει ότι είναι 21,05°C.



Διάγραμμα 5.3: Μέση μηνιαία θερμοκρασία στο Ιόνιο Πέλαγος για περίοδο ενός χρόνου, όπως μετρήθηκε από τον σταθμό ΠΥΛΟΣ, που ανήκει στο ΠΟΣΕΙΔΩΝ^[166].

5.3 Παραγόμενη ωσμωτική ενέργεια

5.3.1 Διαφορά ωσμωτικής πίεσης

Η θεωρητική διαφορά ωσμωτικής πίεσης ($\Delta\pi$, σε bar) υπολογίζεται διαφοροποιώντας την εξίσωση 3.1 του Van't Hoff:

$$\Delta\pi = (i \cdot M_{\theta} \cdot R \cdot T_{\theta}) - (i \cdot M_{\Gamma} \cdot R \cdot T_{\Gamma}) \quad (5.1)$$

Όπου i ο αριθμός των ιόντων του διαλύματος, M_{θ} και M_{Γ} η ποσότητα NaCl στο διάλυμα του θαλασσινού και του γλυκού νερού αντίστοιχα, R η παγκόσμια σταθερά των αερίων, T_{θ} και T_{Γ} η θερμοκρασία του θαλασσινού και του γλυκού νερού αντίστοιχα.

Οι τιμές για τον ποταμό Καλαμά και για το Ιόνιο Πέλαγος συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

i	M_{θ} (mol/L)	M_{Γ} (mol/L)	R (LbarK ⁻¹ mol ⁻¹)	T_{θ} (K)	T_{Γ} (K)
2	0.6483572	0	8,31451•10 ⁻²	294.204	282,17

Πίνακας 5.2: Τιμές από τον ποταμό Καλαμά και από το Ιόνιο Πέλαγος.

Επομένως, η θεωρητική διαφορά ωσμωτικής πίεσης με τα δεδομένα της περιοχής που επιλέχθηκε στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας στην εξίσωση 5.1 είναι:

$$\Delta\pi = 31,72 \text{ bar}$$

5.3.1 Διαφορά υδροστατικής πίεσης

Η διαφορά υδροστατικής πίεσης (ΔP , σε bar) είναι μέγιστη όταν, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.5, είναι η μισή της διαφοράς ωσμωτικής πίεσης, δηλαδή:

$$\Delta P = \frac{\Delta\pi}{2} = 15,86 \text{ bar}$$

5.3.3 Ωσμωτική ενέργεια

Η ωσμωτική ενέργεια ($E_{\omega\sigma\mu\omega\sigma\eta\varsigma}$, σε MJ/m³) ορίζεται ως την ενέργεια που μπορεί να παραχθεί σε πραγματικές συνθήκες. Για 1 κυβικό γλυκού νερού το δευτερόλεπτο μπορεί να παράγει θεωρητική ωσμωτική ενέργεια^[167]:

$$E_{\theta,\omega\sigma\mu\omega\sigma\eta\varsigma} = 2,88 \text{ MJ}$$

Σύμφωνα με τη μελέτη του Thorsen και Holt^[41] η πραγματική ωσμωτική ενέργεια που μπορεί να προκύψει από την ανάμιξη είναι το 40% θεωρητικής ωσμωτικής ενέργειας, οπότε:

$$E_{\omega\sigma\mu\omega\sigma\eta\varsigma} = 1,152 \text{ MJ}$$

5.4 Ετήσια ηλεκτρική ενέργεια ωσμωτικής μονάδας 1MW

Η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ($E_{\alpha\rho\chi\iota\kappa\eta}$) από μια ωσμωτική μονάδα 1MW υπολογίζεται ως εξής:

$$E_{\alpha\rho\chi\iota\kappa\eta} = E_{\omega\sigma\mu\omega\sigma\eta\varsigma} \cdot Q_{\gamma\lambda\upsilon\kappa\omicron\upsilon\ \nu\epsilon\rho\omicron\upsilon\ \mu\omicron\nu\alpha\delta\alpha\varsigma} \cdot t \quad (5.2)$$

Όπου t είναι οι ώρες λειτουργίας σε ένα χρόνο. Η μέση πραγματική ωσμωτική ενέργεια $E_{\omega\sigma\mu\omega\sigma\eta\varsigma}$ είναι περίπου 1.152 MJ/m^3 και με συνεχή ροή γλυκού νερού $1 \text{ m}^3/\text{s}$ η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι 10 GWh/χρόνο , με τη παραδοχή ότι θα δουλεύει το χρόνο 8.700 ώρες.

5.5 Απαιτούμενη ποσότητα ροής (Q)

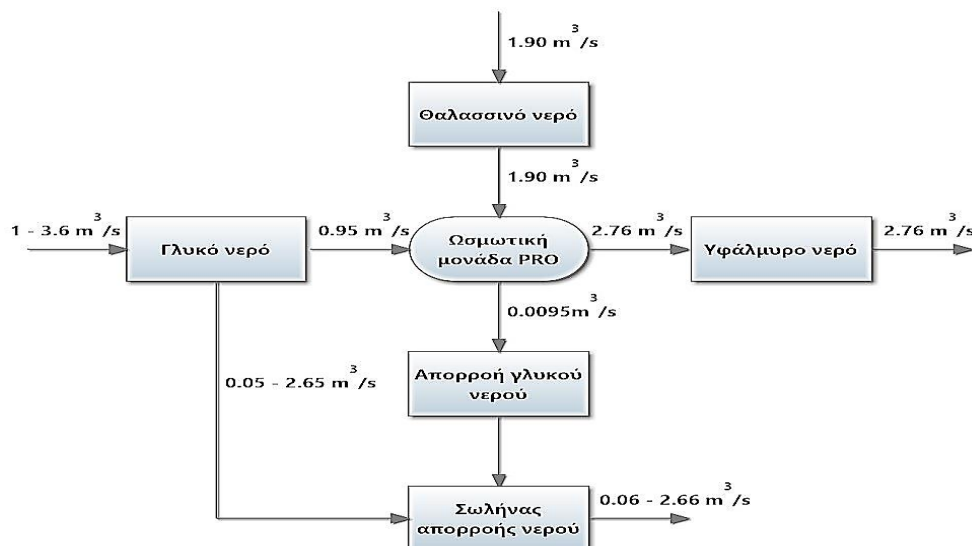
Η ποσότητα γλυκού νερού που θα εισαχθεί στις μεμβράνες είναι της τάξης του 90% της συνολικής ποσότητας γλυκού νερού που θα εισαχθεί στη μονάδα. Η υπόλοιπη ποσότητα (10%), ή όπως ονομάζεται *εκροή γλυκού νερού*, επιστρέφει σε άλλο σημείο πίσω στο ποτάμι. Σε μεγάλες ωσμωτικές μονάδες όπου η ροή είναι μεγαλύτερη μπορεί να εισαχθεί πάλι στην αρχή της διαδικασίας εισροής γλυκού νερού τότε η είσοδος γλυκού νερού μπορεί να μειωθεί κατά 10%, αλλά σε μικρές μονάδες η ροή είναι πολύ μικρή.

Ο λόγος αναλογίας του γλυκού νερού με το θαλασσινό νερό είναι 1:2, όπως κατέληξε ο S. Loeb^[70,71] ώστε το σύστημα να έχει υψηλή απόδοση. Οπότε η απαιτούμενη ποσότητα θαλασσινού νερού είναι διπλάσια της ποσότητας γλυκού νερού, δηλαδή:

$$Q_{\text{θαλασσινού νερού μονάδας}} = 2 \cdot Q_{\text{γλυκού νερού μονάδας}}$$

Το υφάλμυρο νερό που προκύπτει από την ανάμιξη του γλυκού και θαλασσινού νερού είναι ίσο με:

$$Q_{\text{υφάλμυρου νερού μονάδας}} = Q_{\text{γλυκού νερού μονάδας}} + Q_{\text{θαλασσινού νερού μονάδας}}$$



Διάγραμμα 5.4: Η μέση απαιτούμενη τιμή των ροών για παραγωγή ενέργειας 1 MW.

Το διάγραμμα 5.4 αναπαριστά τη μέση τιμή των απαιτούμενων ροών. Οι τιμές αυτές δεν θα οδηγήσουν σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 1 MW αλλά χαμηλότερης λόγω των απωλειών ενέργειας.

Οι απαιτούμενες τιμές των ροών σύμφωνα με το διάγραμμά 5.4 για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 1 MW με τη μέθοδο PRO είναι:

- | | |
|--------------------------------------|------------------------|
| ▪ Ροή γλυκού νερού προς της μονάδας: | 0.95 m ³ /s |
| ▪ Ροή θαλασσινού νερού: | 1.90 m ³ /s |
| ▪ Ροή υφάλμυρου νερού: | 2.76 m ³ /s |

5.6 Ανάλυση των τμημάτων της ωσμωτικής μονάδας PRO

Για την εύρεση της αποδοτικότητας και του κόστους κεφαλαίου μιας ωσμωτικής μονάδας PRO πρέπει να αναλυθούν τα επιμέρους τμήματα που την αποτελούν ως προς το κόστος κεφαλαίου και την απώλεια ενέργειας λόγω κατανάλωσης για λειτουργία. Τα μέρη που αναλύθηκαν θεωρητικά στο κεφάλαιο 4, θα πλαισιωθούν από το σενάριο τοποθέτησης της ωσμωτικής μονάδας PRO 1MW στον ποταμό Καλαμά, στην περιοχή που εκβάλλει στο Ιόνιο Πέλαγος. Τα τμήματα που αναλύονται στη συνέχεια είναι:

- 5.7 Σύστημα πρόσληψης / αποβολής
- 5.8 Προκατεργασία
- 5.9 Στοίβες μεμβράνης
- 5.10 Εναλλάκτης πίεσης
- 5.11 Αντλία, υδροστρόβιλος, γεννήτρια και σωληνώσεις

Μετά την ανάλυση των ανωτέρω τμημάτων θα ακολουθήσει το συνολικό κόστος κεφαλαίου και η συνολική παραγόμενη ενέργεια της μονάδας.

5.7 Σύστημα πρόσληψης / αποβολής

Το πρώτο στάδιο της ωσμωτικής παραγωγής ενέργειας είναι η συνεχής ροή γλυκού και θαλασσινού νερού στη μονάδα. Όμως, το σημείο που είναι η πηγή του θαλασσινού νερού είναι σε μεγάλη απόσταση από τη μονάδα. Η μεταφορά θα επιτευχθεί με την κατασκευή συστήματος πρόσληψης. Το σύστημα πρόσληψης θα αποτελείται από το σημείο πρόσληψης του θαλασσινού νερού, το οποίο θα απορροφά το τοπικά το θαλασσινό νερό, και μια υπόγεια σήραγγα για τη μεταφορά του νερού προς τη μονάδα.

Το τελευταίο στάδιο της μονάδας είναι η αποβολή του υφάλμυρου νερού που έχει προκύψει από την ανάμιξη των δυο διαλυμάτων. Η μεταφορά θα επιτευχθεί με την κατασκευή συστήματος αποβολής. Παρόμοια όπως και στο σύστημα πρόσληψης,

το σύστημα αποβολής θα αποτελείται από το σημείο αποβολής του υφάλμυρου νερού και μια υπόγεια σήραγγα.

5.7.1 Γενικά

Η ανάλυση του συστήματος πρόσληψης/αποβολής του νερού πραγματοποιήθηκε στο κεφάλαιο 4.3 όπου υπολογίσθηκε το ολικό ύψος απωλειών του νερού (εξίσωση 4.12).

5.7.2 Ενδεικτική χωροθέτηση

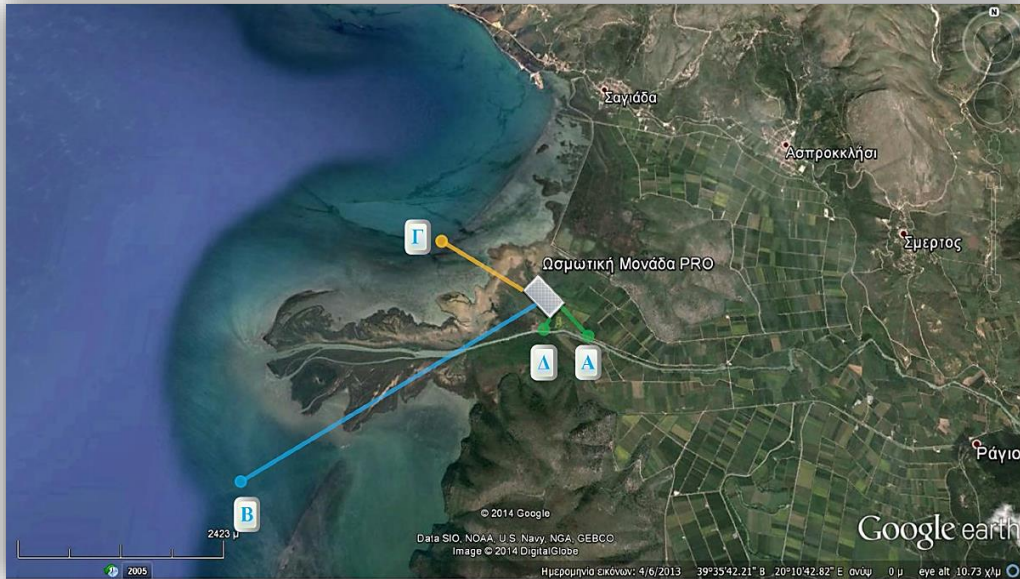
Ο καθορισμός της θέσης των σημείων πρόσληψης και αποβολής νερού έχουν μεγάλη σημασία στο ολικό ύψος απωλειών. Στο σχήμα 5.2 απεικονίζεται η περιοχή της ωσμωτικής μονάδας PRO για τον ποταμό Καλαμά που εκβάλλει στο Ιόνιο Πέλαγος καθώς και οι περιοχές που θα γίνει η πρόληψη/αποβολή του νερού.



Σχήμα 5.2: Ενδεικτική χωροθέτηση ωσμωτικής μονάδας PRO στη περιοχή που εκβάλλει ο ποταμός Καλαμάς στο Ιόνιο Πέλαγος με χρήση του Google Earth.

Το σημείο επιλογής του συστήματος πρόσληψης γίνεται βάσει της συγκέντρωσης αλατότητας της περιοχής σε συνδυασμό με την απόσταση του από την μονάδα. Το σημείο επιλογής του συστήματος αποβολής του υφάλμυρου νερού καθορίζεται από την αλατότητα του υφάλμυρου νερού ώστε να αποβάλλεται σε σημείο στη θάλασσα με την ίδια αλατότητα για να μην επηρεάζεται το οικοσύστημα (κεφάλαιο 4.10).

Το κόστος των συστημάτων πρόσληψης/αποβολής εξαρτάται από την απόσταση που θα έχουν από την μονάδα. Τα σημεία που επιλέχθηκαν απεικονίζονται στο σχήμα 5.3.

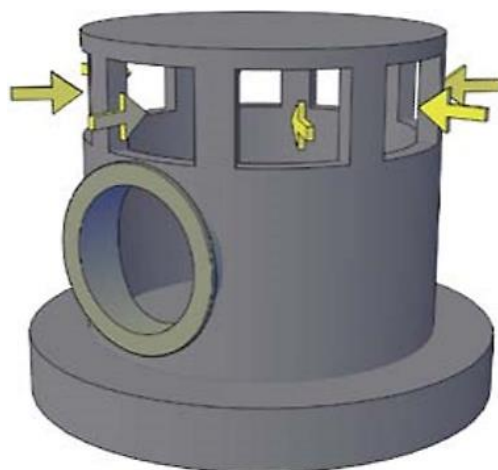


Σχήμα 5.3: Απεικόνιση των υπόγειων σηράγγων που θα μεταφέρουν το νερό εντός και εκτός της μονάδας και τα σημεία πρόσληψης και αποβολής. Το γλυκό νερό απεικονίζεται με το πράσινο χρώμα, το θαλασσινό νερό με το μπλέ και το υφάλμυρο νερό με το κίτρινο χρώμα.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3, το σημείο πρόσληψης του γλυκού νερού στη μονάδα γίνεται από το σημείο Α, το σημείο πρόσληψης του θαλασσινού νερού είναι στο σημείο Β, η αποβολή του γλυκού νερού που απορρέει από τη διαδικασία PRO επιστρέφει στο ποτάμι, σημείο Δ, και το υφάλμυρο νερό αποβάλλεται από τη μονάδα στο σημείο Γ. Η τροφοδότηση και αποβολή του γλυκού νερού είναι δίπλα στη μονάδα (απόσταση μικρότερη των 150 m) ώστε να μειωθεί το κόστος άντλησης του. Η απόσταση της σήραγγας του υφάλμυρου νερού είναι 1,5 km, ενώ η σήραγγα του θαλασσινού νερού έχει απόσταση 3,5 km, όπως μετρήθηκε από το Google Earth.

5.7.3 Βασικός σχεδιασμός συστήματος πρόσληψης/αποβολής νερού

Ο βασικός σχεδιασμός του συστήματος πρόσληψης/αποβολής νερού θα αποτελείται από ένα πύργο πρόσληψης (ή πύργο αποβολής στη περίπτωση του υφάλμυρου νερού) και υπόγεια σήραγγα για τη μεταφορά του νερού προς τη μονάδα (μια διαφορετική για τον πύργο αποβολής). Ο πύργος πρόσληψης απεικονίζεται στο σχήμα 5.4 όπου η ροή του θαλασσινού νερού ρέει προς τη μονάδα. Ο πύργος αποβολής είναι κατασκευαστικά ο ίδιος με τη διαφορά ότι η ροή είναι αντίθετη.

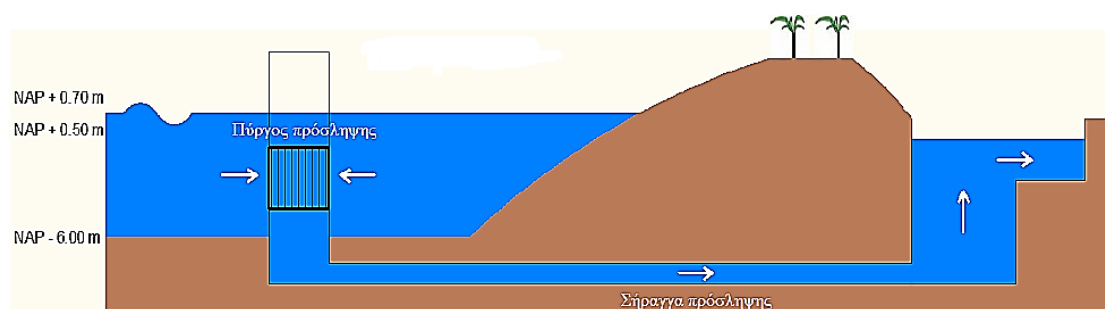


Σχήμα 5.4: Απεικόνιση του πύργου πρόσληψης. Ανάκτηση από [168].

Ο πύργος πρόσληψης έχει κυκλική μορφή και απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ταχύτητα εισόδου της ροής να μην ξεπερνάει τα 0.30 m/s. Η ταχύτητα εισόδου της ροής νερού επηρεάζει το σχεδιασμό καθώς με μεγάλη ταχύτητα εισόδου επηρεάζεται αρνητικά το οικοσύστημα και κατά συνέπεια η βιομηχανία αλιείας επειδή τα ψάρια ενδέχεται να παρασυρθούν μέσα στο σύστημα πρόσληψης. Αυτό αποφεύγεται με χαμηλή πίεση ροής του εισερχόμενου θαλασσινού νερού και με επιπλέον υποδομή γύρω από τον πύργο πρόσληψης^[168].

Ο σχεδιασμός του πύργου πρόσληψης είναι επίσης αποδεκτός εάν το ύψος του υπερέρχει από τη θάλασσα ώστε να προληφθεί από συγκρούσεις, όπως από διερχόμενα πλοία, αλλά και να είναι προσβάσιμος για την βαλβίδα διακοπής της τροφοδοσίας προς τη μονάδα όταν γίνεται συντήρηση.

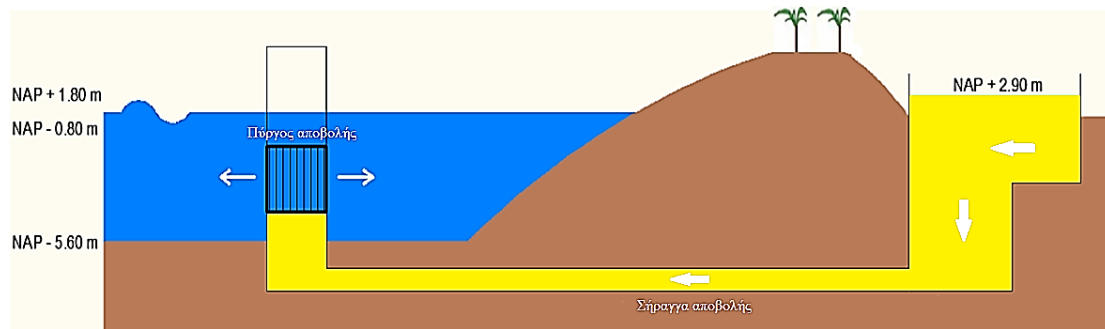
Από το σημείο που βρίσκεται ο πύργος πρόσληψης θα ξεκινάει μια υπόγεια σήραγγα που θα μεταφέρει το νερό προς τη μονάδα. Η σχηματική απεικόνιση για την περίπτωση πρόσληψης του θαλασσινού νερού στη μονάδα απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα 5.5:



Σχήμα 5.5: Σύστημα πρόσληψης του θαλασσινού νερού. Ανάκτηση από [169].

Η εκροή της ωσμωτικής μονάδας PRO, το υφάλμυρο νερό, θα αποβάλλεται πίσω στο Ιόνιο Πέλαγος με τη βαρύτητα επειδή θα έχει ατμοσφαιρική πίεση, σε σημείο όπου η αλατότητα του είναι ίδιας τιμής με αυτής του σημείου της θάλασσας

ώστε να μην διαταράσσεται το οικοσύστημα, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 4.10. Η σχηματική απεικόνιση του συστήματος αποβολής απεικονίζεται στο σχήμα 5.6:



Σχήμα 5.6: Σύστημα αποβολής του υφάλμυρου νερού.

Η ύπαρξη μιας αγροτικής περιοχής όχι μόνο παρέχει μια επαρκή χώρο για μία οσμωτική μονάδα παραγωγής ενέργειας, επιτρέπει επίσης μια σχετικά απλή μέθοδο κατασκευής του συστήματος πρόσληψης και αποβολής.

5.7.4 Κόστος κατασκευής συστήματος πρόσληψης/αποβολής

Ο καθορισμός του είδους των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν επιδρά ελάχιστα στο ολικό ύψος απωλειών, εξίσωση 4.12, οπότε θα εξαρτηθεί από το βάρος και το κοστολόγιο του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί. Επειδή η σήραγγα είναι υπόγεια, απαιτείται επαρκή βάρος για να αποφευχθεί η άνωση (ή πλευστότητα)^[3A56]. Τα πιο συνήθη υλικά που εφαρμόζονται στην κατασκευή και οι αντίστοιχες τιμές τους φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 5.3). Η επιλογή του καταλληλότερου θα επιλεγεί βάσει της μεγαλύτερης οικονομίας του κόστους.

a/a	Είδος	Βάρος ανά κυβικό μέτρο (kg/m ³)	Κόστος μονάδας (€/kg)	Κόστος ανά κυβικό μέτρο (€/m ³)
1	Χάλυβας	7.800	0.65	5.070
2	Τσιμέντο	2.400	0.10	240
3	Πολυαιθυλένιο (HDPE)	950	1	950

Πίνακας 5.3: Κοστολόγιο των πιο συνηθισμένων υλικών κατασκευής. Πηγή^[169].

Η πιο οικονομικά συμφέρουσα επιλογή είναι αυτή του τσιμέντου καθώς το κόστος ανά κυβικό μέτρο είναι με διαφορά η οικονομικότερη επιλογή και αυτή θα επιλεγεί για την κατασκευή του συστήματος πρόσληψης/αποβολής.

5.7.5 Βέλτιστη εσωτερική διάμετρος

Για τον υπολογισμό της βέλτιστης εσωτερικής διαμέτρου του συστήματος πρόσληψης και αποβολής πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι περιορισμοί που υπάρχουν:

- Η μέση ταχύτητα να είναι έως 0.3 m/s (κεφάλαιο 5.7.3).
- Ο ελάχιστος ρυθμός ροής νερού στο σύστημα πρόσληψης θα είναι 1 m³/s για το γλυκό νερό και 1,9 m³/s για το θαλασσινό νερό(κεφάλαιο 5.5 σχήμα ροών). Σε αντίθετη περίπτωση, το νερό που εισέρχεται στο

σύστημα πρόσληψης θα είναι λιγότερο από το νερό που αντλείται στη μονάδα.

- Το ολικό ύψος απωλειών να είναι έως 1 m για την ελαχιστοποίηση της σωλήνας άντλησης του νερού στη μονάδα.

Η απαιτούμενη διάμετρος θα καθοριστεί μέσω επαναλήψεων. Τα βήματα επαναλήψεως είναι:

1. Επιλέχθηκε ο ρυθμός ροής (Q) για την εκάστοτε περίπτωση.
2. Για μια μεταβλητή διάμετρο υπολογίστηκε η ταχύτητα (v, εξίσωση 4.5), ο αριθμός Reynolds (Re, εξίσωση 4.8) και συντελεστής τριβής(f, εξίσωση 4.10).
3. Τα αποτελέσματα του βήματος 2 τοποθετήθηκαν στην εξίσωση 4.12 για να υπολογισθεί το ολικό ύψος απωλειών (Δh).
4. Η διάμετρος που πληρεί τα κριτήρια είναι η βέλτιστη διάμετρος που αντιστοιχεί στο ρυθμό ροής του βήματος 1.
5. Τα βήματα 1 – 4 επαναλαμβάνονται για την εύρεση της κατάλληλης διαμέτρου για την εκάστοτε περίπτωση.

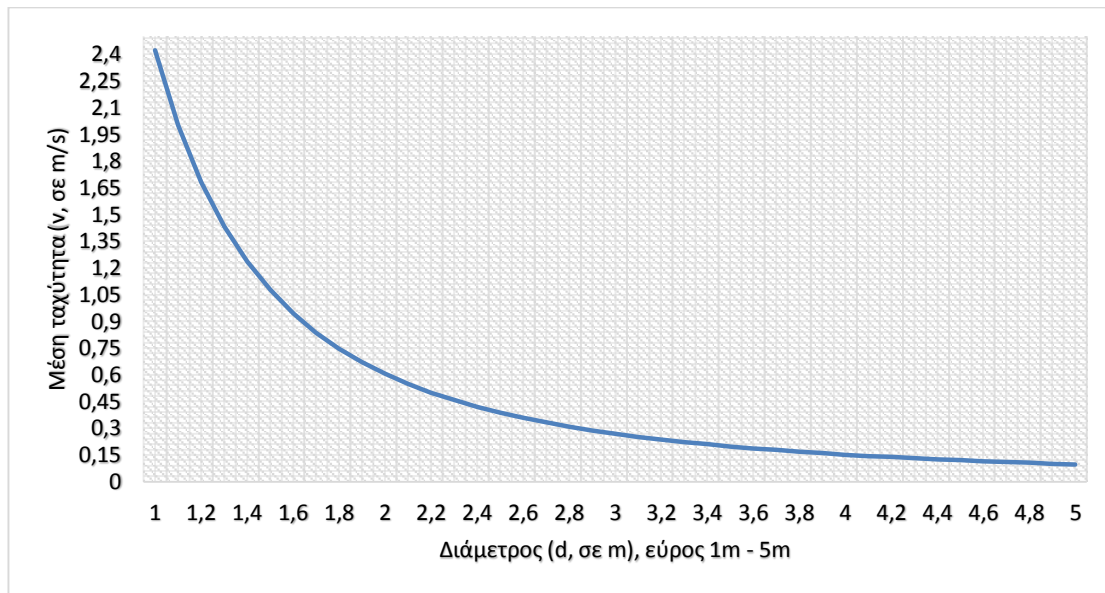
Τα αποτελέσματα για τις τρεις ροές (γλυκό νερό, θαλασσινό νερό και υφάλμυρο νερό) δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Παράμετρος	Μονάδα	Γλυκό νερό	Θαλασσινό νερό	Υφάλμυρο νερό
Μήκος (L)	m	150	3500	1500
Κινηματικό ιξώδες (ν)	m ³ /s	0,000001		
Ρυθμός ροής (Q)	m ³ /s	1	1,9	2,76
Βέλτιστη εσ. διάμετρος (d)	m	2	2,8	3,4
Μέση ταχύτητα (v)	m/s	0,318	0,309	0,304
Αριθμός Reynolds (Re)	-	636942,675	864422,202	1034095,167
Μέση τραχύτητα (k)	m	0,0003		
Συντελεστής απωλειών (ξ)	-	1,96		
Συντελεστής τριβής (f)	m	0,015	0,014	0,013
Ολικό ύψος απωλειών (Δh)	m	0,016	0,093	0,037

Πίνακας 5.4 Οι παράμετροι για τη βέλτιστη εσωτερική διάμετρο στις τρεις ροές.

Για ένα εύρος εσωτερικής διαμέτρου από 1m έως 5m η βέλτιστη τιμή για τις τρεις περιπτώσεις παρουσιάζεται στον πίνακα 5.4. Η κύρια συνθήκη που επηρέασε την επιλογή της διαμέτρου ήταν η μέση ταχύτητα. Το ολικό ύψος απωλειών είναι αμελητέο και δεν επηρέασε στην επιλογή της διαμέτρου.

Στον διάγραμμα 5.5 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ της μέσης ταχύτητας και της εσωτερικής διαμέτρου στην περίπτωση του θαλασσινού νερού.



Διάγραμμα 5.5: Συσχέτιση μέσης ταχύτητας και εσωτερική διαμέτρου στη περίπτωση του θαλασσινού νερού για ένα εύρος τιμών εσωτερικής διαμέτρου από 1 m – 5 m.

Στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας επιλέχθηκε εσωτερική διάμετρος 2 m για το γλυκό νερό, 2.8 m για το θαλασσινό νερό και 3.4 m για το υφάλμυρο νερό.

5.7.6 Κόστος κεφαλαίου συστήματος πρόσληψης / αποβολής

Το κόστος κεφαλαίου για το σύστημα πρόσληψης / αποβολής υπολογίζεται στα 500.000€. Στο κόστος περιλαμβάνεται η κατασκευή του συστήματος πρόσληψης του γλυκού νερού και του θαλασσινού νερού καθώς και του συστήματος αποβολής του υφάλμυρου νερού και του γλυκού νερού.

5.7.7 Απώλεια ενέργειας του συστήματος πρόσληψης / αποβολής

Η απώλεια ενέργειας στο σύστημα πρόσληψης / αποβολής καθορίζεται από το ολικό ύψος απωλειών που θα πρέπει να καλυφθεί με άντληση. Επειδή στη περίπτωση της ωσμωτικής μονάδας 1 MW η τιμή αυτή είναι αμελητέα δεν θα χρησιμοποιηθεί αντλία.

5.8 Προκατεργασία

Το δεύτερο στάδιο μιας ωσμωτικής μονάδας PRO είναι η προκατεργασία του εισερχόμενου στη μονάδα γλυκού και θαλασσινού νερού. Αυτά τα δύο διαλύματα περιέχουν αιωρούμενα στερεά, κolloειδή σωματίδια, διαλυμένα στερεά και μικροοργανισμούς οι οποίοι είναι επιβλαβείς για τη μόλυνση των ημι-διαπερατών μεμβρανών. Η ρύπανση της μεμβράνης θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της παραγόμενης ενέργειας. Αυτό επιλύεται με τη προκατεργασία του γλυκού και του θαλασσινού νερού. Στη συνέχεια καθορίζεται το κόστος κεφαλαίου, η απώλεια

ενέργειας και ο απαιτούμενος χώρος για την τοποθέτηση του συστήματος προκατεργασίας.

5.8.1 Γενικά

Η ανάλυση της κάθε μεθόδου προκατεργασίας πραγματοποιήθηκε στο κεφάλαιο 4.4.

5.8.2 Επιλογή τύπου προκατεργασίας

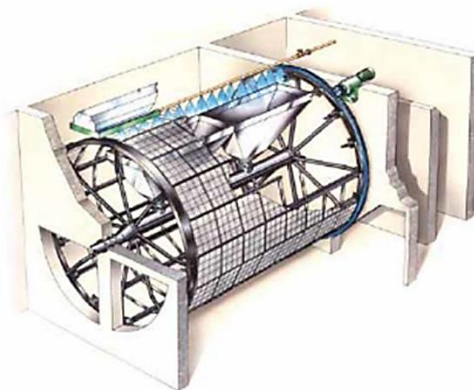
Η επιλογή του τύπου της προκατεργασίας για να χρησιμοποιηθεί στην ωσμωτική μονάδα PRO 1MW καθορίζεται από τον συνδυασμό μεταξύ της ενέργειας που καταναλώνεται από το σύστημα προκατεργασίας και τις απαιτήσεις για τον καθαρισμό του εισερχόμενου νερού.

Σύμφωνα με την εταιρία Statkraft, μια σχετική μορφή φιλτραρίσματος χονδρόκοκκου σε συνδυασμό με περιοδικό ξέπλυμα και διάφορες ενέργειες καθαρισμού φαίνεται να είναι επαρκής. Η χονδροειδή μορφή του φιλτραρίσματος μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση μικροδιήθησης (micro-filtration).

Η προκατεργασία μέσω της μικροδιήθησης είναι η πιο φθηνή μέθοδος που είναι εμπορικά διαθέσιμη. Είναι κατάλληλη για να απομακρύνει μικροοργανισμούς και αιωρούμενα στερεά, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.4. Αναμένεται να εξεταστεί η εφαρμογή της μικροδιήθησης και η επίδραση της στην παραγόμενη ενέργεια από τη πιλοτική μονάδα της Statkraft για να επιβεβαιωθεί ότι είναι η βέλτιστη επιλογή.

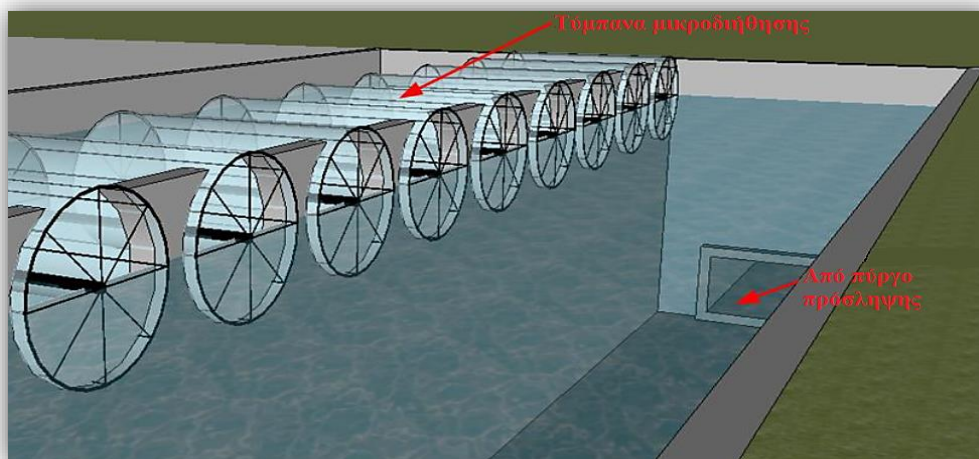
5.8.3 Βασικός σχεδιασμός

Η επιλεγμένη μέθοδος στην παρούσα πτυχιακή εργασία είναι η μικροδιήθηση σε φίλτρο περιστρεφόμενου τυμπάνου (microfiltration drum filter) , σχήμα 5.7. Η μικροδιήθηση αποτελείται από ένα τύμπανο όπου ένα φίλτρο είναι εξωτερικά γύρω από το τύμπανο. Η σχηματική απεικόνιση της μικροδιήθησης που επιλέχθηκε από την εταιρία Hubert είναι η ακόλουθη:



Σχήμα 5.7: Φίλτρο περιστρεφόμενου τυμπάνου της Hubert^[170].

Τα τύμπανα μικροδιήθησης τοποθετούνται το ένα δίπλα στο άλλο στη μέση του φρεατίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8. Το νερό εισέρχεται στο φρεάτιο από τον πύργο πρόσληψης μέσω των σηράγγων, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 5.7.



Σχήμα 5.8: Βασικός σχεδιασμός εγκατάστασης προκατεργασίας.

5.8.4 Χαρακτηριστικά επιλεγμένης μεθόδου

Τα χαρακτηριστικά για ένα φίλτρο τυμπάνου της επιλεγμένης εταιρίας είναι:

- Χωρητικότητα: 0.41 m³/s
- Διάμετρος: 3 m
- Μήκος: 6 m
- Όγκος: 57.73 m³
- Περιοχή φιλτραρίσματος: 65.97 m²
- Ροή νερού: 0.0063 m³/m²s

- Απαιτούμενη επιφάνεια φιλτραρίσματος

Η απαιτούμενη επιφάνεια φιλτραρίσματος προκύπτει με διαίρεση του ρυθμού ροής και της ροής νερού μέσω του τυμπάνου:

$$A_{\text{γλυκού νερού}} = \frac{Q_{\text{γλυκού νερού}}}{J_{\text{τυμπάνου}}} = \frac{1}{0.0063} = 158,73 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{θαλασσινού νερού}} = \frac{Q_{\text{θαλασσινού νερού}}}{J_{\text{τυμπάνου}}} = \frac{1,9}{0.0063} = 301,58 \text{ m}^2$$

- Αριθμός τυμπάνων

Ο αριθμός τυμπάνων που απαιτούνται βρίσκεται από τη διαίρεση της συνολικής απαιτούμενης επιφάνειας φιλτραρίσματος προς την επιφάνεια φιλτραρίσματος κάθε τυμπάνου:

$$n_{\text{τυμπάνου, γλυκού}} = \frac{A_{\text{γλυκού νερού}}}{A_{\text{τυμπάνου}}} = \frac{158,73}{65,97} = 3$$

$$n_{\text{τυμπάνου, θαλασσινού}} = \frac{A_{\text{θαλασσινού νερού}}}{A_{\text{τυμπάνου}}} = \frac{301,58}{65,97} = 5$$

5.8.5 Κόστος κεφαλαίου προκατεργασίας

Το κόστος κεφαλαίου για κάθε μέθοδο προκατεργασίας μπορεί να υπολογισθεί βάσει της ακόλουθης εξίσωσης:

$$C_{\text{προκατεργασίας}} = c \cdot A \cdot Q \quad (5.3)$$

Το σύμβολο c παριστάνει τον συντελεστή κόστους της αντίστοιχης μεθόδου προκατεργασίας. Στην περίπτωση της μικροδιήθησης κυμαίνεται από 0.05 €/m^3 – 0.15 €/m^3 το χρόνο. Στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας επιλέχθηκε 0.10 €/m^3 . Το κόστος κεφαλαίου είναι τελικά:

$$C_{\text{προκατεργασίας, γλυκού}} = 15.873\text{€}$$

$$C_{\text{προκατεργασίας, θαλασσινού}} = 57.300\text{€}$$

Συνολικά το κόστος κεφαλαίου προκατεργασίας και για τα δύο διαλύματα είναι:

$$C_{\text{προκατεργασίας}} = 73.173\text{€}$$

Το κόστος κεφαλαίου όταν συμπεριλαμβάνεται το κόστος κατασκευής φθάνει τα 100.000€ .

5.8.6 Απώλεια ενέργειας

Ορισμένοι τύποι προκατεργασίας καταναλώνουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Η μέθοδος μικροδιήθησης απαιτεί ελάχιστη πίεση 0.3 bar . Για ύψος απωλειών 3 m που αντιστοιχεί σε πίεση 0.3 bar η ετήσια απώλεια ενέργειας της προκατεργασίας είναι:

$$E_{\text{απώλεια, προκατεργασίας}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot t \frac{\text{ώρες}}{\text{χρόνο}} \quad (5.4)$$

Για το γλυκό νερό:

$$E_{\text{απώλεια, γλυκού}} = 257,98 \text{ MWh}$$

Για το θαλασσινό νερό:

$$E_{\text{απώλεια, θαλασσινού}} = 501,43 \text{ MWh}$$

Η συνολική απώλεια ενέργειας ετησίως είναι:

$$E_{\text{απώλεια, προκατεργασίας}} = 759,41 \text{ MWh/χρόνο}$$

5.9 Στοιβα μεμβρανών

Στο τρίτο στάδιο της ωσμωτικής μονάδας PRO το γλυκό και το θαλασσινό νερό μεταφέρονται σε στοιβες μεμβρανών. Οι μεμβράνες είναι απαραίτητες για να διαχωρίσουν τη ροή του γλυκού από το θαλασσινό νερό, ώστε να μπορεί να παραχθεί ωσμωτική ενέργεια. Μια ωσμωτική μονάδα απαιτεί ένα συγκεκριμένο χώρο μεμβρανών, που εξαρτάται από τη χωρητικότητα της ωσμωτικής μονάδας και τη πυκνότητα ενέργειας των μεμβρανών. Για την εξοικονόμηση χώρου, οι μεμβράνες στοιβάζονται σε ενότητες. Αυτές οι ενότητες έχουν υψηλή πυκνότητα συσκευασίας, δηλαδή μεγάλη περιοχή μεμβράνης σε μικρό χώρο. Οι ενότητες με τη σειρά τους στοιβάζονται συμπαγώς, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.9.



Σχήμα 5.9: Στοιβες μεμβρανών. Ανάκτηση από ^[99].

Σε αυτή την ενότητα θα καθοριστεί ο απαιτούμενος αριθμός και διαστάσεις της στοιβας μεμβρανών, το κόστος κεφαλαίου και οι απώλειες ενέργειας.

5.9.1 Γενικά

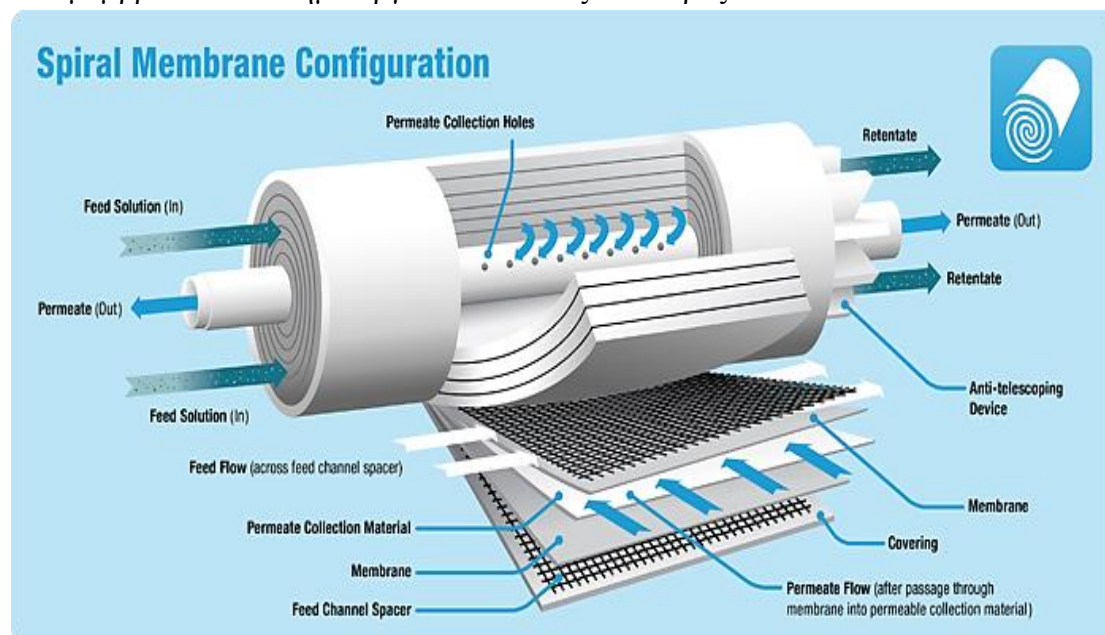
Η θεωρία για την ωσμωτική μεμβράνη έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 4.5.

5.9.2 Διατάξεις συστημάτων τοποθέτησης μεμβρανών

Οι μεμβράνες δια την διάταξή τους τοποθετούνται σε κελύφη (housings). Οι διαθέσιμες μορφές διάταξης είναι^[101,111]:

A) Σπειροειδούς περιέλιξης (spiral wounded), όπου δύο μεμβράνες τοποθετούνται σε επαφή με ένα πορώδες εύκαμπτο υλικό στήριξης, ώστε να δημιουργείται η διάταξη: μεμβράνη - υλικό στήριξης - μεμβράνη. Τα τρία αυτά στρώματα

στερεώνονται μαζί στην άκρη. Ένας διάτρητος σωλήνας παρεμβάλλεται μεταξύ των μεμβρανών, το συγκρότημα των μεμβρανών τυλίγεται πάνω σ' αυτόν τον σωλήνα μαζί με ένα κατάλληλο υλικό που χρησιμεύει στο να διαχωρίζει τις επιφάνειες των μεμβρανών και δημιουργείται έτσι ένας κύλινδρος.



Σχήμα 5.10: Μεμβράνη σπειροειδούς περιέλιξης. Ανάκτηση από [171].

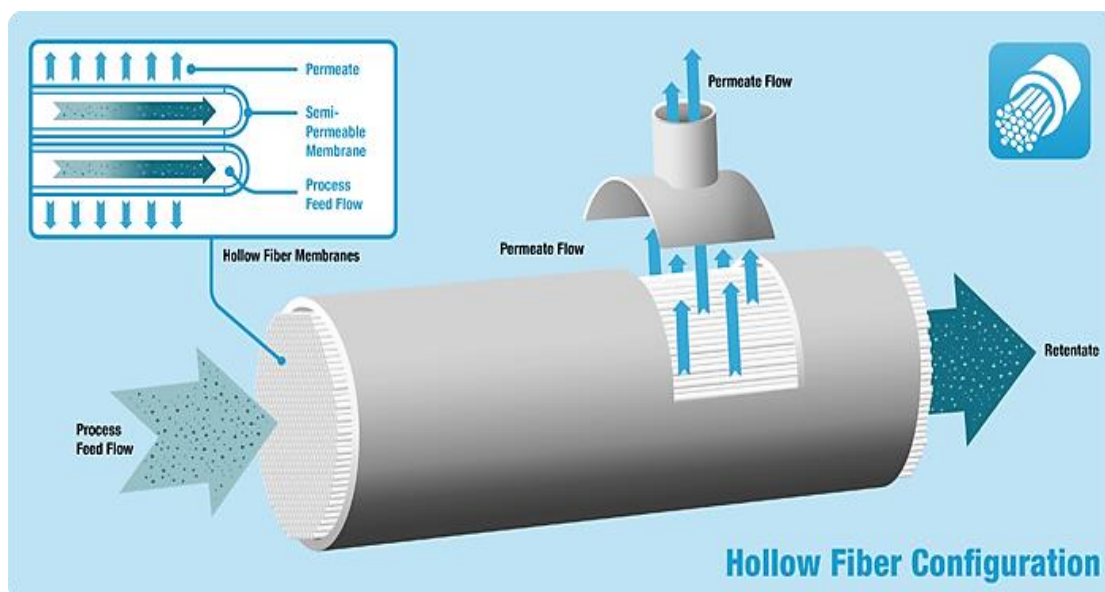
Ο κύλινδρος αυτός τροφοδοτείται μέσω της διόδου που έχει προβλεφθεί στο διαχωριστικό υλικό, ενώ το προϊόν ρέει σπειροειδώς προς τον κεντρικό σωλήνα, ο οποίος είναι προσκολλημένος στο τοίχωμα του δοχείου πίεσης. Η περίπτωση αυτή είναι κατάλληλη για επίτευξη μεγάλων επιφανειών μεμβράνης σε ορισμένο όγκο.

B) Κοίλων ινών (hollow fiber), όπου η μεμβράνη σχηματίζεται από τριχοειδής σωλήνες εσωτερικής μεμβράνη με διάμετρο ίνας μικρότερη από 500 μm και συνδέονται παράλληλα ενώ τοποθετούνται μέσα στο κέλυφος για να σχηματισθεί η διάταξη.

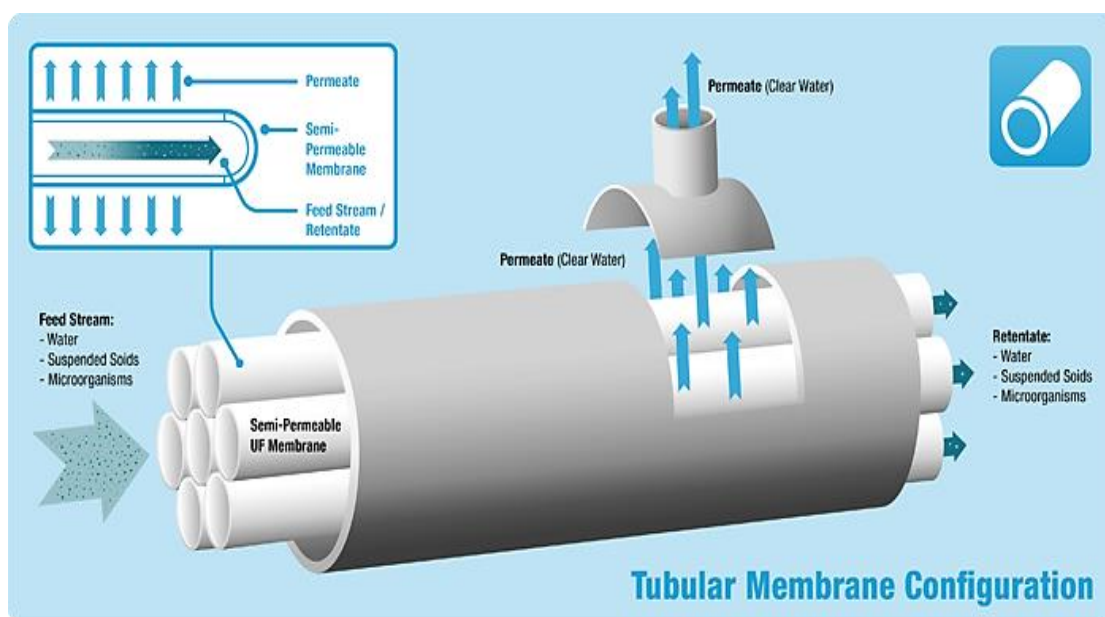
Κύριο χαρακτηριστικό είναι η αντοχή σε θερμοκρασίες και pH (pH 4÷11 έως 35°C) ενώ πλήττεται από το γεγονός ότι ρυπαίνεται εύκολα και καθαρίζεται δύσκολα λόγω της συμπαγής κατασκευής.

Γ) Σωληνωτή διάταξη (tubular), οι μεμβράνες έχουν σχήμα σωλήνα με διάμετρο 1-2,5cm. Τοποθετούνται σε σωλήνα από πορώδη υλικό (κεραμικό ή πολυεστερικό ή ανοξείδωτο χάλυβα) με αξονική τροφοδοσία και κάθετη έξοδο του διηθήματος.

Κύριο χαρακτηριστικό αυτής της περίπτωσης είναι η ανθεκτικότητα στη ρύπανση και η ευκολία στον καθαρισμό. Δυσχερύνεται από το γεγονός ότι έχει τις μικρότερες ανοχές θερμοκρασίας και pH. Οι περιοχές λειτουργίας της είναι pH 2÷8 μέχρι 15°C και pH 3÷6 μέχρι 30 °C.



Σχήμα 5.11: Μembrάνη κοίλων ινών. Ανάκτηση από ^[171].



Σχήμα 5.12: Μembrάνη σωληνωτής διάταξης. Ανάκτηση από ^[171].

5.9.3 Επιλογή διάταξη μεμβράνης

Το κύριο χαρακτηριστικό για την επιλογή της κατάλληλης διάταξης είναι η αντίσταση πίεσης, η ευαισθησία ρύπανσης, το κόστος και ο απαιτούμενος χώρος για κάθε περίπτωση. Ο τύπος μεμβράνης που είναι καταλληλότερος για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μεμβράνη σπειροειδούς περιέλιξης^[101]. Οι μεμβράνες σπειροειδούς περιέλιξης είναι ανθεκτικές σε υψηλές πιέσεις και είναι λιγότερο ευαίσθητες σε μολύνσεις συγκριτικά με τους άλλους τύπους.

5.9.4 Βασικός σχεδιασμός

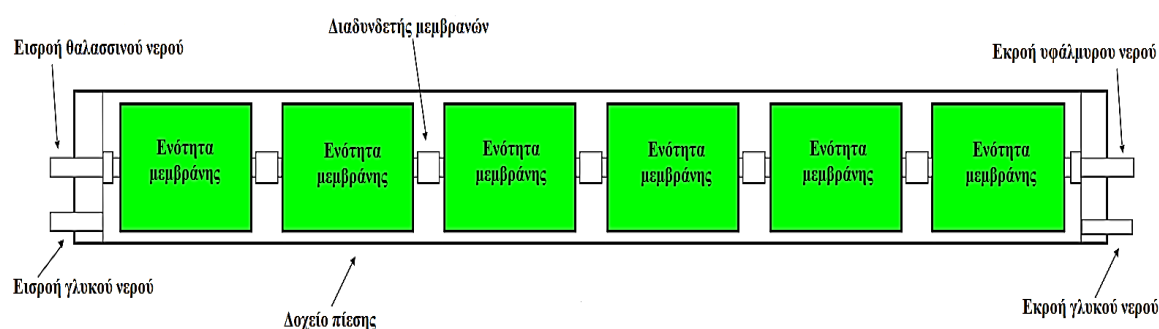
Για την εξοικονόμηση χώρου οι μεμβράνες συσκευάζονται σε ενότητες. Αυτές οι ενότητες έχουν υψηλής πυκνότητα συσκευασίας, δηλαδή μεγάλη περιοχή μεμβράνης σε μικρό χώρο. Μια μεμβράνη σπειροειδούς περιέλιξης έχει διάμετρο $d=20\text{cm}$ και μήκος $L=100\text{cm}^{[10]}$. Η πυκνότητα συσκευασίας των μεμβρανών σπειροειδούς περιέλιξης είναι $300 - 1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Η τιμή που επιλέχθηκε στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας είναι $p_d=775 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Η πυκνότητα συσκευασίας επηρεάζεται από την ποιότητα νερού και τη μέθοδο προκατεργασίας που θα χρησιμοποιηθεί.

Τέσσερις έως έξι ενότητες μεμβράνης σπειροειδούς περιέλιξης μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα δοχείο πίεσης ^[U]. Στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας επιλέχθηκαν 6 ενότητες μεμβράνης σε σειρά ανά δοχείο πίεσης. Στο σχήμα 5.13 απεικονίζεται μια ενότητα μεμβράνης σπειροειδούς περιέλιξης.



Σχήμα 5.13: Ενότητα μεμβράνης σπειροειδούς περιέλιξης.

Η σχηματική απεικόνιση των 6 ενοτήτων που θα τοποθετηθούν σε σειρά είναι όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.14.

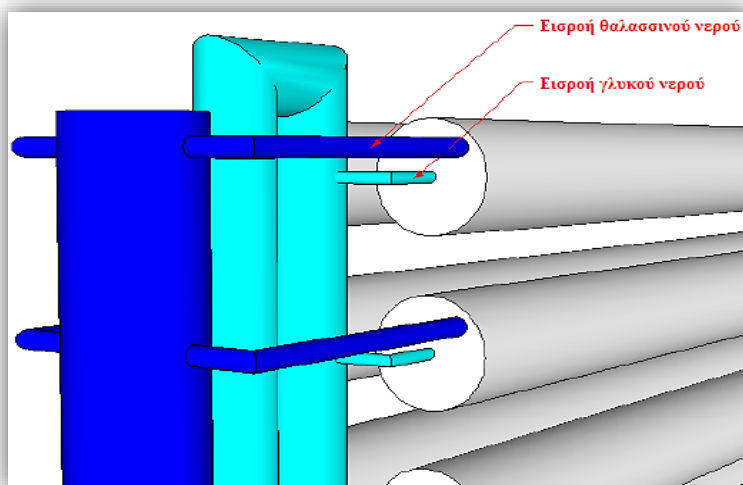


Σχήμα 5.14: Απεικόνιση έξι ενοτήτων μεμβρανών σε δοχείο πίεσης.

Το γλυκό και το θαλασσινό νερό εισέρχονται στο δοχείο πίεσης όπως φαίνεται στο σχήμα 5.14. Το γλυκό νερό οδηγείται με ατμοσφαιρική πίεση στο δοχείο πίεσης όμως το θαλασσινό νερό πρέπει να έχει μεγαλύτερη πίεση για να μπορέσει να ρέει μέσα στο δοχείο πίεσης, κάτι που επιτυγχάνεται με τους εναλλάκτες πίεσης.

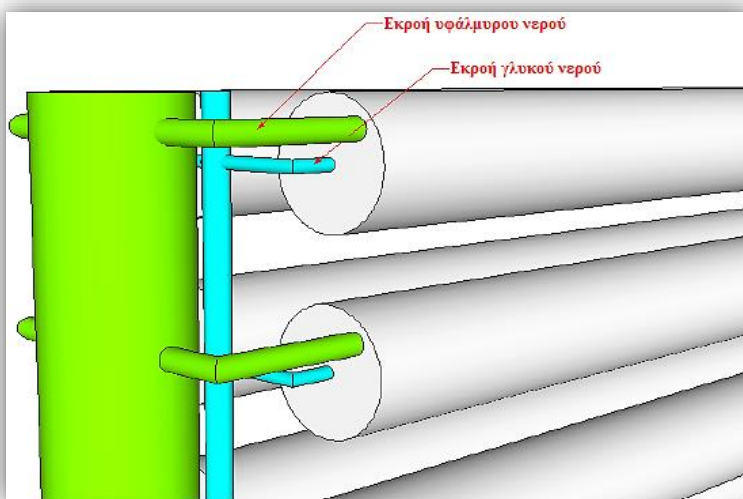
Τα δυο αυτά διαλύματα ρέουν κατά μήκος των ενοτήτων που βρίσκονται μέσα στο δοχείο πίεσης, με το γλυκό νερό να διαπερνά την ημι-διαπερατή μεμβράνη και να καταλήγει στη πλευρά του θαλασσινού νερού. Τα επιπλέον μόρια νερού που

πέρασαν στη πλευρά του θαλασσινού νερού θα αυξήσουν την πίεση. Η εισροή του γλυκού και του θαλασσινού νερού στο δοχείο πίεσης εικονίζεται στο σχήμα 5.15.



Σχήμα 5.15: Εισροή του γλυκού και του θαλασσινού νερού στο δοχείο πίεσης.

Το αποτέλεσμα αυτής της ανάμιξης είναι το υφάλμυρο νερό που εξέρχεται στο άλλο άκρο του δοχείου πίεσης, σχήμα 5.16 Το γλυκό νερό που εισέρχεται στο δοχείο πίεσης αλλά δεν περνάει μέσω της ημι-διαπερατής μεμβράνης προς τη πλευρά του θαλασσινού νερού εξέρχεται από το δοχείο πίεσης και επιστρέφει με τη βαρύτητα πίσω στο φρεάτιο του γλυκού νερού ώστε να ξαναχρησιμοποιηθεί.

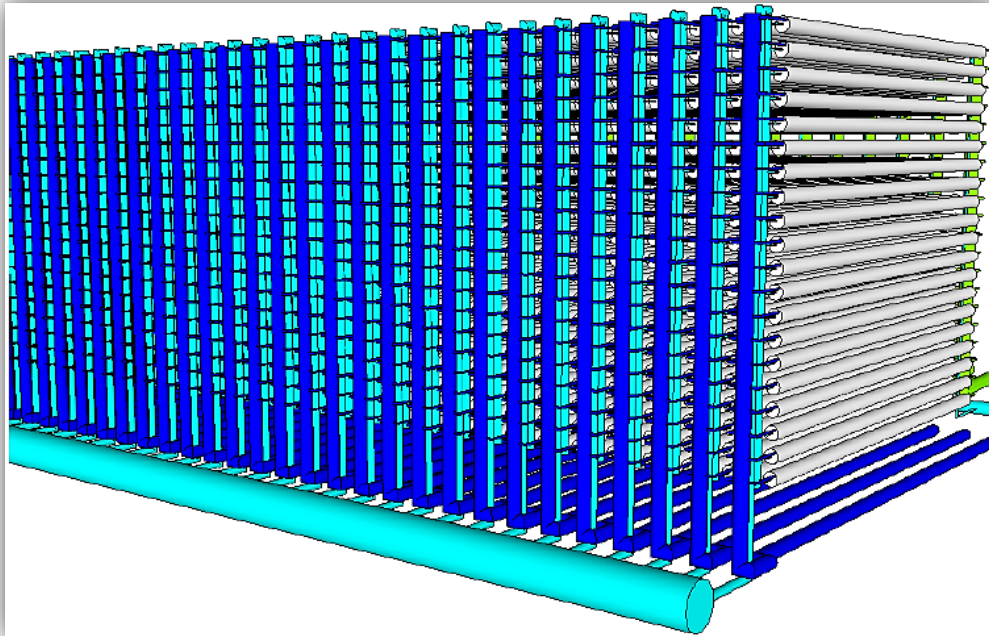


Σχήμα 5.16: Εκροή του υφάλμυρου και του γλυκού νερού.

Η πίεση του υφάλμυρου νερού μπορεί να μειωθεί σε δύο μέρη. Περίπου το 1/3 της πίεσης θα περιστρέψει τον στρόβιλο, όπου και θα παραχθεί ενέργεια επειδή ο στρόβιλος με τη σειρά του θα περιστρέψει μια γεννήτρια. Τα υπόλοιπα 2/3 της πίεσης θα εκτονωθούν στους εναλλάκτες πίεσης για την πίεση του εισερχόμενου θαλασσινού

νερού. Το υφάλμυρο νερό αφού θα έχει πλέον μηδενική πίεση θα αποβληθεί από τη μονάδα πίσω στη θάλασσα με τη βαρύτητα.

Τα δοχεία πίεσης ομαδοποιούνται σε στοίβες μεμβράνης. Ένα μέρος στοίβας μεμβράνης απεικονίζεται στο σχήμα 5.17.



Σχήμα 5.17: Σχηματισμός στοίβας μεμβράνης.

5.9.5 Χαρακτηριστικά στοίβας μεμβράνης

- Ροή νερού

Η ροή νερού για 35 g/l συγκέντρωσης άλατος για το θαλασσινό νερό και 0 g/l συγκέντρωσης άλατος για το γλυκό νερό, έχει μέγιστη πυκνότητα ισχύος για υδραυλική πίεση 1280 kPa^[110].

- Πυκνότητα ενέργειας

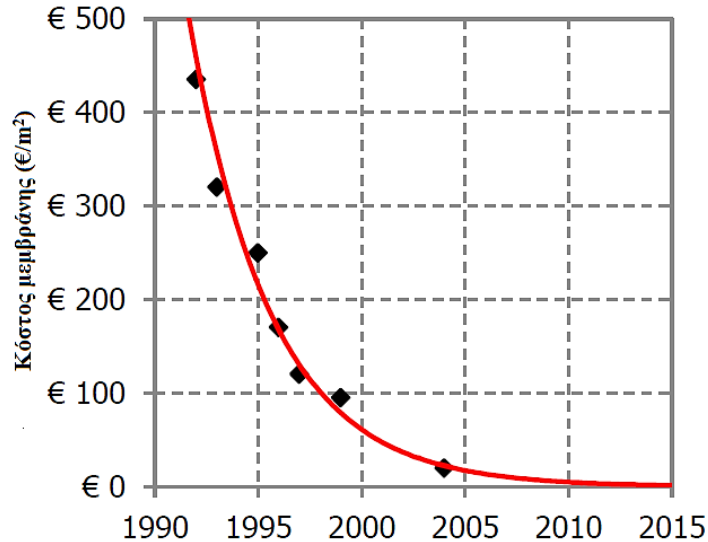
Στα πλαίσια της πτυχιακής επιλέγεται η τιμή των 2.9 W/m²^[110]. Η τιμή είναι μικρότερη από την ελάχιστη τιμή των 5 W/m² που απαιτείται σύμφωνα με τη βιβλιογραφία για να είναι οικονομικά συμφέρουσα η μονάδα PRO. Στο κεφάλαιο 7 θα ερευνηθεί η επίδραση της πυκνότητας ισχύος στο συνολικό κόστος όταν είναι 2.9 W/m² και 5 W/m².

- Εκροή γλυκού νερού

Το ποσοστό του γλυκού νερού που θα αποβληθεί από το δοχείο πίεσης επειδή δεν πέρασε μέσω της μεμβράνης προς τη πλευρά του θαλασσινού νερού είναι 10%.

ο Κόστος μεμβράνης

Η τρέχουσα τιμή μεμβράνης είναι στα 5€/m². Η τιμή περιλαμβάνει και το δοχείο πίεσης. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία το κόστος αναμένεται να μειωθεί σε 2€/m² στα επόμενα χρόνια^[172].



Διάγραμμα 5.6: Κόστος μεμβράνης με τη πάροδο του χρόνου. Ανάκτηση από ^[172].

Στα πλαίσια της πτυχιακής επιλέγεται το κόστος να είναι 5 €/m². Στο κεφάλαιο 7 θα ερευνηθεί η επίδραση του κόστους της μεμβράνης στο συνολικό κόστος όταν είναι 5 €/m² και 2 €/m².

ο Διαστασιολόγηση

Επιφάνεια μεμβράνης

Η επιφάνεια της μεμβράνης που θα χρειαστεί για την ωσμωτική μονάδα PRO 1 MW εξαρτάται από τη χωρητικότητα της μονάδας και από τη πυκνότητα ισχύος:

$$A_{\text{μεμβράνης}} = \frac{P_{\text{μονάδας}}}{W} = \frac{1 \cdot 10^6 \text{ W}}{2.9 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} = 344827,586 \text{ m}^2$$

Ποσότητα ενοτήτων μεμβράνης

Η ποσότητα ενοτήτων μεμβράνης που απαιτούνται εξαρτάται από την επιφάνεια των μεμβρανών, τον όγκο μιας ενότητας και την πυκνότητα συσκευασίας:

$$n_{\text{ενοτήτων}} = \frac{A_{\text{μεμβράνης}}}{p_d \cdot V_{\text{ενότητας}}} \quad (5.5)$$

Ο όγκος της ενότητας υπολογίζεται όπως ένας όγκος κυλίνδρου, εξαρτάται δηλαδή από το μήκος και τη διάμετρο της ενότητας:

$$V_{\text{ενότητας}} = \pi r^2 h = \pi \cdot (0.1)^2 \cdot 1 = 0,03142 \text{ m}^3$$

Η ποσότητα των ενότητων που απαιτούνται είναι:

$$n_{\text{ενότητων}} = \frac{A_{\text{μεμβράνης}}}{p_d \cdot V_{\text{ενότητας}}} = \frac{344827,586}{775 \cdot 0,03142} = 14161,00638$$

Επομένως θα χρησιμοποιηθούν 14.162 ενότητες.

Ποσότητα δοχείων πίεσης

Με τη παραδοχή ότι 6 ενότητες μεμβράνης θα τοποθετηθούν σε κάθε δοχείο πίεσης, κεφάλαιο 4.#, ο απαιτούμενος αριθμός δοχείων πίεσης είναι:

$$n_{\text{δοχείο_πίεσης}} = \frac{n_{\text{ενότητων}}}{6} = \frac{14162}{6} = 2360,3$$

Επομένως θα χρησιμοποιηθούν 2361 δοχεία πίεσης.

Ποσότητα στοιβών μεμβράνης

Κάθε στοιβα μεμβράνης μπορεί να περιέχει έως 6.120 δοχεία πίεσης, 20 στην κατακόρυφη διάταξη και 306 στην οριζόντια διάταξη.[3A41] Επομένως, στην περίπτωση της ωσμωτικής μονάδας PRO 1MW θα χρησιμοποιηθεί μια 1 στοιβα μεμβρανών με 20 δοχεία πίεσης στην κατακόρυφη διάταξη και 118 στην οριζόντια διάταξη. Το ύψος της στοιβάς είναι 6 m και το μήκος 37 m.

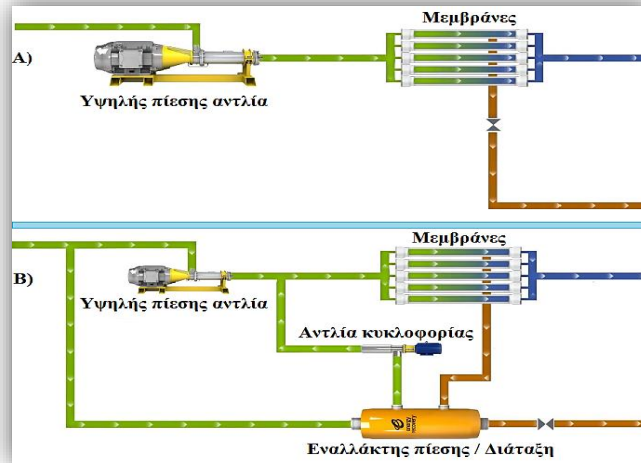
5.9.6 Κόστος κεφαλαίου

Το κόστος κεφαλαίου της στοιβάς μεμβράνης εξαρτάται από την απαιτούμενη επιφάνεια μεμβράνης και το κόστος της μεμβράνης:

$$C_{\text{στοίβα_μεμβράνης}} = A_{\text{μεμβράνης}} \cdot C_{\text{€/m}^2} = 344827,586 \cdot 5 = 1.724.137,93\text{€}$$

5.10 Εναλλάκτης πίεσης

Το θαλασσινό νερό για να εισέλθει μέσα στη στοιβα μεμβρανών πρέπει να έχει πίεση 13bar. Μια λύση είναι η χρήση αντλιών οι οποίες όμως θα καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας για να μπορέσει να επιτευχθεί η πίεση. Η βέλτιστη λύση είναι η χρήση εναλλακτών πίεσης (pressure exchangers) όπου επιτυγχάνεται 60% εξοικονόμηση ενέργειας και η αντλία για την πρόσληψη του θαλασσινού νερού καταναλώνει λιγότερη ενέργεια. Και οι δύο περιπτώσεις εικονίζονται στο σχήμα 5.19:



Σχήμα 5.18: Στην Α) περίπτωση είναι ανοιχτού κύκλου λειτουργία χωρίς εναλλάκτη πίεσης. Στην Β) περίπτωση είναι κλειστού κύκλου λειτουργία με εναλλάκτη πίεσης.

5.10.1 Γενικά

Η ανάλυση της λειτουργίας του εναλλάκτη πίεσης έχει γίνει στο κεφάλαιο 4.6.

5.10.2. Εφαρμογή εναλλακτών πίεσης σε μονάδα PRO

Σε σύστημα PRO οι εναλλάκτες πίεσης χρησιμοποιούνται ως συσκευές ανάκτησης ενέργειας (ERDs, Energy Recovery Devices). Τα 2/3 του υφάλμυρου νερού που εξέρχονται από τη στοιβία μεμβρανών οδηγούνται σε εναλλάκτες πίεσης, το υπόλοιπο 1/3 αποσυμπιέζεται περιστρέφοντας υδροστρόβιλο και αυτός με τη σειρά του γεννήτρια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο εναλλάκτης πίεσης χρησιμοποιεί την υψηλή πίεση του υφάλμυρου νερού για να αυξήσει την χαμηλή πίεση του εισερχόμενου στη μονάδα θαλασσινού νερού. Οι εκροές του εναλλάκτη πίεσης είναι το θαλασσινό νερό με υψηλή πλέον πίεση που οδηγείται μέσω αντλίας κυκλοφορίας στη στοιβία μεμβρανών και το χαμηλής πλέον πίεσης υφάλμυρο νερό αποβάλλεται από τη μονάδα μέσω της βαρύτητας.

Επειδή ο εναλλάκτης πίεσης δεν δημιουργεί πίεση δεν είναι έτσι δυνατόν όλη η ποσότητα του εισερχόμενου θαλασσινού νερού να περάσει μέσα από τον εναλλάκτη πίεσης. Μεταφέρει την πίεση από ένα υγρό σε ένα άλλο, στην προκειμένη περίπτωση από το υφάλμυρο νερό προς το εισερχόμενο στη μονάδα θαλασσινό νερό. Η υψηλής πίεσης αντλία νερού απαιτείται και στην περίπτωση χρήσης εναλλακτών πίεσης ώστε να δημιουργήσει αρκετή πίεση για να ξεπεράσει την ωσμωτική πίεση του θαλασσινού νερού. Η αντλία κυκλοφορίας χρησιμοποιείται για τη κυκλοφορία του νερού και όχι για περαιτέρω αύξηση της πίεσης.

5.10.3 Χαρακτηριστικά των εναλλακτών πίεσης

Οι εναλλάκτες πίεσης εξοικονομούν ενέργεια και μειώνουν το φορτίο των αντλιών του θαλασσινού νερού. Η σύνδεση τους γίνεται παράλληλα στην παροχή του

νερού. Σε ένα σύστημα PRO που λειτουργεί με 40% ανάκτηση πίεσης νερού, ο εναλλάκτης πίεσης παρέχει το 60% της τροφοδοσίας της μεμβράνης. Ενέργεια καταναλώνεται από την αντλία κυκλοφορίας, αλλά η αντλία απλώς κυκλοφορεί το θαλασσινό νερό και δεν αυξάνει την πίεση, οπότε οι απώλειες ενέργειας για τη λειτουργία της αντλίας κυκλοφορίας είναι αμελητέες, όπου λιγότερο από 3% της ενέργειας καταναλώνεται από την υψηλής πίεσης αντλία. Το 60% της τροφοδοσίας της μεμβράνης αυξάνει την πίεση χωρίς σχεδόν καθόλου κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, δεν απαιτούν συντήρηση και η διάρκεια ζωής τους είναι στα 25 χρόνια.

Ο εναλλάκτης πίεσης στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας επιλέχθηκε από την εταιρία **Energy Recovery Inc. (ERI)**^[173] όπου διαθέτει δύο μοντέλα, το PX-Q Series και το PX-S Series, όπως φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 5.19: Απεικόνιση των εναλλακτών πίεσης, A)PX-Q Series, B)PX-S Series.

Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι:

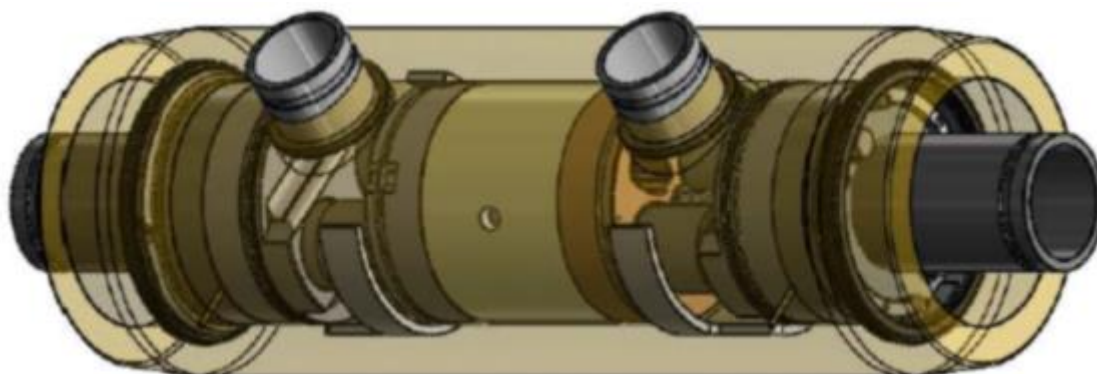
PX-Q Series	PX-S Series
Απόδοση 97,2%	Απόδοση 96,8%
Χαμηλό κόστος κύκλου ζωής	Κατάλληλο για μεγάλες παροχές
Χαμηλό θόρυβο	

Πίνακας 5.5: Τα κύρια χαρακτηριστικά των δύο εναλλακτών πίεσης. Πηγή^[173].

Στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας θα επιλεγθεί η κατηγορία PX-Q Series (μοντέλο PX-Q300) όπως προτάθηκε μετά από συνέντευξη με την εταιρία. Στα Παραρτήματα της πτυχιακής εργασίας αναλύονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά όπως τα παρείχε η εταιρία.

5.10.4 Βασικός σχεδιασμός

Τα μέρη που αποτελείται ένας εναλλάκτης πίεσης αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 4.6.2. Η τομή της σειράς PX-Q Series απεικονίζεται στο σχήμα 5.21. Οι διαστάσεις είναι 102 x 22,6 x 22,2 cm. Στα Παραρτήματα της πτυχιακής εργασίας αναλύονται πλήρως τα μέρη που συνθέτουν τον εναλλάκτη PX-Q.



Σχήμα 5.20: Τομή εναλλάκτη πίεσης PX-Q Series.

Οι εναλλάκτες πίεσης τοποθετούνται παράλληλα ανάμεσα στο εξερχόμενο από το τη στείβα μεμβρανών υφάλμυρο νερό και στο εισερχόμενο στη μονάδα θαλασσινό νερό.

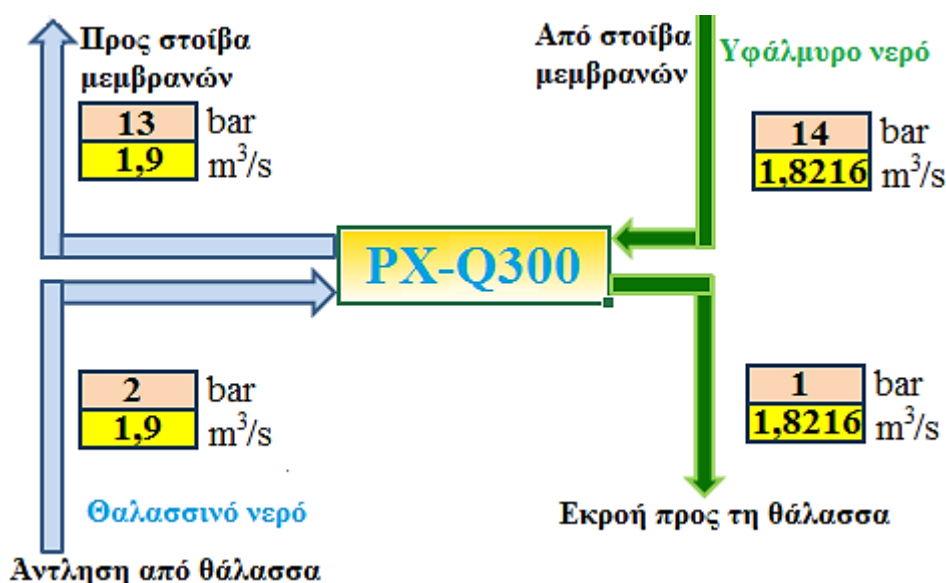


Σχήμα 5.21: Τοποθέτηση εναλλακτών πίεσης ανάμεσα στον σωλήνα υφάλμυρου νερού και στον σωλήνα θαλασσινού νερού.

5.10.5 Διαστασιολόγηση

Το μοντέλο PX-Q300 της κατηγορίας PX-Q Series που επιλέχθηκε στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας έχει μέγιστη ροή νερού έως 0.01811 m³/s ανά διάταξη, με απόδοση 94%^[174].

Το διάγραμμα ροής της ωσμωτικής μονάδας PRO 1MW είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 5.22: Διάγραμμα ροής προς του εναλλάκτης πίεσης στην ωσμωτική μονάδα PRO 1MW.

- ο Αριθμός εναλλακτών πίεσης

Ο αριθμός εναλλακτών πίεσης που θα χρησιμοποιηθούν είναι^[N39]:

$$n_{PX-300} = \frac{\text{Ροή υφάλμυρου νερού}}{\text{Μέγιστη ροή εναλλάκτη}} = \frac{1,8216}{0,01811} = 100$$

- ο Διάταξη

Η διάταξη για λόγους κεφαλαιουχικών δαπανών (συντήρηση ή μελλοντική αναβάθμιση) θα προτιμηθεί σε 5 ενότητες με 20 εναλλάκτες πίεσης έκαστως.

5.10.6 Κόστος κεφαλαίου

Το κόστος κεφαλαίου του κάθε εναλλάκτη πίεσης PX-Q300 είναι 18.000€^[174]. Για 100 εναλλάκτες πίεσης που απαιτούνται για την ωσμωτική μονάδα PRO το κόστος είναι 1.800.000€.

5.11 Αντλία, υδροστρόβιλος, γεννήτρια και σωληνώσεις

Το θαλασσινό και το γλυκό νερό πρέπει να μεταφερθούν από το φρεάτιο μέχρι τη στοιβία μεμβρανών. Αυτό επιτυγχάνεται με αντλίες που θα μεταφέρουν το νερό μέσα από σωλήνες. Οι σωλήνες φθάνουν μέχρι το σημείο της στοιβίας μεμβρανών όπου το θαλασσινό νερό αυξάνει με τη διαδικασία της ώσμωσης την πίεση του. Η πίεση αυτή εκτονώνεται σε υδροστρόβιλο ο οποίος με τη σειρά του περιστρέφει μια γεννήτρια ώστε να μετατρέπει αυτή η πίεση σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε αυτή την ενότητα θα καθοριστούν οι διαστάσεις, το κόστος κεφαλαίου και η κατανάλωση ενέργειας των αντλιών, των σωληνών, του υδροστρόβιλου και της γεννήτριας.

5.11.1 Γενικά

Η μεταφορά του νερού έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 4.3, ενώ οι αντλίες, υδροστρόβιλος, γεννήτρια και σωληνώσεις στο κεφάλαιο 4.7.

5.11.2 Αντλία

Όλοι οι διαθέσιμοι τύποι αντλιών χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στις φυγόκεντρες και στις θετικής εκτόπισης όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.7.1.3.

Οι αντλίες της ωσμωτικής μονάδας PRO θα πρέπει να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες νερού σε μεγάλες αποστάσεις. Η αντλία που πληρεί τις δυο αυτές απαιτήσεις είναι η φυγόκεντρη αντλία. Αυτός ο τύπος θα χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας. Θα χρησιμοποιηθούν 2 αντλίες, μια αντλία για άντληση θαλασσινού νερού και μια αντλία για το γλυκό νερό

5.11.2.1 Απόδοση αντλίας

Η απόδοση της αντλίας ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος που επιβάλλεται στο ρευστό από την αντλία προς τη δύναμη να περιστραφεί η αντλία, δηλαδή^[85]:

$$\eta = \frac{\text{καθαρή ισχύς αντλίας}}{\text{ισχύς στον άξονα της μηχανής}} \quad (5.6)$$

Στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας η απόδοση είναι ίση με 0.68.

5.11.3 Υδροστρόβιλος

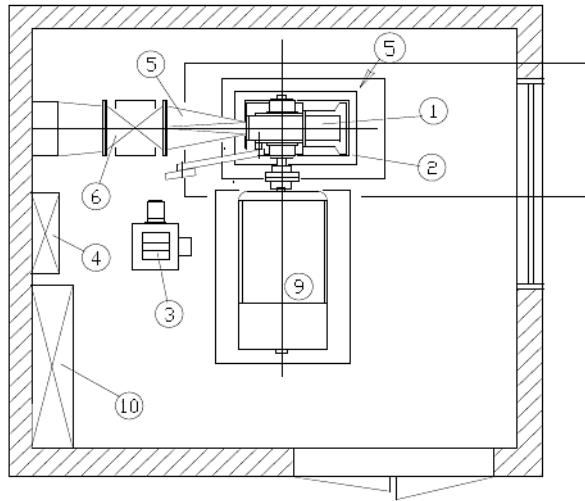
Υπάρχουν αρκετοί τύποι υδροστρόβιλων διαθέσιμοι στο εμπόριο για μεγάλης κλίμακας παραγωγή ενέργειας. Όλοι οι τύποι κατηγοριοποιούνται σε δύο είδη ως προς τον τρόπο μετατροπής της ενέργειας όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 4.7.2.2.

Ο υδροστρόβιλος θα πρέπει να είναι σε θέση να μετατρέπει το υπό πίεση υφάλμυρο νερό (που εξέρχεται από τη στοιβία μεμβρανών) σε κινητική ενέργεια στη γεννήτρια και αυτή με τη σειρά της σε ηλεκτρική ενέργεια. Καθώς μετατρέπεται σε

ηλεκτρική ενέργεια η πίεση του υφάλμυρου μειώνεται. Ο πιο κατάλληλος υδροστρόβιλος, βάσει των κριτηρίων που αναλύθηκαν είναι ο υδροστρόβιλος Ossberger, της εταιρίας Ossberger GmbH + Co^[175].

Scope of Delivery:

- ① OSSBERGER Turbine
- ② Base frame
- ③ Governor (hydraulic)
- ④ Governor (electric)
- ⑤ Reducer / Draft tube
- ⑥ Sluice Valve
- ⑨ Generator
- ⑩ Power switchboard



Σχήμα 5.23: Κάτοψη του υδροστρόβιλου Ossberger. Πηγή^[176].

Η ισχύς στην έξοδο θα είναι 1,18MW με απόδοση του υδροστρόβιλου στα 0.9, βάσει των χαρακτηριστικών που παρείχε η εταιρία και κόστος 550.000€^[176].

5.11.4 Γεννήτρια

Συνδεδεμένη στον άξονα του υδροστρόβιλου βρίσκεται μια γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος, την οποία θέτει σε κίνηση ο υδροστρόβιλος. Με τον τρόπο αυτό η κινητική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα. Η ανάλυση της γεννήτριας αναφέρεται στο κεφάλαιο 4.7.3. Η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας θα είναι 600rpm.

5.11.4.1 Απόδοση υδροστρόβιλου και γεννήτριας

Η απόδοση του συνδυασμένου υδροστρόβιλου και γεννήτριας είναι η αναλογία της πραγματικής παραγόμενης ωσμωτικής ενέργειας προς την αναμενόμενη παραγόμενη ωσμωτική ενέργεια. Στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας η απόδοση είναι ίση με 0.85.

5.11.5 Σωληνώσεις

Η ανάλυση του κάθε αγωγού νερού έγινε στο κεφάλαιο 4.7.4.

5.11.5.1 Διαστασιολόγηση σωληνώσεων

Οι υπολογισμοί έγιναν για ωσμωτική μονάδα PRO 1MW. Οι τρεις κατηγορίες νερού είναι το γλυκό νερό, το θαλασσινό νερό και το υφάλμυρο νερό.

Α) Σωλήνες γλυκού νερού

Το γλυκό νερό θα μεταφερθεί από το φρεάτιο προς τη στοίβα μεμβρανών από τη μια πλευρά της μεμβράνης. Κατά τη μεταφορά, η ροή του γλυκού χωρίζεται σε έναν αριθμό σωλήνων. Ο σωλήνας που μεταφέρει το γλυκό νερό από το φρεάτιο μέχρι τη στοίβα μεμβρανών είναι ο πρωταρχικός σωλήνας γλυκού νερού. Όταν η ροή του γλυκού νερού φτάσει τη στοίβα μεμβρανών τότε η ροή θα ρέει κάθετα σε σωλήνες γλυκού νερού (δεύτερος σωλήνας). Το γλυκό νερό που εξέρχεται από τη στοίβα μεμβρανών έχει ροή 10% της αρχικής οπότε και οι σωλήνες θα είναι ανάλογα μικρότεροι (τρίτος σωλήνας).

Β) Σωλήνες θαλασσινού νερού

Το θαλασσινό νερό θα μεταφερθεί από το φρεάτιο θαλασσινού νερού προς τη στοίβα μεμβρανών από την άλλη πλευρά της μεμβράνης. Το θαλασσινό νερό θα περάσει αρχικά από τους εναλλάκτες πίεσης όπου και θα αυξηθεί η πίεση του πριν οδηγηθεί στη στοίβα μεμβρανών. Όταν η ροή του θαλασσινού νερού φτάσει στη στοίβα μεμβρανών τότε η ροή θα χωριστεί σε σωλήνες (δεύτερος σωλήνας) ώστε να εισέλθει στη στοίβα μεμβρανών.

Γ) Υφάλμυρο νερό

Το αποτέλεσμα της ανάμιξης του γλυκού με το θαλασσινό νερό είναι το υφάλμυρο νερό. Το υφάλμυρο νερό εξέρχεται από τα δοχεία πίεσης σε σωλήνες οι οποίοι χωρίζονται δύο σωλήνες (πρωταρχικός σωλήνας). Τα 2/3 της ροή του υφάλμυρου νερού πηγαινούν στον εναλλάκτη πίεσης ώστε να μεταφερθεί η πίεση του υφάλμυρου νερού στο εισερχόμενο θαλασσινό νερό με χαμηλότερη πίεση. Το 1/3 της ροής καταλήγει σε υδροστρόβιλο για να εκτονώσει την πίεση του. Μετά την εκτόνωση της πίεσης του υφάλμυρου νερού στον εναλλάκτη πίεσης και στον υδροστρόβιλο οι δυο σωλήνες ενώνονται και οδηγούνται στη θάλασσα με τη βαρύτητα (δεύτερος σωλήνας).

Και για τις τρεις περιπτώσεις η διατομή των σωληνώσεων είναι:

Είδος	Πρωταρχικός	Δεύτερος	Τρίτος
Γλυκό νερό	850 mm	110 mm	17 mm
Θαλασσινό νερό	1400 mm	180 mm	-
Υφάλμυρο νερό	1200 mm (έως εναλλάκτη πίεσης)	180 mm	-
	850 mm (έως τουρμπίνα)		

Πίνακας 5.6: Οι απαιτούμενες διαμέτροι σωληνώσεων. Πηγή^[169].

Το κόστος κεφαλαίου των σωληνώσεων θα υπολογισθεί ως εξής^[169]:

$$C_{\text{σωληνώσεων}} = 500 \cdot d \cdot L \quad (5.7)$$

Όπου d (σε m) η διάμετρος των σωληνώσεων και L (σε m) το μήκος των σωληνώσεων.

5.11.6 Κόστος κεφαλαίου

Το κόστος κεφαλαίου είναι 1.500.00€. Στο κόστος συμπεριλαμβάνονται οι αντλίες, ο υδροστρόβιλος, η γεννήτρια, οι σωληνώσεις και το κόστος εγκατάστασης.

Απώλεια ενέργειας

Μεταφορά νερού

Το γλυκό και το θαλασσινό νερό μεταφέρεται από το αντίστοιχο φρεάτιο στη στοιβα μεμβρανών. Η μεταφορά απαιτεί ενέργεια. Το σύνολο της κατανάλωσης ενέργειας εξαρτάται από το απαιτούμενο ύψος και καθορίζεται από την εξίσωση^[4A31]:

$$E_{αντλίας} = \frac{\Delta H \cdot Q \cdot \rho \cdot g}{\eta_{αντλίας}} \cdot t_{ώρες/χρόνο} = 3.7GWh/χρόνο$$

Οι απώλειες του υδροστρόβιλου και γεννήτριας είναι ίση με^[169]:

$$E_{υδρ,γενν} = 1.3GWh/χρόνο$$

5.12 Σύνδεση στο δίκτυο

Η ωσμωτική μονάδα PRO 1MW θα συνδεθεί σε μέση τάση με κατασκευή υποσταθμού. Ο εξοπλισμός του υποσταθμού πρέπει να είναι σύμφωνος τουλάχιστον με τα ακόλουθα διεθνή πρότυπα:

IEC 62271-200	AC metal-enclosed switchgear and control gear for rated voltages above 1kV and up to and including 54kV (old IEC Number: 60298)
IEC 62271-103/104	MV switches (old IEC Number: 60265)
IEC 62271-102	AC disconnectors and earthing switches (old IEC Number: 60129)
IEC 62271-001	Common clauses for MV switchgear and control gear (old IEC Number: 60694)
IEC 62271-105	MV AC switch-fuse combinations (old IEC Number: 60420)
IEC 62271-100	MV AC circuit breakers (old IEC Number: 60056)

Τα γενικά χαρακτηριστικά τους είναι:

Ονομαστική τάση	24 kV
Τάση λειτουργίας	20 kV
Ονομαστική συχνότητα	50 Hz
Ονομαστική τάση αντοχής σε βιομηχανική συχνότητα (1min)	50 kV
Ονομαστική αντοχή κρουστικής τάσης	125 kV
Ονομαστική αντοχή ρεύματος βραχυκύκλωσης	12,5 Ka/1s, 31kA peak
Ονομαστική ένταση κύριων ζυγών (40°C)	630 A
Περιοχή θερμοκρασίας λειτουργίας	-5 έως +40 °C

Σχετική υγρασία εγκατάστασης	95%
Υψόμετρο εγκατάστασης	Μέγιστο 1000 m
Βαθμός προστασίας έναντι επαφής εξωτερικού περιβλήματος	IP 3X
Εσωτερικός βαθμός προστασίας έναντι επαφής	IP 2X
Βοηθητική τάση ελέγχου & σημάτων	230 V AC

5.12.1 Κόστος κεφαλαίου

Το κόστος κεφαλαίου ανέρχεται στο ποσό των 400.000€. Στο κόστος συμπεριλαμβάνεται και το κόστος σύνδεσης (περίπου 50.000€).

5.13 Καθαρή παραγόμενη ενέργεια

Η καθαρή παραγόμενη ενέργεια για ωσμωτική μονάδα PRO 1 MW δίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

Αρχική παραγόμενη ενέργεια ($E_{αρχική}$), κεφ.5.4	10 GWh/χρόνο	100%
Κατανάλωση ενέργειας προκατεργασίας	-0.7 GWh/χρόνο	6.9%
Μεταφορά γλυκού και θαλασσινού νερού	-3.7 GWh/χρόνο	36.6%
Απώλειες υδροστρόβιλου, γεννήτριας	-1.3 GWh/χρόνο	12.8%
Καθαρή παραγόμενη ενέργεια	4.4 GWh/χρόνο	43,7%

Πίνακας 5.7: Η καθαρή παραγόμενη ενέργεια ωσμωτικής μονάδας 1 MW.

Η καθαρή παραγόμενη ενέργεια ωσμωτικής μονάδας 1 MW είναι ίση με 4,4 GWh/χρόνο. Αυτό αντιστοιχεί σε 43,7% της αρχικής παραγόμενης ενέργειας. Η παραγόμενη ενέργεια είναι αρκετή για να τροφοδοτήσει πάνω από 1.200 σπίτια, με ένα μέσο Ευρωπαϊκό σπίτι καταναλώνει περίπου 3,500 kWh/χρόνο^[177].

5.14 Συνολικό κόστος κεφαλαίου

Το συνολικό κόστος κεφαλαίου είναι το άθροισμα των επιμέρους τμημάτων που έχουν αναλυθεί σε αυτό το κεφάλαιο και συνοψίζονται παρακάτω:

Σύστημα πρόσληψης / αποβολής νερού	€500.000
Προκατεργασία θαλασσινού και γλυκού νερού	€100.000
Στοιβα μεμβρανών	€1.700.000
Εναλλάκτες πίεσης	€1.800.000
Αντλία, σωλήνες υδροστρόβιλος και γεννήτρια	€1.500.000
Ηλεκτρική εγκατάσταση και σύνδεση στο δίκτυο	€400.000
Συνολικό κόστος κεφαλαίου	€6.000.000

Πίνακας 5.8: Το συνολικό κόστος κεφαλαίου ωσμωτικής μονάδας 1 MW.

Το συνολικό κόστος κεφαλαίου του πίνακα 5.8 αντιστοιχεί σε τιμή 0.13€/kWh (βλέπε κεφάλαιο 6) και χρόνος απόσβεσης 15 χρόνια.

Κεφάλαιο 6

Μελέτη σκοπιμότητας

Για τον χαρακτηρισμό της δυνατότητας εμπορικής εκμετάλλευσης της ωσμωτικής ενέργειας απαιτείται να γίνει μελέτη σκοπιμότητας. Στο κεφάλαιο αυτό θα καθοριστεί η τιμή μονάδας ενέργειας για την ωσμωτική μονάδα PRO 1MW στον ποταμό Καλαμάς στη περιοχή που εκβάλλει στο Ιόνιο Πέλαγος.

6.1 Κόστος επένδυσης

Το κόστος επένδυσης καθορίζεται από:

- Το κόστος κεφαλαίου της ωσμωτικής μονάδας (καθορίστηκε στο κεφάλαιο 5).
- Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης (κεφάλαιο 6.3).
- Τη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων της ωσμωτικής μονάδας.
- Το χρόνο απόσβεσης.

6.2 Έσοδα από την ωσμωτική μονάδα

Τα έσοδα από την ωσμωτική μονάδα προέρχονται από την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια που πωλείται στο δίκτυο. Δεν υπάρχει νομοθεσία επιδότησης μιας ωσμωτικής μονάδας μέχρι σήμερα. Θεωρείται ότι η καθαρή παραγόμενη ενέργεια που υπολογίστηκε στην πτυχιακή εργασία είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της ωσμωτικής μονάδας.

6.3 Κόστος λειτουργίας και συντήρησης

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας της ωσμωτικής μονάδας αναμένεται να γίνουν επιπλέον δαπάνες για τη λειτουργία και τη συντήρηση. Στο κόστος λειτουργίας συμπεριλαμβάνεται και το ανθρώπινο δυναμικό για την επίβλεψη της ορθής λειτουργίας. Οι επιπλέον αυτές δαπάνες θεωρούνται ίσες με 1% του συνολικού κόστους κεφαλαίου της ωσμωτικής μονάδας.

6.4 Καθορισμός τιμής μονάδας ενέργειας

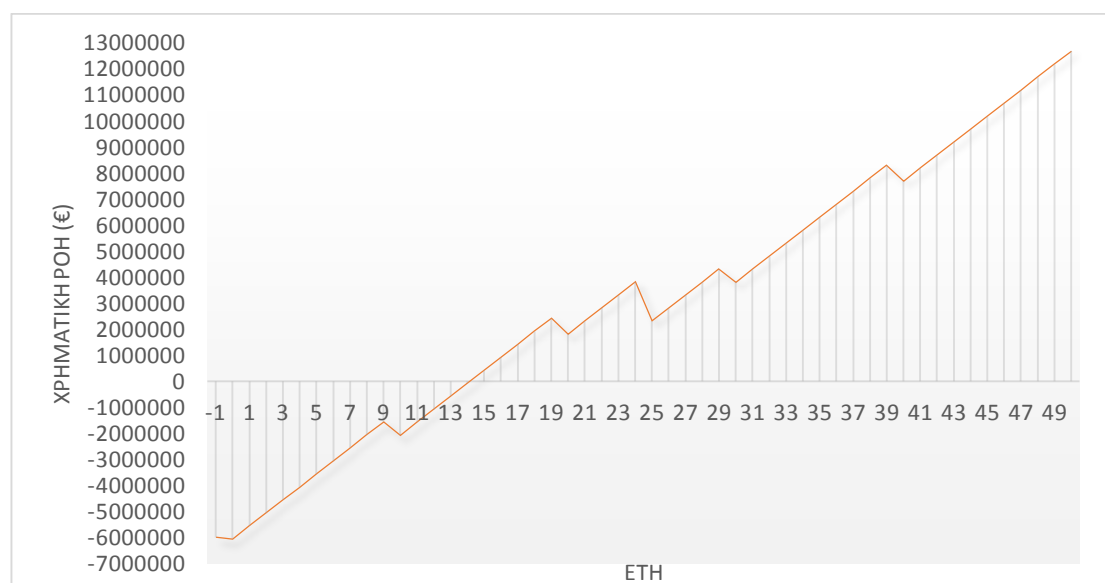
Για να καθοριστεί η τιμή μονάδας ενέργειας για την ωσμωτική μονάδα PRO 1 MW που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 5 πρέπει να γίνει υπολογισμός της καθαρής αξίας της μονάδας. Η τιμή της καθαρής μονάδας ενέργειας είναι η τιμή μονάδας που δίνει καθαρή αξία μηδέν στο τέλος της περιόδου απόσβεσης της επένδυσης. Αυτό σημαίνει ότι η ταμειακή ροή της κατασκευής και εκμετάλλευσης της μονάδας παραγωγής ενέργειας είναι μηδέν.

6.4.1 Διάρκεια ζωής, χρόνος απόσβεσης

Θεωρείται ότι η μονάδα θα είναι εκμεταλλεύσιμη για μια περίοδο 50 ετών. Η περίοδος αυτή δεν περιλαμβάνει τη περίοδο κατασκευής που θεωρείται να είναι περίπου 1 χρόνο. Οι μεμβράνες θεωρούνται ότι έχουν διάρκεια ζωής 10 χρόνια. Η προκατεργασία θεωρείται ότι λειτουργεί κανονικά για 20 χρόνια. Οι αντλίες, οι σωλήνες, ο υδροστρόβιλος, η γεννήτρια, οι εναλλάκτες πίεσης, οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και ο υποσταθμός για σύνδεση με το δίκτυο θεωρείται ότι θα λειτουργούν κανονικά για μια περίοδο 25 ετών.

6.4.2 Χρηματική ροή κατά τη διάρκεια λειτουργίας

Η τιμή της ενεργειακής μονάδας της ωσμωτικής μονάδας PRO είναι η τιμή εκείνη που οδηγεί σε θετική χρηματική ροή από το τέλος της περιόδου απόσβεσης των 15 ετών. Η τιμή αυτή προκύπτει από τον συνυπολογισμό των εσόδων ανά έτος της μονάδας, την τρέχουσα καθαρή αξία των εξαρτημάτων που την αποτελούν, τον χρόνο αντικατάστασης τους και μια μείωση 20% που θεωρήθηκε ότι θα έχουν τα εξαρτήματα τις επόμενες δεκαετίες. Η χρηματική ροή παρουσιάζεται στο διάγραμμα 6.1:



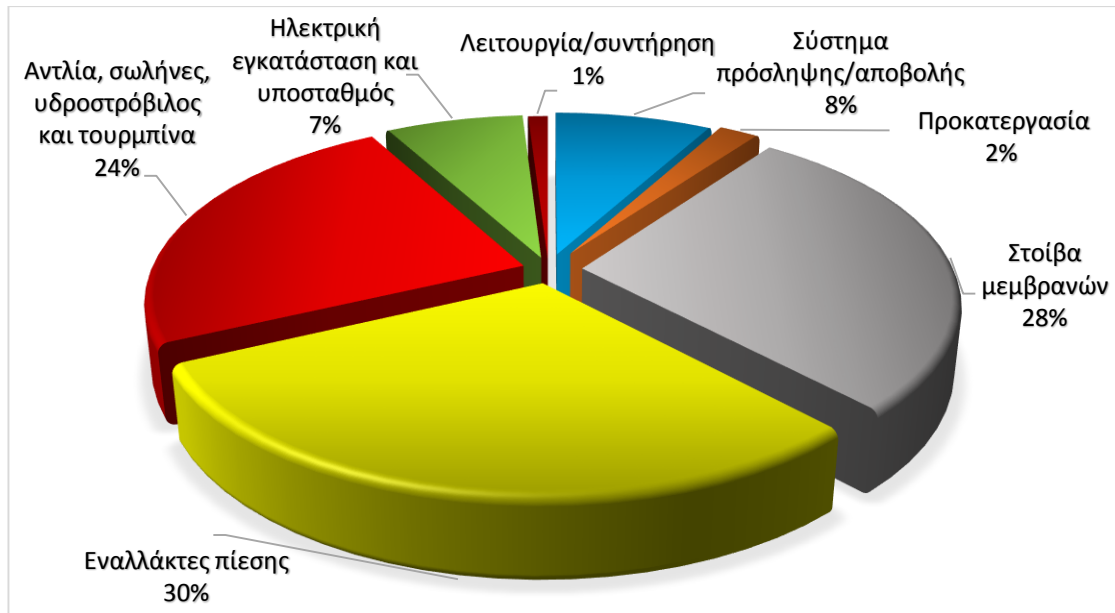
Διάγραμμα 6.1: Η χρηματική ροή κατά τη διάρκεια λειτουργίας της μονάδας.

Το διάγραμμα 6.1 είναι γνωστό ως διάγραμμα ταμειακής ροής. Παρατηρείται ότι η τρέχουσα καθαρή αξία είναι ίση με μηδέν στο τέλος των ετών απόσβεσης. Από εκείνο το σημείο και έπειτα, η τρέχουσα καθαρή αξία είναι θετική και η ωσμωτική μονάδα θα είναι επικερδής. Η τιμή μονάδας ενέργειας αντιστοιχεί σε **0,13€/kWh**.

6.5 Κατανομή της τιμής μονάδας ενέργειας

Με γνωστή την τιμή μονάδας ενέργειας, μπορεί να γίνει κατανομή της τιμής αυτής στα κύρια εξαρτήματα που συνθέτουν την ωσμωτική μονάδα. Η κατανομή της

τιμής μονάδας ενέργειας στην ωσμωτική μονάδα PRO 1 MW παρουσιάζεται στο διάγραμμα 6.2:



Διάγραμμα 6.2: Η κατανομή της τιμής μονάδας ενέργειας στην ωσμωτική μονάδα PRO 1MW.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 6.2 οι εναλλάκτες πίεσης (30%) είναι το πιο οικονομικά επιζήμιο μέρος της ωσμωτικής μονάδας PRO. Ακολουθεί η στοιβα μεμβρανών (28%) και η αντλία κ.α. (24%). Τα υπόλοιπα μέρη έχουν μικρότερη επίδραση στο κόστος (18% συνολικά).

Η κατανομή της τιμής μονάδας ενέργειας αλλά και το κόστος κεφαλαίου του κάθε κύριου μέρους που συνθέτει την ωσμωτική μονάδα αναγράφονται στον ακόλουθο πίνακα:

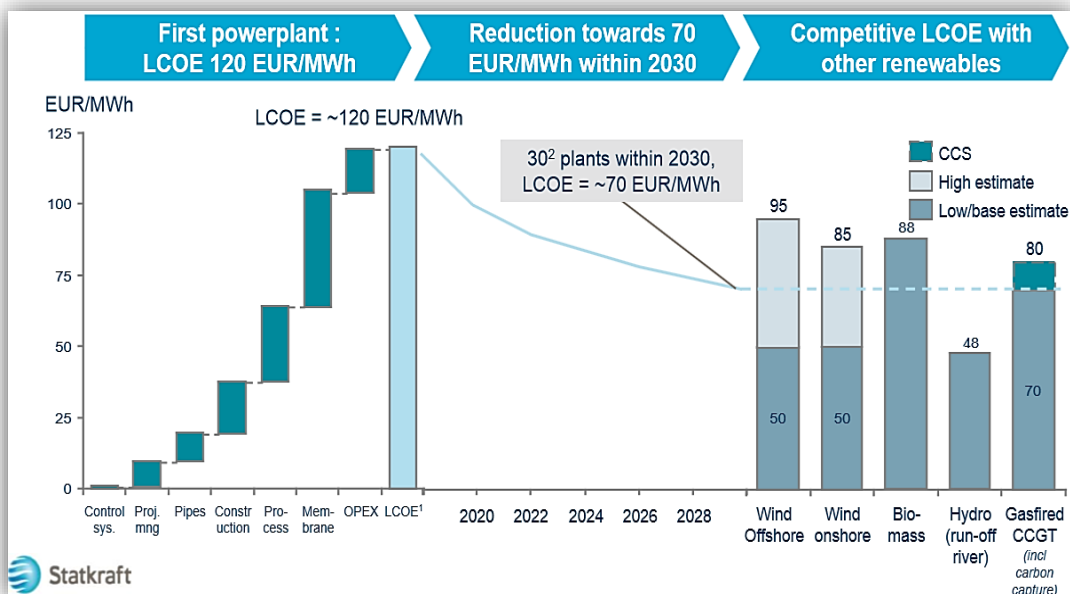
Είδος	%	€/kWh
Σύστημα πρόσληψης και αποβολής	8%	0.0108€/kWh
Προκατεργασία	2%	0.0022€/kWh
Στοιβα μεμβρανών	28%	0.0368€/kWh
Εναλλάκτες πίεσης	30%	0.0390€/kWh
Αντλία κ.α	24%	0.0325€/kWh
Ηλεκτρικη κ.α	7%	0.0087€/kWh
Λειτουργία και συντήρηση	1%	0.0013€/kWh
Συνολική τιμή μονάδας ενέργειας		0,13€/kWh

Πίνακας 6.1: Κατανομή της τιμής μονάδας ενέργειας.

6.6 Εκτίμηση τιμής μονάδας ενέργειας από άλλες μελέτες

Η πρώτη μελέτη πραγματοποιήθηκε από τον Wimmersted (1977), κοστολογώντας τη μονάδα λίγο περισσότερο από 0.12 €/kWh. Ο Lee^[50] (1981) καθόρισε το κόστος 0.10-0.21€/kWh, ενώ την ίδια χρονιά ο Jellinek και Masuda^[109] όρισαν τη τιμή μονάδας ενέργειας στα 0.02 €/kWh. Ο Thorsen (1996) βασιζόμενος στην αποτίμηση των μεμβρανών και του κόστους όρισε την τιμή από 0.03 – 0.06 €/kWh. Από μελέτη του Skilhagen^[178] (2012) το κόστος υπολογίστηκε μεταξύ 0.06 - 0.08 €/kWh περιλαμβάνοντας και μείωση κόστους λόγω των τεχνολογικών βελτιώσεων. Τέλος, από τη μελέτη του Kleipert^[169] (2012) η τιμή μονάδας ενέργειας ορίστηκε στα 0.19 €/kWh παραβλέποντας τη προκατεργασία νερού και με χαμηλή κοστολόγηση των εναλλακτών πίεσης.

Η Statkraft θεωρεί ότι το κόστος των εξαρτημάτων θα μειωθούν με τη πάροδο των επόμενων χρόνων και σε συνδυασμό με την βελτίωση της τεχνολογίας PRO η μέθοδος θα είναι ανταγωνιστική με τις άλλες μορφές ενέργειας από το 2030. Η Statkraft κοστολογεί με τη σημερινή διαθέσιμη τεχνολογία τη μονάδα PRO σε 0.12 €/kWh και η τιμή αυτή αναμένεται να φθάσει στα 0.07 €/kWh έως το 2030, όπως παρουσιάζεται από το σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1: Κόστος μονάδας PRO έως το 2030 και σύγκριση με άλλες ΑΠΕ, όπως παρουσιάστηκε από την Statkraft.

Θεωρείται γενικά αποδεκτό ότι με την χρήση μεμβράνης που θα παρέχει τουλάχιστον 5W/m² το κόστος της μονάδας θα είναι στα όρια από 0.04 – 0.09€/kWh μέχρι το 2030^[179]. Η επίδραση στο κόστος κεφαλαίου όταν η πυκνότητα ενέργειας είναι 5W/m² αναλύεται στο κεφάλαιο 7.

6.7 Σύγκριση με άλλες Α.Π.Ε.

Στον πίνακα 6.2 παρουσιάζεται η τιμή μονάδας ενέργειας για τις συμβατικές πηγές ενέργειας και για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Συμβατικές πηγές ενέργειας		Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	
Είδος	€/kWh	Είδος	€/kWh
Φυσικό αέριο	0.028 - 0.032	Αιολική	0.03 - 0.04
Άνθρακας	0.035 - 0.04	Γεωθερμική	0.032 - 0.21
Πυρηνική	0.08 - 0.1	Υδροηλεκτρική	0.037 - 0.08
		Ηλιακή	0.10 - 0.21
		Παλιρροϊκή	0.015 - 0.036
		Ωκεάνια	0.043 - 0.18

Πίνακας 6.2: Τιμή μονάδας ενέργειας για τις συμβατικές και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Πηγή^[180].

Παρατηρείται ότι η τιμή μονάδας ενέργειας 0.13 €/kWh της ωσμωτικής μονάδας PRO που αναλύθηκε στη πτυχιακή εργασία θεωρείται μη ανταγωνιστική σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους ανάκτησης ενέργειας.

Κεφάλαιο 7

Εξελίξεις στην τεχνολογία PRO

Η δυνατότητα εμπορικής αξιοποίησης της ωσμωτικής μονάδας PRO καθορίζεται από την τιμή μονάδας ενέργειας. Στο προηγούμενο κεφάλαιο, όπου υπολογίστηκε η τιμή μονάδας της ενέργειας της ωσμωτικής μονάδας PRO 1 MW συμπεριλαμβανομένου και όλων των εξόδων κατασκευής η τιμή ήταν υψηλή συγκριτικά με τις υπόλοιπες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές). Παρόλα αυτά, η ανάπτυξη της τεχνολογίας PRO είναι ακόμα σε εξέλιξη. Σε αυτό το κεφάλαιο θα καθοριστεί η τιμή μονάδας ενέργειας όταν ληφθούν υπόψη οι εξελίξεις που αναμένονται στο μέλλον.

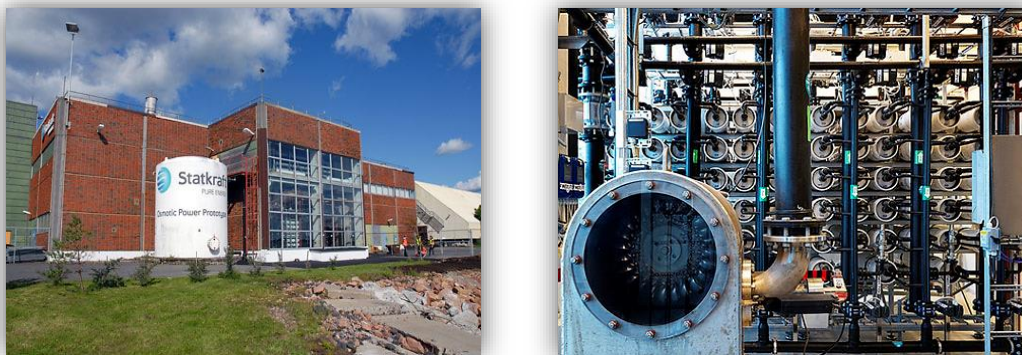
7.1 Παρελθόν, παρόν & μέλλον της μεθόδου PRO

Η ωσμωτική ενέργεια είναι μια μορφή ανανεώσιμης ενέργειας η οποία είναι υπό εξέλιξη. Η τεχνολογία είναι γνωστή εδώ και δεκαετίες, αλλά η αναποτελεσματικότητα των μεμβρανών και η υψηλή τους τιμή καθιστούν ασύμφορη τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την μέθοδο PRO. Τις τελευταίες δεκαετίες παρόλα αυτά, η αναγκαιότητα των μεμβρανών για χρήση τους σε διάφορες εφαρμογές, όπως αφαλάτωση, έχει οδηγήσει σε αύξηση της αγοράς μεμβρανών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των τιμών των μεμβρανών αλλά παράλληλα την αύξηση της αποτελεσματικότητάς τους. Όπως προκύπτει από το κεφάλαιο 7.2, με περαιτέρω αύξηση της πυκνότητας ενέργειας της μεμβράνης και με μείωση των τιμών της μεμβράνης, η μονάδα ωσμωτικής ενέργειας θα γίνει πιο συμφέρουσα.

7.1.1 Πρώτη πιλοτική μονάδα PRO

Η πρώτη πιλοτική μονάδα PRO κατασκευάστηκε στην Νορβηγία το 2009 από την κρατική εταιρία Statkraft^[99], ισχύος 4kW, για την ανάδειξη της τεχνολογίας χρησιμοποιώντας ασύμμετρες μεμβράνες οξικής κυτταρίνης (μεμβράνες σχεδιασμένες για FO) παράγοντας ενέργεια μικρότερη από 0.5W/m²^[62,124].

Η κατασκευή της πιλοτικής μονάδας είχε ως κύριο σκοπό να αποδείξει τη λειτουργία της μεθόδου PRO όταν αναμιγνύεται το γλυκό νερό με το θαλασσινό νερό. Επίσης, συντέλεσε στην απόκτηση εμπειρίας γύρω από τη διαχείριση της μονάδας και έδωσε τη δυνατότητα σε εταιρίες που κατασκευάζουν μεμβράνες να μπορέσουν να τις δοκιμάσουν σε πραγματικές συνθήκες. Η εφαρμογή των εναλλακτών πίεσης σε μονάδα PRO έγινε για πρώτη φορά στη πιλοτική μονάδα ώστε να δοκιμαστούν σε χαμηλή πίεση.



Σχήμα 7.1: Η πιλοτική μονάδα PRO της Statkraft, ισχύος 4 kW.

Η εταιρία Statkraft μετά από 15 χρόνια έρευνας στη τεχνολογία PRO και ενώ σκόπευε να κατασκευάσει τη πρώτη δοκιμαστική μονάδα 2 MW έχοντας συνάψει πρόσφατα συμφωνία (2011) με την εταιρία Nitto Denko / Hydranautics για τη βελτίωση και τη παροχή μεμβρανών PRO^[181,182] αποφάσισε να αναστείλει την επένδυση καθώς θεωρεί ότι η τεχνολογία PRO απέχει με οικονομικά κριτήρια από τις υπόλοιπες μορφές ενέργειας που είναι διαθέσιμες.

7.1.2 Έρευνα προκατεργασία μεμβρανών

Το Centre National en Electrochimie et en Technologies Environnementales (CNETE)/Shawinigan College στο Quebec του Καναδά, έλαβε χορήγηση 220.000€ από το National Sciences & Engineering Research Council για τρία χρόνια για να βελτιστοποιήσει τις μεμβράνες FO για προκατεργασία νερού. Η έρευνα θα πραγματοποιηθεί σε συνεργασία με την Statkraft με σκοπό να βελτιωθεί η τεχνολογία PRO^[186]. Η Καναδική εταιρία επιδιώκει την εγκατάσταση 12GW ωσμωτικής ενέργειας στην εκβολή των ποταμών Hudson Bay, James Bay και St Lawrence αυξάνοντας κατά 25% τη τωρινή χωρητικότητα παραγωγής ενέργειας^[181].

7.1.3 Πιλοτική μονάδα PRO στην Κορέα

Η εταιρία GS Engineering & Construction Corporation (GS E&C Corp) έχει ξεκινήσει την κατασκευή πιλοτικής μονάδας PRO στην Νότια Κορέα σε συνεργασία με την Energy Recovery Inc. (ERI) η οποία κατασκευάζει εναλλάκτες πίεσης. Η μονάδα αναμένεται να τεθεί σε λειτουργία τέλη του 2014. Η συνεργασία με την ERI πραγματοποιήθηκε για την βελτίωση της τεχνολογίας των εναλλακτών πίεσης στην μέθοδο PRO^[183].

7.2 Αναμενόμενες μελλοντικές εξελίξεις της τεχνολογίας PRO

Οι αναμενόμενες μελλοντικές εξελίξεις είναι η αύξηση της πυκνότητας ενέργειας και η μείωση της τιμής της μεμβράνης. Η Statkraft αναμένει την πυκνότητα ισχύος να φθάσει τα 5 W/m². Η τρέχουσα τιμή της μεμβράνης είναι 5 €/m² αλλά είναι

πιθανό τα επόμενα χρόνια η τιμή να μειωθεί στα 2 €/m². Το ερώτημα είναι εάν αυτές οι βελτιώσεις θα έχουν σημαντική επίδραση στη τιμή μονάδας ενέργειας.

Η αύξηση της πυκνότητας ισχύος σε 5 W/m² έχει θετική επίδραση επειδή η επιφάνεια των μεμβρανών που απαιτούνται θα είναι λιγότερη. Για την πτυχιακή εργασία η πυκνότητα ενέργειας ήταν 2.9 W/m², οπότε η μείωση με χρήση 5 W/m² θα είναι της τάξης 42% λιγότερες μεμβράνες. Εάν στον νέο αριθμό μεμβρανών συνυπολογισθεί και η τιμή από 5 €/m² σε 2 €/m² τότε το κόστος κεφαλαίου για τη στοιβα μεμβρανών θα είναι ίσο με 289.655€.

Όταν αυτές οι εξελίξεις ληφθούν υπόψιν η τιμή μονάδας της ενέργειας θα μειωθεί από **0,13 €/kWh** σε **0,07 €/kWh**. Αυτή η μείωση είναι αρκετή για να γίνει εμπορικά αξιοποιήσιμη η ωσμωτική μονάδα PRO. Η βελτίωση λοιπόν των μεμβρανών είναι απαραίτητη.

7.3 Εφαρμογή σε παγκόσμιο επίπεδο

Στον Πίνακα 7.1 συνοψίζεται η ενέργεια που είναι δυνατόν να παραχθεί από κύριες πηγές γλυκού νερού στον κόσμο με θεωρητική ανάμειξη θαλασσινού νερού (συγκέντρωση NaCl ≈ 3%) σε ένα σύστημα PRO με βαθμό απόδοσης 40% και χρησιμοποιώντας 10% του νερού του ποταμού. Οι τοποθεσίες έχουν αναφερθεί από τον Wick ^[184].

Πηγή γλυκού νερού	Μέση παροχή (m ³ /s)	Ισχύς (MW)	Παροχή ηλεκτρικής ενέργειας (εκατοντάδες σπίτια)
Παγκοσμίως	1.2 x 10 ⁶	124,800	N/A
Amazon River, Brazil	2 x 10 ⁵	20,800	77,600
La Plata – Parana River, Argetina	8 x 10 ⁴	8,320	29,100
Congo River, Congo Angola	5.7 x 10 ⁴	5,930	282,300
USA	5.4 x 10 ⁴	5,620	4,000
Yangtze River, China	2.2 x 10 ⁴	2,290	5,800
Ganges River, USA	1.8 x 10 ⁴	2,080	74,300
Mississippi River, USA	1.8 x 10 ⁴	1,870	1,300
Columbia River, USA	7.5 x 10 ³	780	550

Πίνακας 7.1. Ωσμωτική παραγωγή ενέργειας από μερικούς κύριους ποταμούς ανά τον κόσμο. Η μέση κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά χώρα αναρτήθηκε από το Central Intelligence Agency^[185]. Η ισχύς υπολογίστηκε με τη χρήση 10% του αποθέματος νερού και θεωρώντας παραγόμενη ισχύς 1 MW ανά m³/s του νερού του ποταμού και 40% βαθμό απόδοσης του συστήματος.

Υπολογίζοντας τη μέση εκροή των ποταμών σε όλο τον κόσμο που εκβάλλουν στη θάλασσα, η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί από την ανάμειξη έχει αναφερθεί ότι είναι 1,650 TWh το χρόνο^[41,102].

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα

Η πτυχιακή εργασία περατώνεται με τα συμπεράσματα για την δυνατότητα εμπορικής αξιοποίησης της ωσμωτικής μονάδας PRO.

8.1 Ανακεφαλαίωση και κύρια συμπεράσματα

Μεγάλες ποσότητες ενέργειας μπορούν να παραχθούν όταν νερά διαφορετικής αλατότητας αναμιχθούν. Η αξιοποίηση αυτής της ενέργειας για μετατροπή σε ηλεκτρική μπορεί να επιτευχθεί με τη διαδικασία της παρατεταμένης-πίεσης ώσμωση (PRO, Pressure Retarded Osmosis). Η μέθοδος αυτή αποτελείται από μια ημι-διαπερατή μεμβράνη για να διαχωρίσει από τα δύο διαλύματα αυτό με τη λιγότερη συγκέντρωση διαλύματος ή διαλύτη (για παράδειγμα, νερό του ποταμού), από το διάλυμα με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση και μεγαλύτερη πίεση διαλύματος (για παράδειγμα, θαλασσινό νερό), επιτρέποντας τον διαλύτη να περάσει μέσω της μεμβράνης στην πλευρά που βρίσκεται η μεγαλύτερη συγκέντρωση διαλύματος. Η επιπρόσθετη ποσότητα αυξάνει την πίεση στη μια πλευρά, η οποία μπορεί να αποσυμπιεστεί με μια υδροτουρμπίνα παράγοντας ενέργεια (ωσμωτική ενέργεια).

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής της μεθόδου PRO με τη τωρινή διαθέσιμη τεχνολογία στην Ελλάδα με μελέτη μονάδας 1MW. Μελετήθηκε η τεχνική, οικονομική, περιβαλλοντική και άλλες πλευρές της ωσμωτικής ενέργειας. Οι πιο πρόσφατες έρευνες συλλέχθηκαν με σκοπό την ανάδειξη της ταχύτερης αύξησης της μεθόδου PRO τα τελευταία χρόνια - με κύριο ενδιαφέρον στην βελτίωση των μεμβρανών - και στη παρότρυνση για περαιτέρω έρευνα σε αυτόν τον τομέα. Επίσης, οι δυσκολίες που υπάρχουν στην εφαρμογή των μονάδων PRO αλλά και τα κενά στην έρευνα που πρέπει να καλυφθούν εμπεριέχονται στην παρούσα πτυχιακή. Επιπλέον, αναφέρονται και άλλοι τρόποι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πέρα από την ανάμιξη του θαλασσινού νερού με αυτό του ποταμού.

Η εκτίμηση του κόστους μονάδας PRO είναι δύσκολη καθώς δεν υπάρχουν μεγάλης κλίμακας μονάδες για να επιβεβαιώσουν τις παραδοχές παρά μόνο μια πιλοτική μονάδα στην Νορβηγία και με τη τεχνολογία να είναι ακόμη υπό ανάπτυξη.

8.2 Συμπεράσματα από την μελέτη στον ποταμό Καλαμά

Μετά την οικονομική ανάλυση της ωσμωτικής μονάδας PRO 1 MW συμπεραίνεται ότι, με τη παρούσα τεχνολογία η εμπορική εκμετάλλευση της μεθόδου PRO απέχει από την επίτευξη της. Η ωσμωτική μονάδα PRO είναι τεχνικά δυνατή να παράγει ενέργεια, αλλά η τιμή μονάδας ενέργειας ήταν πάνω από τις υπόλοιπες μεθόδους παραγωγής ενέργειας καθιστώντας την μη ανταγωνιστική.

Η μεγάλη τιμή μονάδας της ενέργειας οφείλεται κατά κύριο λόγο στην έλλειψη κατάλληλων μεμβρανών ικανές να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις της μεθόδου PRO σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος κεφαλαίου. Η απόδοση είναι της τάξης του 44% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας. Η υπόλοιπη ενέργεια είναι είτε απώλειες είτε για την τροφοδότηση άλλων μερών.

Η τοποθεσία της μονάδας πρέπει να είναι σε σημείο που εκβάλλει ο ποταμός στη θάλασσα με τις σωληνώσεις για μεταφορά και αποβολή του νερού να έχουν τη μικρότερη δυνατή απόσταση από τη μονάδα. Το κόστος κεφαλαίου καθορίζεται από την απόσταση που θα πρέπει να διανύσει το νερό από και προς τη μονάδα. Για να επιτευχθεί η μικρότερη δυνατή απόσταση πρέπει να μην παρεμβαίνουν οικισμοί ή άλλες βιομηχανικές μονάδες σε εκείνη τη περιοχή.

Η προκατεργασία νερού χρήζει περαιτέρω ανάλυσης για την καταλληλότητα της μεθόδου μικροδιήθησης έναντι των άλλων και εάν το οικονομικό κριτήριο επιλογής μεθόδου προκατεργασίας είναι αρκετό ώστε να διασφαλίζεται η καθαρότητα των μεμβρανών και ως εκ τούτου η μεγάλη διάρκεια ζωής τους.

Επειδή οι μεμβράνες δεν είναι σχεδιασμένες για εφαρμογές PRO είναι αναμενόμενο το μεγάλο κόστος κεφαλαίου για την επίτευξη της επιθυμητής ποσότητας ενέργειας. Οι μεμβράνες είναι αυτές που καθορίζουν την οικονομική βιωσιμότητα της μονάδας PRO και αποτελούν τον καθοριστικό παράγοντα για την τεχνολογία εάν θα είναι στο μέλλον ανταγωνιστική με τις άλλες μεθόδους παραγωγής ενέργειας. Ορθά έχει χαρακτηριστεί ότι με επίτευξη πυκνότητας ενέργειας 5 W/m^2 η τιμή μονάδας ενέργειας θα κυμαίνεται μαζί με τις άλλες μορφές ενέργειας, όπως αποδείχτηκε στο κεφάλαιο 7.

Ομοίως, οι εναλλάκτες πίεσης δεν είναι ιδικά σχεδιασμένοι για εφαρμογές PRO αλλά για μονάδες αφαλάτωσης, οπότε αναμένονται να υπάρξουν διαφοροποιήσεις στο εγγύς μέλλον όταν μετά τη συνεργασία της Energy Recovery Inc., κατασκευάστριας εταιρίας εναλλακτών πίεσης, με την GS Engineering & Construction Corporation όπου θα δοκιμαστούν οι εναλλάκτες πίεσης σε εφαρμογές PRO. Η χρήση τους σε μονάδα PRO, μετά και την μελέτη που πραγματοποιήθηκε, κρίνεται απαραίτητη για να μπορέσει η μονάδα να μειώσει τις απώλειες συστήματος όπως θα συνέβαινε χρήση μεγάλων αντλιών.

8.3 Δυνατότητα εφαρμογής στην Ελλάδα

Το κύριο χαρακτηριστικό μιας τοποθεσίας για να θεωρηθεί κατάλληλη για κατασκευή μονάδας PRO είναι η μέση ετήσια παροχή γλυκού νερού. Με κριτήριο την τοποθεσία και τη παροχή $1 \text{ m}^3/\text{s}$ γλυκού νερού, είναι πολλές οι περιοχές στην Ελλάδα που μπορούν να κατασκευαστούν μονάδες 1 MW. Για να πραγματοποιηθεί όμως αυτό πρέπει να αναπτυχθεί περαιτέρω η τεχνολογία PRO και να μειωθεί το κόστος κεφαλαίου. Η μείωση του κόστους κεφαλαίου θα αρχίσει να πραγματοποιείται με την κατασκευή μεγάλων ωσμωτικών μονάδων PRO σε παγκόσμιο επίπεδο.

Επειδή η μέγιστη παραγόμενη ενέργεια στην Ελλάδα μπορεί να φθάσει έως τα 10 MW και αυτό σε ορισμένους μόνο ποταμούς (Αξιός, Αχελώος, Έβρος και Στρυμόνας) συμπεραίνεται ότι η Ελλάδα δεν μπορεί να συντελέσει στην κατασκευή μονάδων PRO με τόσο υψηλό το κόστος κεφαλαίου. Με ανάπτυξη της τεχνολογίας PRO και μείωση του κόστους κεφαλαίου, αρκετοί ποταμοί στον ελληνικό χώρο έχουν την δυνατότητα κατασκευής μονάδας PRO 1 έως 5 MW.

8.4 Επίλογος

Την τελευταία δεκαετία έχει πραγματοποιηθεί μεγάλη έρευνα από πανεπιστήμια και εταιρίες σε παγκόσμιο επίπεδο για την βελτίωση της πολλά υποσχόμενης τεχνολογίας PRO. Η ωσμωτική μονάδα PRO, όπως προέκυψε μετά την μελέτη, είναι προς το παρόν ασύμφορη με οικονομικά κριτήρια για να πραγματοποιηθεί με τόσο μεγάλο κόστος κεφαλαίου. Αυτό επισήμανε και η εταιρία Statkraft όταν απέσυρε το ενδιαφέρον για κατασκευή ωσμωτικής μονάδας PRO 2 MW.

Παρά το μεγάλο κόστος κεφαλαίου, το κύριο πλεονέκτημα συγκριτικά με τις άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι στην αξιόπιστη συνεχή παροχή ενέργειας. Με τροφοδότηση γλυκού και θαλασσινού νερού, αναμένεται να λειτουργεί συνεχόμενα 8,000 ώρες ετησίως, αποδίδοντας πολύ υψηλή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε εγκατεστημένο MW.

Η εμπορική εκμετάλλευση της ωσμωτικής ενέργειας θα γίνει ανταγωνιστική με τις υπόλοιπες μεθόδους όταν οι μελλοντικές εξελίξεις εφαρμοστούν στη μέθοδο PRO. Η βελτίωση της πυκνότητας ενέργειας είναι λογική. Η ανάπτυξη των μεμβρανών είναι ακόμη σε εξέλιξη, οπότε είναι εφικτή η αύξηση της πυκνότητας ενέργειας σε συνδυασμό με μείωση των τιμών.

Η έρευνα θα συνεχιστεί τα επόμενα χρόνια εστιάζοντας κυρίως στις ωσμωτικές μεμβράνες οι οποίες θα πρέπει να είναι ειδικά σχεδιασμένες για εφαρμογές PRO ώστε να βελτιθούν τα χαρακτηριστικά τους αλλά και σε άλλες μεθόδους που έγκειται στην ίδια μέθοδο, όπως αυτές αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 3.

Ελπίζω η πτυχιακή εργασία να αποτελέσει ενδεικτικό βοήθημα για τη μεθοδολογία μελέτης μιας ωσμωτικής μονάδας PRO και να συντελέσει σε περαιτέρω έρευνα και βελτίωση της νέας και πολλά υποσχόμενης πηγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Βιβλιογραφία

- [1] «*Compare World Electricity Generation*», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://world-electricity-generation.findthedata.org/> (Τελευταία επίσκεψη Σεπτέμβριος 2012)
- [2] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, «*Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας*», ΡΑΕ, (2012)
- [3] Τσακαλάκης, Κ, «*Παραγωγή ενέργειας από συμβατικά ορυκτά καύσιμα και εναλλακτικές πηγές ενέργειας*», Ε.Μ.Π. – Σχολή Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.viron-develop.ntua.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Σεπτέμβριος 2012)
- [4] «*Total Energy Consumption*», Global Energy Statistical Yearbook 2013, Enerdata, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://yearbook.enerdata.net/> (Τελευταία επίσκεψη Μάρτιος 2014)
- [5] Καπλάνης, Ν, «*Περιβάλλον & Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας*», Εκδόσεις Ιων, 2008
- [6] «*Statistical Review of World Energy 2013*», BP, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.bp.com/statisticalreview> (Τελευταία επίσκεψη Μάρτιος 2014)
- [7] «*Μηνιαίο Δελτίο Ενέργειας, Μάρτιος 2014*», ΑΔΜΗΕ, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.admie.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Απρίλιος 2014)
- [8] «*Το Ελληνικό ενεργειακό σύστημα*», Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.cres.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2013)
- [9] «*Μανιάτης: Ειδική μεταχείριση της Ελλάδας για τις εκπομπές CO2*», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.inewsgr.com> (Τελευταία επίσκεψη, Μάρτιος 2014)
- [10] «*Ατμοσφαιρική Ρύπανση*», Κεφάλαιο 5, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: http://www.physics.upatras.gr/UploadedFiles/course_109_2195.pdf (Τελευταία Επίσκεψη Απρίλιος 2013)
- [11] Ζάνης, Π., «*Σημειώσεις για την ρύπανση και τη χημεία της ατμόσφαιρας*», ΑΠΘ - Τομέας Μετεωρολογίας – Κλιματολογίας, 2008
- [12] Αϊνατζή ,Ο., και Πατεράκη, Α., «*Μέθοδοι διαχείρισης ρύπανσης εδάφων και υπόγειων υδάτων*», ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Γεωτεχνολογίας και Περιβάλλοντος, 2010
- [13] Ansari, A., Gill, S., Lanza, G., και Rast, W, «*Eutrophication: Causes, Consequences, and Controls in Aquatic Ecosystems*», Nature Education Knowledge, Springer, 2011

- [14] Επίσημη ιστοσελίδα της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος: <http://www.ipcc.ch/>
- [15] «Μηνιαίο Δελτίο Συστήματος Συναλλαγών ΗΕΠ, Μάρτιος 2014», ΛΑΓΗΕ, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.lagie.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Απρίλιος 2014)
- [16] Καπλάνης, Σ., «Περιβάλλον & Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας», Εκδόσεις Ιων, 2008
- [17] Φραγκιαδάκης, Ι., «Φωτοβολταϊκά Συστήματα», Εκδόσεις Ζήτη, 3^η Έκδοση, 2011
- [18] «How solar cells work», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.chelsfieldsolar.co.uk/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2013)
- [19] «Photovoltaic Installation», Stutterstock Images, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.photo-dictionary.com/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2013)
- [20] «Το σχέδιο ανάπτυξης του φωτοβολταϊκού πάρκου Μεγαλόπολης», ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε., Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.dei.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2013)
- [21] «Φωτοβολταϊκό πάρκο στην Κοζάνη», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://energyin.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2013)
- [22] «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας», Περιβάλλον & Διαχείριση Ενέργειας, Ινστιτούτο Τεχνολογίας & Εφαρμογών Καυσίμων (ΙΤΕΣΚ), Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.allaboutenergy.gr> (Τελευταία Επίσκεψη Νοέμβριος 2013)
- [23] «GE's Gigantic Offshore Wind Turbine is 25% More Efficient», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://inhabitat.com/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2013)
- [24] «Urban Turbines – Wind Power for Domestic Use», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.sustainable.co.za/blog/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2013)
- [25] «Ενισχύοντας την Ανάπτυξη του Τομέα Ενέργειας: Αιολική» Enterprise Greece, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.investingreece.gov.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2013)
- [26] «Βιομάζα», Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.cres.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2013)
- [27] «Vertically Intergrated Gasification and Combustion», Alternative Energy Solutions International (OESI), Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.aesintl.net/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2013)
- [28] Γεράσιμος, Α., «Η αγροτική βιομάζα και οι δυνατότητες αξιοποίησης της στην Ελλάδα», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.chemeng.ntua.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2013)

- [29] Πολύζου, Ο., «Γεωθερμία – Βιώσιμη ανάπτυξη και τοπικές κοινωνίες», Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, ΕΜΠ, 2007
- [30] Fin, A., «*Incredible Geothermal Energy Potential in the United States*», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://oilprice.com/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2013)
- [31] «*Ενισχύοντας την Ανάπτυξη του Τομέα Ενέργειας: Γεωθερμική*» Enterprise Greece, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.investingreece.gov.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2013)
- [32] «*Hydroelectric Power*», Types of Sustainable Energy, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://sites.google.com/site/sustainableenergyintheuk/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2013)
- [33] «*Three Gorges Dam*», Hubei, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://hubei.chinadaily.com.cn/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2013)
- [34] «*Υδροηλεκτρική Ενέργεια*», Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην Ελλάδα, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://renewablegreece.wikispaces.com/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2013)
- [35] Σκαρλούμπας, Κ., «*Μελέτη ενεργειακού δυναμικού παλιρροιακής ενέργειας στο στενό του Ευρίπου και τρόποι εκμετάλλευσης μέσω εγκατάστασης παλιρροιακής τουρμπίνας*», ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, 2011
- [36] «*Wave Energy*», Conserve Energy Future, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.conserve-energy-future.com/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2013)
- [37] Masutani, S., και Takahashi, P., «*Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)*», University of Hawaii, Manoa, 2001
- [38] Οικονόμου, Ε., «*Περιοχές κυματικής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρισμού και η χωροθέτηση τους το Αιγαίο*», ΤΕΙ Αθήνας, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.teiath.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2013)
- [39] Thorsen, T., και άλλοι, «*Semi-permeable membrane for use in osmosis and method and plant for providing elevated pressure by osmosis to create power*», United States Patent, US 7,563,370 B2, 2009
- [40] «*The salinity power project*», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://cordis.europa.eu/> (Τελευταία επίσκεψη Απρίλιος 2013)
- [41] Thorsen, T., και Holt, T., «*The potential for power production from salinity gradients by pressure retarded osmosis*», J. Memb. Sci., 335 (1-2), 205-211, 2009
- [42] Post, J., και άλλοι, «*Salinity-gradient power: evaluation of pressure retarded osmosis and reverse electrodialysis*», J. Membr. Sci. 288,218–230, 2007

- [43] Burnham, L., και άλλοι, «*Renewable Energy*», Island Press, Washington, 1993, p. 544
- [44] «*The potential role of geothermal energy and hydropower in the world energy scenario in year 2020*», Report, World Energy Council, London, 2007
- [45] Daniilidis, A., και άλλοι, «*Experimentally obtainable energy from mixing river water, seawater or brines with reverse electrodialysis*», Elsevier, Renewable Energy 64, 123-131, 2014
- [46] Gilstrap, M., «*Reverse electricity generation from salinity gradients using reverse electrodialysis*», Master Thesis, Civil & Environmental Science, Georgia Institute of Technology, 2013
- [47] Vermaas, D., και άλλοι «*Theoretical power density from salinity gradients using reverse electrodialysis*», Elsevier, Energy Procedia 20, 170-184, 2012
- [48] «*Boosting the amount of energy obtained from water*», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.utwente.nl/> (Τελευταία Επίσκεψη Απρίλιος 2013)
- [49] Επίσημη ιστοσελίδα εταιρίας REDstack: <http://www.redstack.nl/>
- [50] Lee, K., Baker, R., «*Membranes for power-generation by pressure-retarded osmosis*», J. Membr. Sci., 8 (2), 141-171, 1981
- [51] Yip, N., και Elimelech, M., «*Thermodynamic and energy efficiency analysis of power generation from natural salinity gradients by pressure retarded osmosis*», Environ. Sci. Technol., 46, 5230-5239, 2012
- [52] Sandvik, Ø., και Skilhagen, S., «*Status of technologies for harnessing Salinity Power and the current Osmotic Power activities*», Article to the **2008** Annual report of the IEA-OES
- [53] Sandvik, Ø., Skilhagen, S., και Nielsen, W., «*Power Production based on Osmotic Pressure*», Waterpower XVI, 2009
- [54] Yip, N., και Elimelech, M., «*Performance limiting effects in power generation from salinity gradients by pressure retarded osmosis*», Environ Sci Technol, 45, 10273-10282, 2011
- [55] Spliegler, K., και El-Sayed, Y., «*The energetics of desalination processes*», Desalination 134, 109-128, 2001
- [56] Bredesen, R., «*Membranes: The thin film*», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.ntnu.no/> (Τελευταία Επίσκεψη Απρίλιος 2013)
- [57] Sharif, A. και άλλοι, «*The potential of chemical-osmotic energy for renewable power generation*» Marine and Ocean Technology, 2190-2197, 2011

- [58] Loeb, S., «*Method and apparatus for generating power utilizing pressure-retarded osmosis*», United States Patent 3,906,250, 1975
- [59] Loeb, S., «*Energy production at the Dead Sea by pressure-retarded osmosis: challenge or chimera?*» *Desalination* 120, 247-262, 1998
- [60] Bredesen, R., «*Water mix produces electricity*», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.ntnu.no/> (Τελευταία Επίσκεψη Απρίλιος 2013)
- [61] McCutcheon, J., και Elimelech, M., «*Influence of membrane support layer hydrophobicity on water flux in osmotically driven membrane processes*», *J. Membr. Sci.* 318, 458–466, 2008
- [62] Achilli, A., και Childress, A., «*Pressure retarded osmosis: From the vision of Sidney Loeb to the first prototype installation-Review*», Elsevier, 2010
- [63] Aaberg, R., «*Osmotic power: a new and powerful renewable energy source?*», *Refocus* 4 (2003) 48-50
- [64] Borg, F., «*What is Osmosis? Explanation and Understanding of a Physical Phenomenon*», Jyväskylä University, Chydenius Institute, 2003
- [65] Βαλαβάνη, Α., «*Ωσμωση*», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://1lyk-ptolem.koz.sch.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2012)
- [66] Α. Κάλλης, και άλλοι, «*Χημεία Β λυκείου θετικής κατεύθυνσης*», ΟΕΔΒ, 24-27, 2002
- [67] Panyon, L., «*Renewable energy from dilution of salt water with fresh water: pressure retarded osmosis*», *Desalination* 199, 408-410, 2006
- [68] Mason, A., «*From Pig Bladders and Cracked Jars to Polysulfones: an Historical Perspective on Membrane Transport*», *Journal of Membrane Science* 60, 125-145, 1991
- [69] Pattle, R., «*Production of electric power by mixing fresh and salt water in the hydroelectric pile*», *Nature* 174, 660, 1954
- [70] Loeb, S., «*Production of energy from concentrated brines by pressure-retarded osmosis. I. Preliminary technical and economic correlations*», *Journal of Membrane Science* 1, 49-63, 1976
- [71] Loeb, S., Van Hessen, F., και Shahaf, D., «*Production of energy from concentrated brines by pressure-retarded osmosis. II. Experimental results and projected energy costs*», *Journal of Membrane Science* 1, 249-269, 1976
- [72] Cath, T., Childress, A., και Elimelech, M., «*Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments*», *J Membrane Sci.* 281, 70-87, 2006

- [73] Xu, Y., Peng, X., Tang, C., Fu, Q., και Nie, S., «*Effect of draw solution concentration and operating conditions on forward osmosis and pressure retarded osmosis performance in a spiral wound module*», J. Membr. Sci., 348 (1-2) 298-309, 2010
- [74] Yip, N., Tiraferri, A., Phillip, W., Schiffman, και J., Elimelech, M., «*High Performance thin-film composite forward osmosis membrane*», Environ. Sci. Technol., 44 (10), 3812-3818, 2010
- [75] Tiraferri, A., Yip, N., Phillip, W., Schiffman, W., και Elimelech, M., «*Relating performance of thin-film composite forward osmosis membranes to support layer formation and structure*», J. Membr. Sci., 367 (1-2), 340-352, 2011
- [76] Phillip, W., Yong, J., και Elimelech, M., «*Reverse draw solute permeation in forward osmosis: Modeling and experiments*», Environ. Sci. Technol. 2010, 44 (13), 5170–5176., 2010
- [77] «*Basics of Reverse Osmosis*», Puretec, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://puretecwater.com/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2012)
- [78] Φουντουκίδης, Ε., «*Αφαλάτωση νερού με αντίστροφη ώσμωση*», ΤΕΙ Πειραιά, Τμήμα Φυσικής Χημείας και τεχνολογίας υλικών, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://ikaros.teipir.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2012)
- [79] Helfer, F., Sahin, O., Lemckert, C., και Anissimov, Y., «*Salinity gradient energy: a new source of renewable energy for Australia*», in: 8th International Conference of the European Water Resources Association, EWRA, Porto, Portugal, 2013
- [80] «*Statkraft and Hydro-Québec to cooperate on research and development into osmotic power*», Statkraft Press Centre, 2012. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.statkraft.com> (Τελευταία επίσκεψη Σεπτέμβριος 2013).
- [81] McGinnis, R., McCutcheon, J., και Elimelech, M., «*A novel ammonia-carbon dioxide osmotic heat engine for power generation*». J. Membr. Sci., 305 (12), 13–19, 2007
- [82] Loeb, S., «*Osmotic power plants*», Science, 189, 654-655, 1975
- [83] Gerstandt, K., Peinemann, K., Skilhagen, S., Thorsen, T., και Holt, T., «*Membrane processes in energy supply for an osmotic power plant*», Desalination, 224, 64-70, 2008
- [84] Logan, B., και Elimelech, M., «*Membrane-based processes for sustainable power generation using water*», Nature, 488, 313-319, 2012
- [85] Παπανίκας, Δ., «*Εφαρμοσμένη Ρευστομηχανική*», 4^η έκδοση, 2010
- [86] «*Absolute pipe roughness*» Enggcyclopedia, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.enggcyclopedia.com/> (Τελευταία επίσκεψη Φεβρουάριος 2014)

- [87] Li, N., Fane, A., Winston, W., και Matsuura T., «*Advanced membrane technology and applications*», Wiley, 2008
- [88] Rennels D, και Hudson H, «*Pipe Flow, A practical and Comprehensive Guide*», John Wiley & Sons Inc., 2012
- [89] Papaevangelou, G., Evangelides, C., και Tzimopoulos, C., «*A new explicit relation for friction coefficient f in the Darcy – Weisbach equation*», Protection and Restoration of the Enviroment, Corfu, 2010
- [90] Davis, T., «*Moody Diagram*», Matlab Central, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.mathworks.com/> (Τελευταία επίσκεψη Φεβρουάριος 2014)
- [91] Elimelech, M., και Phillip, W., «*The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment*», Science, 333, 712-717, 2011
- [92] Cipollina A., Micale G., και Rizzuti L., «*Seawater desalination - conventional and renewable energy processes*», Green energy and technology volumes, p. 61, Springer, 2009
- [93] Αρβανίτης, Κ., «*Βελτιστοποίηση μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης με τη χρήση μαθηματικού προγραμματισμού*», Μεταπτυχιακή εργασία, ΕΜΠ, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΔΠΜΣ Συστήματα Αυτοματισμού, 2011
- [94] Yip, N., και Elimelech, M., «*Influence of natural organic matter fouling and osmotic backwash on pressure retarded osmosis energy production from natural salinity gradients*», Environ Sci Technol, DOI: 10.1021/es403207m, 2013
- [95] «*Primer for Municipal Wastewater Treatment Systems*», EPA, United States Environmental Protection Agency, Office of Water, 2004
- [96] «*Wastewater treatment plant design*», Water Environment Federation, USA, 2012
- [97] «*How it Works: Membrane Filtration & Spiral Wound Membranes*» Synder Filtration, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.snyderfiltration.com/> (Τελευταία επίσκεψη Φεβρουάριος 2014)
- [98] «*Membrane technology and media filtration*», Krones Hydronic, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.krones.com/> (Τελευταία επίσκεψη Φεβρουάριος 2014)
- [99] Επίσημη ιστοσελίδα εταιρίας Statkraft: <http://www.statkraft.com>
- [100] Thorsen, T., και άλλοι «*Method and a system for performing maintenance on a membrane used for pressure retarded osmosis*», US Patent 7,972,514 B2, 2011
- [101] Baker, R., «*Membrane Technology and Applications*», 2nd ed, J. Wiley: New York, 2004

- [102] Yip, N., Tiraferri, A., Phillip, W., Schiffman, J., Hoover, L., Kim, Y., και Elimelech M., «*Thin-film composite pressure retarded osmosis membranes for sustainable power generation from salinity gradients*», Environ Sci Technol, 45, 4360-4366, 2011
- [103] Yip, Y., Phillip, W., Schiffman, J., Hoover, L., και Chang, Y., «*Thin-film composite pressure retarded osmosis membranes for sustainable power generation from salinity gradients*», Environmental Science & Technology, 45, 4360-4369, 2011
- [104] McCutcheon, J., McGinnis, R., και Elimelech, M., «*Desalination by ammonia-carbon dioxide forward osmosis: Influence of draw and feed solution concentrations on process performance*», J Membrane Sci, 278, 114-123, 2006
- [105] Gray, G., McCutcheon, J., και Elimelech, M., «*Internal concentration polarization in forward osmosis: role of membrane orientation*», Desalination, 197, 1-8, 2006
- [106] Loeb, S., και Metha, G., «*A two-coefficient water transport equation for pressure-retarded osmosis*», J Membrane Sci, 4, 351-362, 1978
- [107] Mehta, G., και Loeb, S., «*Internal polarization in the porous substructure of a semipermeable membrane under pressure-retarded osmosis*», J Membrane Sci, 4, 261-265, 1978
- [108] Mehta, G., και Loeb, S., «*Performance of permasep B-9 and B-10 membranes in various osmotic regions and at high osmotic pressures*», J Membrane Sci, 4 (1978) 335-349
- [109] Jellinek, H., και Masuda, H., «*Theory and performance of an osmo-power pilot plant*», Ocean Eng, 8, 141-171, 1981
- [110] Achilli, A., Cath, T., και Childress, A., «*Power generation with pressure retarded osmosis: An experimental and theoretical investigation*», Journal of Membrane Science 343, 42-52, 2009
- [111] Alsvik, I., και Hagg, M., «*Pressure Retarded Osmosis and Forward Osmosis Membranes: Materials and Methods*», Polymers, 5, 303-327, 2011
- [112] Gray, G., McCutcheon, J. και Elimelech, M. «*Internal concentration polarization in forward osmosis: Role of membrane orientation*». Desalination, 197, 1–8, 2006
- [113] She, Q., Jin, X., και Tang, C., «*Osmotic power production from salinity gradient resource by pressure retarded osmosis: Effects of operating conditions and reverse solute diffusion*», J Membrane Sci, 401-402, 262-273, 2012
- [114] Hoek, E., Kim, A., και Elimelech, M., «*Influence of crossflow membrane filter geometry and shear rate on colloidal fouling in reverse osmosis and nanofiltration separations*», Environmental Engineering Science, 19, 357-372, 2002

- [115] Lee, K., Baker, R., και Lonsdale, H., «*Membranes for power generation by pressure-retarded osmosis*», *Journal of Membrane Science*, 8, 141-171, 1981
- [116] Ramon, G., Feinberg, B., και Hoek, E. «*Membrane-based production of salinity-gradient power*». *Energy Environ. Sci.*, 4, 4423–4434, 2011
- [117] Loeb, S., Titelman, L., Korngold, E., και Freiman, J., «*Effect of porous support fabric on osmosis through a Loeb_Sourirajan type asymmetric membrane*» *J. Membr. Sci.*, 129 (2), 243–249, 1997
- [118] Thorsen, T., και άλλοι «*Semi-permeable membrane for use in osmosis and method and plant for providing elevated pressure by osmosis to create power*», *US Patent 7,563,370 B2*, 2009
- [119] Wang, J., και άλλοι, «*A critical review of transport through osmotic membranes*», *Journal of Membrane Science* 454, 516-537, 2014
- [120] Helfer, F., Lemckert, C., και Anissimov, Y., «*Osmotic Power with Pressure Retarded Osmosis: Theory, Performance and Trends – A Review*», *J. Membr. Sci.*, Volume 453, 1, 337–358, 2014
- [121] Chou, S., Wang, R., Shi, L., She, Q., Tang, C., και Fane, A., «*Thin-film composite hollow fiber membranes for pressure retarded osmosis (PRO) process with high power density*», *J Membrane Sci*, 389, 25-33, 2012
- [122] Vos, K., Burris, F., και Riley, R., «*Kinetic study of hydrolysis of cellulose acetate in pH range of 2-10*», *J. Appl. Polym. Sci*, 10 (5), 825-832, 1996
- [123] Skillhagen, S., Dugstad, J., και Aaberg, R., «*Osmotic power – power production based on the osmotic pressure difference between waters with varying salt gradients*», *Desalination*, 220, 476-482, 2008
- [124] Skillhagen, S., «*Osmotic power – a new, renewable energy source*», *Desalin Water Treat*, 15, 271-278, 2010
- [125] Loeb, S., Honda, T., και Reali, M., «*Comparative mechanical efficiency of several plant configurations using supply a pressure-retarded osmosis energy converter*», *J Membrane Sci*, 51, 323-335, 1990
- [126] Skillhagen, S., και Aaberg, R., «*Power production based on the osmotic difference between fresh water and sea water*», in: *European Seminar on Offshore Wind and Other Marine Renewable Energies in Mediterranean and European Seas* (Owemes), Owemes, Citavecchia, Italy, 2006
- [127] Loeb, S., «*Large-scale power production by pressure-retarded osmosis, using river water and sea water passing through spiral modules*», *Desalination*, 143, 115-122, 2002
- [128] Dinger, F., Trondle, T., και Platt, U., «*Optimization of the energy output of osmotic power plants*», *J Renewable Energy*, vol. (7), 1-7, 2013

- [129] Ρανούτσος, Σ., «Μελέτη αντλητικού συγκροτήματος», ΤΕΙ Κρήτης, Τμήμα Μηχανολογίας, 2010
- [130] «Centrifugal Pumps», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.wermac.org/> (Τελευταία επίσκεψη Μάρτιος 2014)
- [131] Κουντούπη, Ε., «Μελέτη του φαινομένου της σπηλαίωσης σε φυγοκεντρική αντλία», Πτυχιακή εργασία, ΤΕΙ Κρήτης, Τμήμα Μηχανολογίας, 2012
- [132] «Positive Displacement Pumps», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.wermac.org/> (Τελευταία επίσκεψη Μάρτιος 2014)
- [133] «Water Turbine», Wikipedia, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://en.wikipedia.org/> (Τελευταία επίσκεψη Μάρτιος 2014)
- [134] Βουλβής, Κ., και Χουστουλάκης, Κ., «Σχεδίαση και κατασκευή διάταξης για εργαστηριακή προσομοίωση μικρής υδροηλεκτρικής μονάδας», Πτυχιακή εργασία, ΤΕΙ Πειραιά, Τμήμα Ηλεκτρολογίας, 2012
- [135] «Micro – Hydro Project: Group II», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.esru.strath.ac.uk/> (Τελευταία επίσκεψη Μάρτιος 2014)
- [136] «Turbine Selection», Heeco, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.heeco.com.pk/> (Τελευταία επίσκεψη Μάρτιος 2014)
- [137] «The Centrifugal Pump», Grundfos, Research and Technology, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.grundfos.com/> (Τελευταία επίσκεψη Οκτώβριος 2013)
- [138] Charman, S., «Ηλεκτρικές Μηχανές», Εκδόσεις Τζιόλα, 4^η έκδοση, 2010
- [139] Μαλατέστας, Π., «Ηλεκτρική Κίνηση», Εκδόσεις Τζιόλα, 3^η έκδοση, 2010
- [140] «Synchronous Motor», Deviantart, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://mark5150.deviantart.com/> (Τελευταία επίσκεψη Μάρτιος 2014)
- [141] Staalstrom A., και Gitmark, J., «Enviromental impacts by running an osmotic power plant, Norwegian Institute for Water Research», report no. 6307-2012 prepared for Statkraft Development AS, Oslo, Norway, 2012
- [142] Post, J., «Blue Energy: electricity production from salinity gradients by reverse electro dialysis», PhD thesis, Sub-department of Enviromental Technology, Wageningen University, Wageningen, Netherlands, 2009
- [143] Fouche, G., «Power of osmosis used to deliver eco-friendly energy», The Guardian, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.theguardian.com> [Τελευταία επίσκεψη Σεπτέμβριος 2013]
- [144] Στυλιανού, Π., και άλλοι, «Υδάτινα (ποτάμια) οικοσυστήματα», προγράμματα ανοικτών περιβαλλοντικών τάξεων «ΚΑΛΛΙΣΤΩ» Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.e-yliko.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Μάρτιος 2013)

- [145] Τερζίδου, Γ., «*Διερεύνηση της ανταλλαγής θαλάσσιων μαζών του όρμου Θεσσαλονίκης*», Διπλωματική εργασία, ΑΠΘ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2008
- [146] Ποδοματά, Μ., και Γιαννόπουλος, Π., «*Διερεύνηση θεωρίας παιγνίων στη διαχείριση αμμοχαλικοληψιών επί του Αλφειού ποταμού*», Ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων προς την αειφόρο ανάπτυξη, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2012
- [147] «*Αραχθος*», Υδατικό Διαμέρισμα Ηπείρου, Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, Διαθέσιμο τον δικτυακό τόπο: <http://www.minagric.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Μάρτιος 2013)
- [148] Αγγελίδης, Μ., και Αλούπη, Μ., «*Κατανομή μετάλλων στα παράκτια θαλάσσια ιζήματα των εκβολών του Ασώπου ποταμού*», Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος, 1997
- [149] «*Ποταμός Αχελώος*», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.cityofagrinio.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Μάρτιος 2013)
- [150] Μαυραποστόλου, Σ., «*Η διερεύνηση των Μετεωρολογικών Παραμέτρων και η προσέγγιση του Υδρολογικού Ισοζυγίου στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης του ποταμού Κόσυνθου, στον Νομό της Ξάνθης*», Πτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωλογίας – Γεωφυσικής, 2012
- [151] «*Εβρος (Θράκη)*», Βικιπαίδεια, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://el.wikipedia.org/> (Τελευταία επίσκεψη Μάρτιος 2013)
- [152] «*Εύηνος ποταμός*», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://evinochori.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Μάρτιος 2013)
- [153] «*Ευρώτας*», Υδατικό Διαμέρισμα Ανατολικής Πελοποννήσου, Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, Διαθέσιμο τον δικτυακό τόπο: <http://www.minagric.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Μάρτιος 2013)
- [154] Πιπεράγκας, Α., «*Εκτίμηση ρύπανσης του ποταμού Καλαμά από τη διάθεση υγρών αποβλήτων της πόλης Ιωαννίνων*», Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος, Π.Μ.Σ.: Περιβαλλοντική και Οικολογική Μηχανική, 2010
- [155] «*Τροποποίηση Περιφερειακού Σχεδιασμού Διαχείρισης Απορριμμάτων Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας Θράκης*», Κεφάλαιο 5, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.diaamath.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Μάρτιος 2013)
- [156] Αλμπάνης, Τ., «*Προβλήματα Ρύπανσης Αμβρακικού Κόλπου*», Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Χημείας, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://library.tee.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Μάρτιος 2013)
- [157] «*Ταμειντήρας Μόρνου*», ΕΥΔΑΠ, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.eydap.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Μάρτιος 2013)

- [158] «*Νέστος*», Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.kavalanet.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Μάρτιος 2013)
- [159] Τασιό, Ν., και Σαμπατακάκη, Π., «*Απόψεις για το υπόγειο υδατικό δυναμικό της Θεσσαλίας σε σχέση με τις ανάγκες και τα έργα εκτροπής του Αχελώου ποταμού*», Δημερίδα «*Έργα Εκτροπής Αχελώου ποταμού*», Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, 2012
- [160] «*Πηνειός*», Δήμος Λαρισαίων, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.larissa-dimos.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Μάρτιος 2013)
- [161] Σωτηροπούλου, Κ., «*Κατάρτιση πλημμυρικών χαρτών σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60 ΕΕ. Εφαρμογή στη Λεκάνη του Σπερχειού*», Μεταπτυχιακή εργασία, ΕΜΠ, Επιστήμη και Τεχνολογία Υδάτινων Πόρων, 2012
- [162] «*Στρυμόνας*», Υδατικό Διαμέρισμα Ανατολικής Μακεδονίας, Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, Διαθέσιμο τον δικτυακό τόπο: <http://www.minagric.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Μάρτιος 2013)
- [163] Θεριανός, Α., «*Η δίαιτα και η γεωγραφική κατανομή των απορροών του ελληνικού χώρου*», Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, Τόμος XI, Τεύχος 1, 1974
- [164] «*Ρύπανση ποταμού Καλαμά*», ΥΠΕΧΩΔΕ, Ειδική Υπηρεσία Επιθεωρητών Περιβάλλοντος (Ε.Υ.Ε.Π.), 2005
- [165] Σταθμός «*ΒΡΟΣΙΝΑ*», Μεταβλητή: Θερμοκρασία υγρού, ID: 621, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://dei.hydroscope.gr/> (Τελευταία επίσκεψη Νοέμβριος 2013)
- [166] Σύστημα Επιχειρησιακής Ωκεανογραφίας ΠΟΣΕΙΔΩΝ, Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών, <http://www.poseidon.hcmr.gr>
- [167] Dinger, F., Tröndle, T., και Platt, U., «*Optimization of the Energy Output of Osmotic Power Plants*», Hindawi Publishing Corporation, Journal of Renewable Energy, 2013
- [168] Pita, E., και Sierra, I., «*Seawater Intake Structures, International Symposium on Outfall Systems*», International Symposium on Outfall Systems May 15-18, 2011
- [169] Kleiterp, R., «*The feasibility of a commercial osmotic power plant*», Master Thesis, Department of Hydraulic Engineering, Delft University, 2012
- [170] Επίσημη ιστοσελίδα της εταιρίας Hubert, <http://www.hubert.nl>
- [171] Επίσημη ιστοσελίδα εταιρίας Koch: <http://www.kochmembrane.com/>
- [172] Quak, R., «*Feasibility of a power plant: Blue energy in the Dutch Delta*», Master thesis, Delft University of Technology, 2009
- [173] Επίσημη ιστοσελίδα εταιρίας Energy Recovery Inc.: <http://www.energyrecovery.com>

- [174] Συνέντευξη με τον Rodney B. Clemente, VP, Technical Service & Aftermarket, Energy Recovery Inc.
- [175] Επίσημη ιστοσελίδα εταιρίας Ossberger GmbH + Co: <http://www.ossberger.de>
- [176] Συνέντευξη με τον Holger Franke, της εταιρίας Ossberger GmbH + Co
- [177] «Average electricity consumption per electrified household», Energy Efficiency Indicators, World Energy Council, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.wec-indicators.enerdata.eu/household-electricity-use.html> (Τελευταία επίσκεψη Απρίλιος 2014)
- [178] Skilhagen, S., «Osmotic power: a new, renewable source of energy», in: 3rd Annual European Renewable Energy Markets, Platts, Berlin, 2012
- [179] Kho, J., «Osmotic power: A primer», Kachan & Co., San Fransisco, 2010
- [180] «Cents Per Kilowatt-Hour», Pure Energy Systems Wiki, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://peswiki.com/> (Τελευταία επίσκεψη Μάιος 2014)
- [181] Halper, M., «Osmotic power pushes closer to reality», in: Smartplanet, 20 June 2011, CBS Interactive, 2011. Διαθέσιμο: <http://www.smartplanet.com> [Τελευταία επίσκεψη Μάιος 2013]
- [182] «Nitto Denko/Hydranautics, Statkraft and Nitto Denko/Hydranautics cooperate to make osmotic power a reality, in: Statkraft Press Centre». Διαθέσιμο: <http://www.statkraft.com> Τελευταία επίσκεψη Μάιος 2013]
- [183] «Pressure Retarded Osmosis (PRO) research and piloting continues in Canada and Korea», Bluetech Research, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <http://www.bluetechresearch.com> (Τελευταία επίσκεψη Απρίλιος 2014)
- [184] Wick, G, «Power from salinity gradients», Energy, 3, 95-100, 1978
- [185] «The world factbook», Central Intelligence Agency (CIA), Washington, 2011. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.cia.gov> [Τελευταία επίσκεψη Δεκέμβριος 2013]
- [186] Sim, V., She, Q., Chong, T., Tang, C., Fane, A και Krantz, W., «Strategic co-location in a hybrid process involving desalination and Pressure Retarded Osmosis (PRO)», Membranes, 3, 98-125, 2013

Attn.:
Mr. Felekis Andreas

2014-05-15

GREECE

felekisandreas@gmail.com



OSSBERGER

Dear Sir,

your site may be utilised at the following conditions:

Hn (Net head)	=	142	meters
Q (Flow rate)	=	1	m ³ /sec.

With these values a

Power output at the turbine shaft of	1183	kW
Power output at the generator terminals of	1237	kVA at cos.phi = 0,9

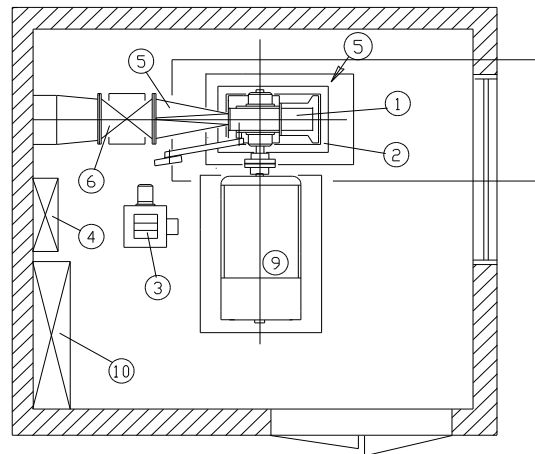
can be achieved. For a complete machine unit of an automatically regulated OSSBERGER hydro power station for **feeding into an existing current supply grid system** investments of:

EUR 550.000,--

need to be expected.

Scope of Delivery:

- ① OSSBERGER Turbine
- ② Base frame
- ③ Governor (hydraulic)
- ④ Governor (electric)
- ⑤ Reducer / Draft tube
- ⑥ Sluice Valve
- ⑨ Generator
- ⑩ Power switchboard



Prices: net, **CIP site – with truck accessible, without unloading (Incoterms 2010)**, packed, pipes unpacked, without erection, duty unpaid.

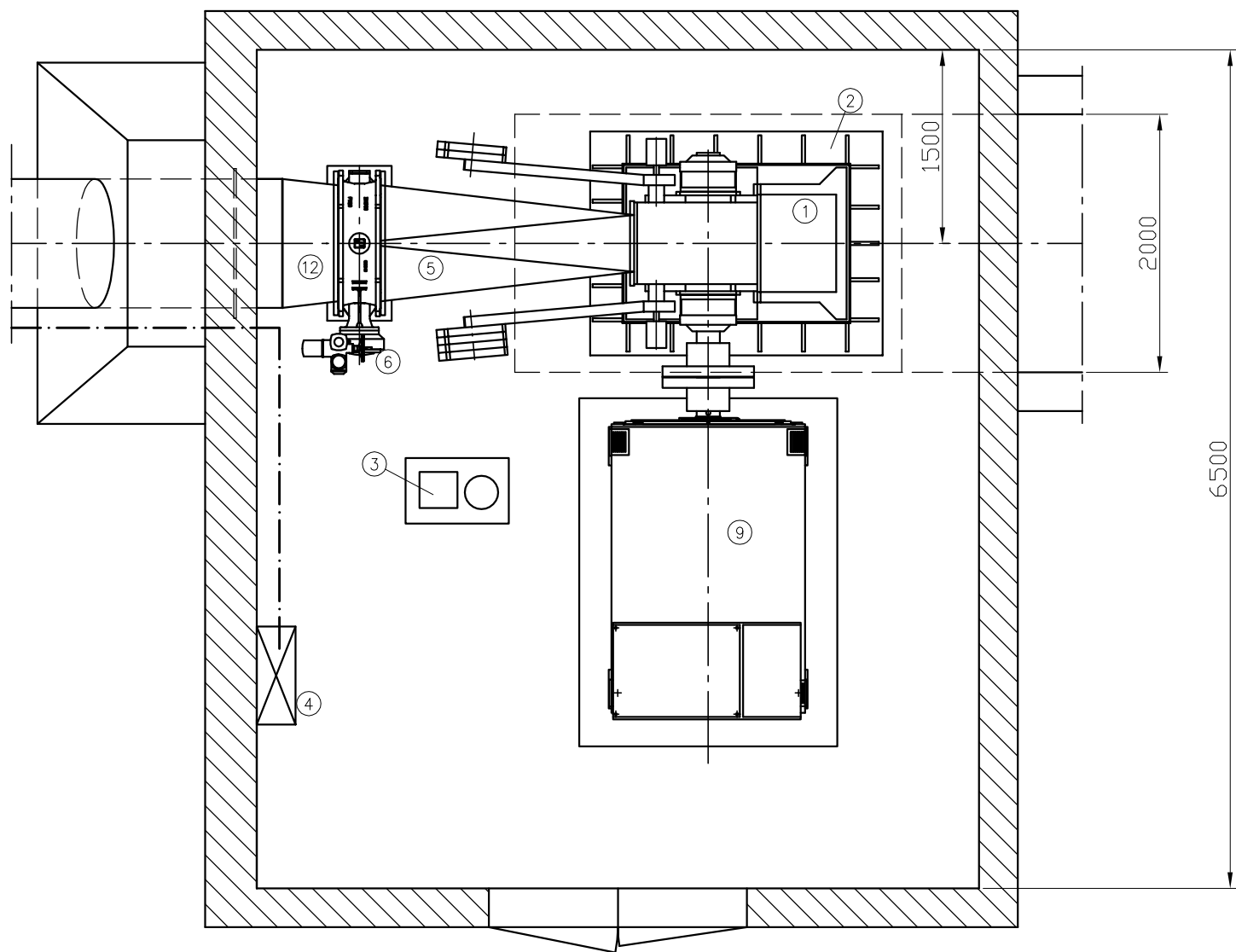
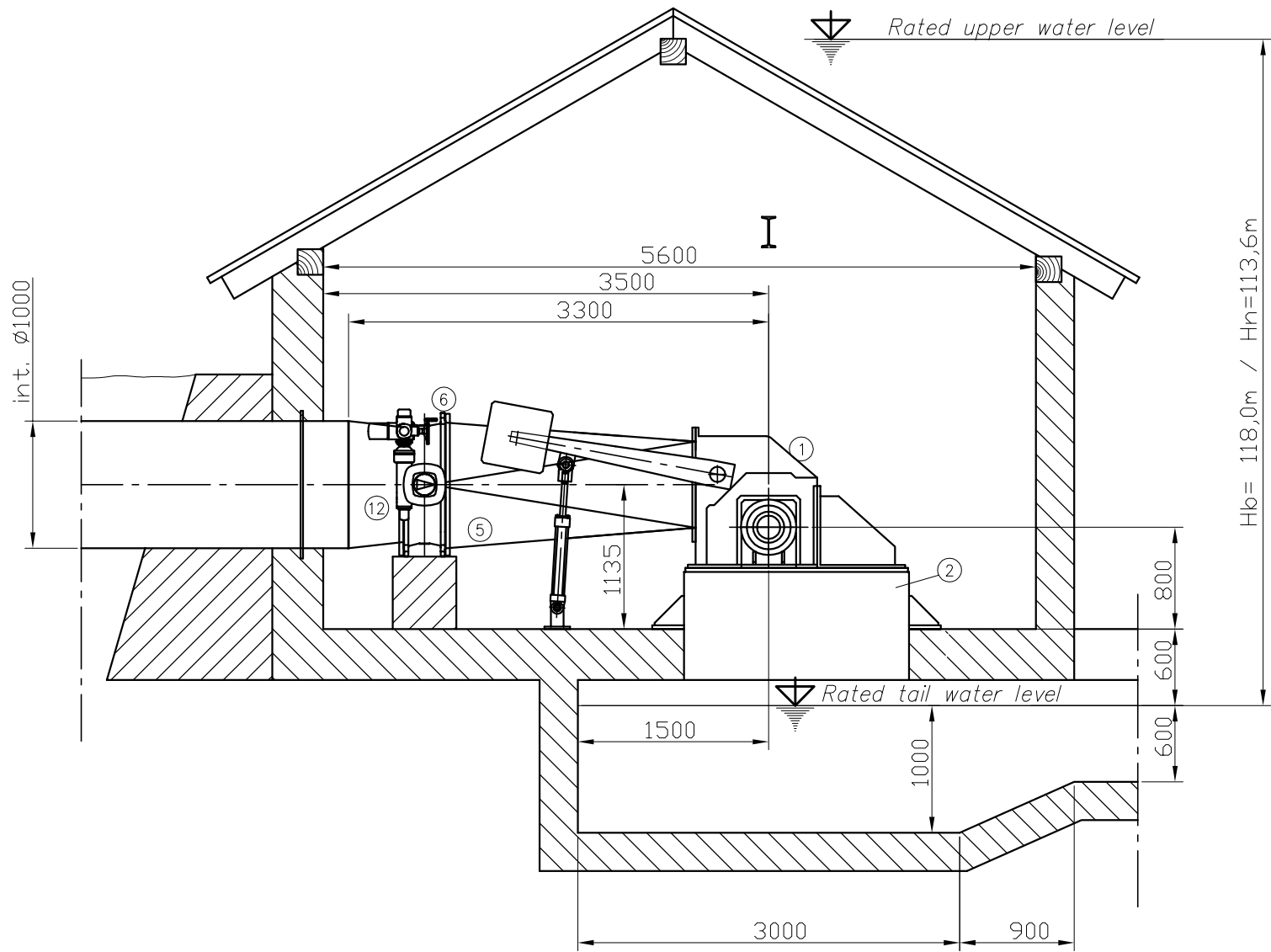
Our long experience stands for a tailor-made solution and an excellent functional quality as the preconditions for the rentability of your investment.



OSSBERGER GmbH + Co
Postfach 425 D-91773 Weissenburg/Germany
Tel.: 09141/977-0 Fax: 09141/977-20 E-Mail: info@ossberger.de

Budgetary Quote No. 8499-14

Project: GREECE - PRO Osmotic
Power Plant



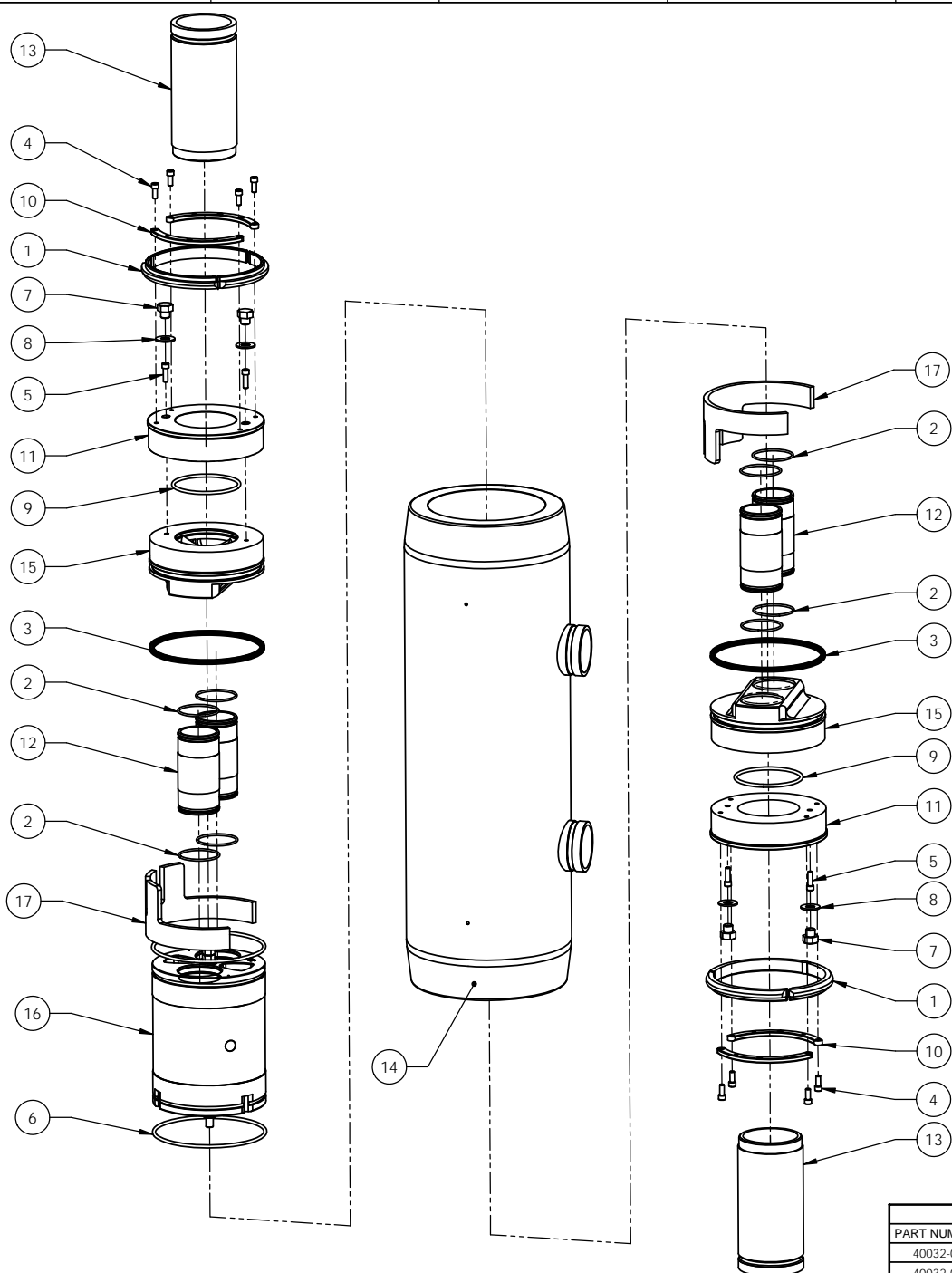
- ① OSSBERGER Turbine
Type: G8.024/18 g
- ② Base frame
- ③ Governor (hydraulic)
Type: S-2-DR/10
- ④ Governor (electric)
- ⑤ Reducer
- ⑥ Butterfly valve DN 900
- ⑨ Generator
 $n = 500$ r.p.m.
- ⑫ Tapered pipe $\phi 1000 / \phi 900$



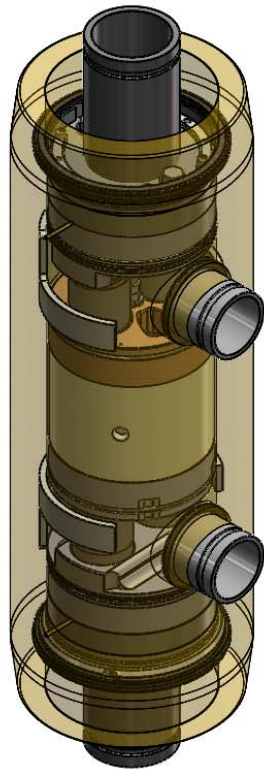
OSSBERGER GmbH+Co
P.O. Box 425
D-91773 Weißenburg/Bayern

ON-2311
 CAD
 Sheet 1

Project: Mosdeli, GREECE
 Scale: 1:50



ITEM NO.	Default Qty.	PART NUMBER	DESCRIPTION	MATERIAL
1	6	10013-01	SEGMENT, LOCK RING, 8"	316 SS
2	8	10162-01	O-RING, NSF, -231, EPDM	EPDM
3	2	10065-02	SEAL, QUAD RING, NSF, -442, EPDM	EPDM
4	8	10077-01	SHCS, 5/16-18 X 3/4" LG	316 SS
5	4	10078-20	SCRW, SHCS, 5/16-18 X 1.25 L, 316 SS	316 SS
6	2	10165-01	O-RING, NSF, -367, EPDM	EPDM
7	4	10234-01	SCRW, HEX, 5/8-11X.5L, NYLON	NYLON
8	4	10235-01	WSHR, FLAT SEALING, 5/8, EPDM	EPDM
9	2	10307-01	O-RING, NSF, -348, EPDM	EPDM
10	4	43056-01	RING, LOCK, 65 SERIES	FIBERGLASS
11	2	43070-01	PLATE, PORT BEARING, 4" THREAD	ALUMINUM
12	4	43094-01	INTERCONNECT, 2 1/2"	TITANIUM
13	2	43107-01	PORT, LP, STRAIGHT, 4" CONN	PVC
14	1	43110-01	HOUSING, 8", 3" SIDE PORT	SHELL: FIBERGLASS PORTS: SUPER DUPLEX
15	2	43116-01	PLATE, SEAL, 4" THREAD	PVC
16	1	43125-01	ASSY_CARTRIDGE,PX-Q300	-
17	2	43129-01	RING,THRUST,SIDE PORT	PVC



NOTES:
 1. INSTALL O-RINGS WITH GLYCERIN OR OTHER APPROVED WATER BASED LUBRICANT.
 2. REFER TO OPERATION AND MAINTENANCE MANUAL FOR ASSEMBLY & DISASSEMBLY INSTRUCTIONS AND REQUIREMENTS.

TABULATION BLOCK	
PART NUMBER	DESCRIPTION
40032-01	ASSY, PX-Q300, LABELED FOR SEAWATER SIDE UP (SEE PAGE 1 & 2)
40032-02	ASSY, PX-Q300, LABELED FOR CONCENTRATE SIDE UP (SEE PAGE 3)

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
 THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF ENERGY RECOVERY INC. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF ENERGY RECOVERY INC. IS PROHIBITED.

Released
 DRAWING STATUS

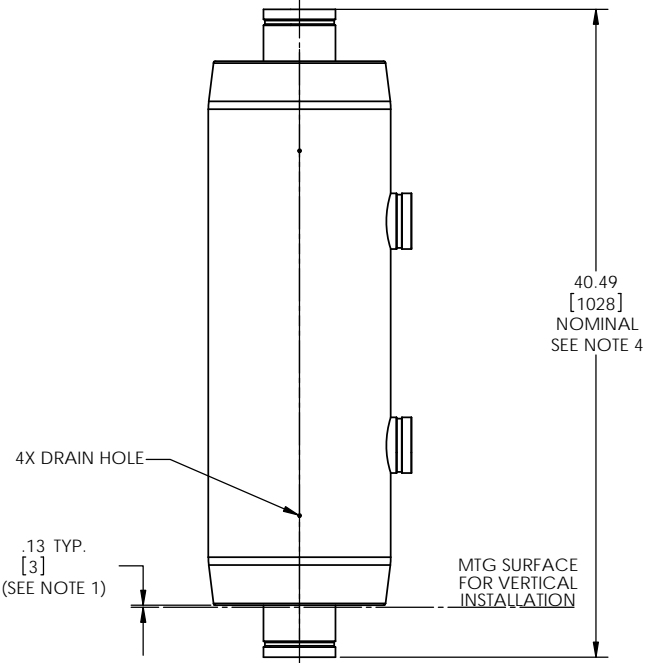
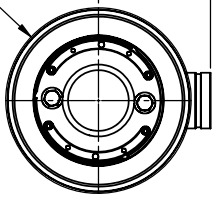
© 2011 ENERGY RECOVERY INC

INCH [MM]
 DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M (LATEST) FINISH:

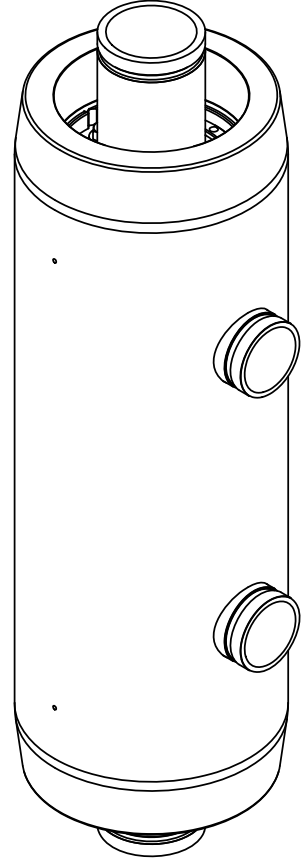
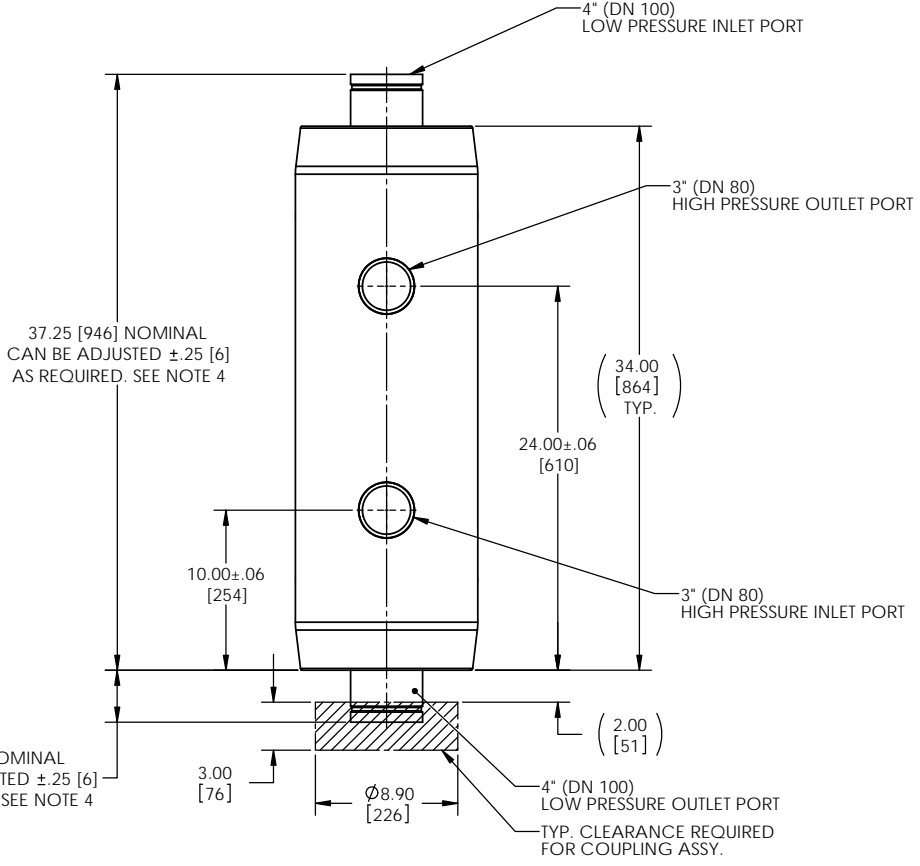
MATERIAL: SEE BOM

0	0300	INITIAL RELEASE	TDR	10/11/11
REV.	ECN NO.	DESCRIPTION	BY	DATE
REVISIONS				
		ENERGY RECOVERY INC 1717 Doolittle Drive, San Leandro, CA 94577 Ph. (510)483-7370 / Fax: (510)483-7371 www.energyrecovery.com		
		TITLE: ASSY, PX-Q300		
DRAWN	TDR	10/29/2011	SIZE C DWG. NO. 40032 REV 0	
CHECKED	JLA	10/29/2011	SCALE: 1:6 WEIGHT: SHEET 1 OF 3	
ENG APPR	BB	10/29/2011	THIRD ANGLE PROJECTION	

Ø11.6 MAX. [295]
7.00±.03 [178]



3.25 [82] NOMINAL CAN BE ADJUSTED ±.25 [6] AS REQUIRED. SEE NOTE 4



DO NOT USE INLET/OUTLET PORTS FOR LIFTING OR SUPPORT

- NOTES:
- SHIM BETWEEN HOUSING AND MTG SURFACE AS REQUIRED.
 - HOUSING MUST BE INDEPENDENTLY SUPPORTED, REFERENCE OPERATION AND MAINTENANCE MANUAL.
 - ALL PORTS FLEXIBLE TYPE. USE FLEXIBLE COUPLINGS. FLEXIBLE COUPLING MUST BE RATED FOR HIGH PRESSURE SEAWATER SERVICE AND INSTALLED PER MANUFACTURER RECOMMENDATIONS.
 - BOTH LP PORTS ARE ADJUSTABLE WITHIN INDICATED TOLERANCE. USE STRAP WRENCH TO THREAD PORT INTO OR OUT OF HOUSING AS NECESSARY.
 - DUAL DIMENSIONS IN BRACKETS ARE FOR REFERENCE ONLY.

TABULATION BLOCK	
PART NUMBER	DESCRIPTION
40032-01	ASSY, PX-Q300, LABELED FOR SEAWATER SIDE UP (SEE PAGE 1 & 2)
40032-02	ASSY, PX-Q300, LABELED FOR CONCENTRATE SIDE UP (SEE PAGE 1 & 3)

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF ENERGY RECOVERY INC. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF ENERGY RECOVERY INC. IS PROHIBITED.

Released

DRAWING STATUS

© 2011 ENERGY RECOVERY INC

INCH [MM]

DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M (LATEST) FINISH:

MATERIAL: SEE BOM

ENERGY RECOVERY INC
1717 Doolittle Drive, San Leandro, CA 94577
Ph. (510)483-7370 / Fax: (510)483-7371
www.energyrecovery.com

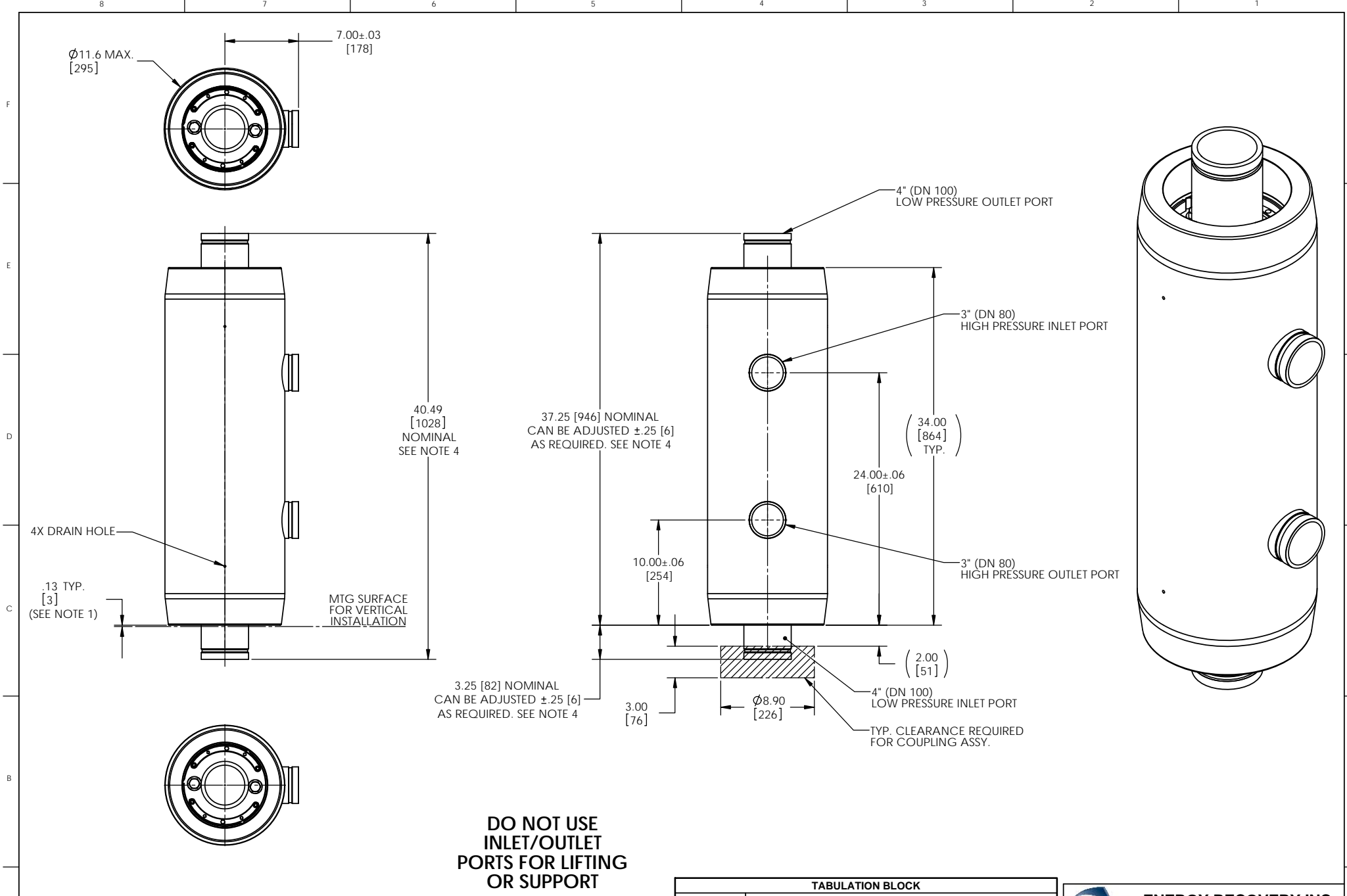
DRAWN: TDR 10/29/2011
CHECKED: JLA 10/29/2011
ENG APPR: BB 10/29/2011

TITLE: ASSY, PX-Q300

SIZE: **C** DWG. NO: 40032 REV: 0

SCALE: 1:6 WEIGHT: SHEET 2 OF 3

THIRD ANGLE PROJECTION



**DO NOT USE
INLET/OUTLET
PORTS FOR LIFTING
OR SUPPORT**

- NOTES:
1. SHIM BETWEEN HOUSING AND MTG SURFACE AS REQUIRED.
 2. HOUSING MUST BE INDEPENDENTLY SUPPORTED, REFERENCE OPERATION AND MAINTENANCE MANUAL.
 3. ALL PORTS FLEXIBLE TYPE. USE FLEXIBLE COUPLINGS. FLEXIBLE COUPLING MUST BE RATED FOR HIGH PRESSURE SEAWATER SERVICE AND INSTALLED PER MANUFACTURER RECOMMENDATIONS.
 4. BOTH LP PORTS ARE ADJUSTABLE WITHIN INDICATED TOLERANCE. USE STRAP WRENCH TO THREAD PORT INTO OR OUT OF HOUSING AS NECESSARY.
 5. DUAL DIMENSIONS IN BRACKETS ARE FOR REFERENCE ONLY.

TABULATION BLOCK	
PART NUMBER	DESCRIPTION
40032-01	ASSY, PX-Q300, LABELED FOR SEAWATER SIDE UP (SEE PAGE 1 & 2)
40032-02	ASSY, PX-Q300, LABELED FOR CONCENTRATE SIDE UP (SEE PAGE 1 & 3)

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
 THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF ENERGY RECOVERY INC. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF ENERGY RECOVERY INC. IS PROHIBITED.

Released
 DRAWING STATUS

© 2011 ENERGY RECOVERY INC

INCH [MM]
 DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M (LATEST)

MATERIAL: SEE BOM

ENERGY RECOVERY INC
 1717 Doolittle Drive, San Leandro, CA 94577
 Ph. (510)483-7370 / Fax: (510)483-7371
 www.energyrecovery.com

DRAWN: TDR 10/29/2011
 CHECKED: JLA 10/29/2011
 ENG APPR: BB 10/29/2011

TITLE: ASSY, PX-Q300

SIZE: **C** DWG. NO: 40032 REV: 0

SCALE: 1:6 WEIGHT: SHEET 3 OF 3

THIRD ANGLE PROJECTION



1717 Doolittle Dr.
San Leandro, CA
94577, USA
Phone: 1-510-483-7370
FAX: 1-510-483-7371

Energy Recovery, Inc.
Specifications Sheet
PX-Q300

REV	BY	CKD	REVISION	DATE
0	TR	JA	Initial release	1/1/2012
1	RBC	RAB	General update	2/13/2012
2	RBC	RAB	Corrected Typo	3/13/2012

DESCRIPTION:
TECHNICAL DATA SHEET, POSITIVE
DISPLACEMENT ENERGY RECOVERY
DEVICE

Sheet
Page 1 of 1
Document number:
80315-01

1. Part number 40032			2. Service		3. Reference			
OPERATING CONDITIONS	4	Liquid	Seawater	46	Performance	Standard		
	5	Operating Temperature	33°F-120°F (0.6-49°C)	47	Case Hydrotest	Standard		
	6	Max. Temperature	120°F (49°C)	48	Rotation Speed Test	Standard		
	7	Specific Gravity	1.03	49	Die Penetrant Test (ceramics)	Standard		
	8	Viscosity	1.060 cP @ 70°F (21.1°C)	50	Cavitation Test	Standard		
	9	Flow range	200 - 300 gpm (45 - 68m3/h)	51	Witnessed Test	Optional		
	10	Maximum High-Pressure Inlet Flow	300 gpm (68 m3/h)	52				
	11	Maximum Low-Pressure Outlet Flow	300 gpm (68 m3/h)	53				
	12	Maximum Inlet High Pressure	1200 psi (82.7 bar)	54				
	13	Maximum Inlet Low Pressure	145 psi (10 bar)	55				
	14	Minimum Discharge Pressure	12 psi (0.8 bar)	56				
	15	Filtration Requirement (Nominal)	20 µm	57				
	16			58	Outside Dimensions	Standard		
	17			59	Internal Components	Standard		
	18			60	Housing Dimensions	Standard		
	19			61	Ceramic Dimensions	Standard		
	PERFORMANCE	20	Peak Efficiency	98%	62	INSPECTION	Material Certificates	Standard
		21	Maximum High Pressure Differential	14.5 psi (1 bar) @ 300 gpm	63		Visual	Standard
		22	Maximum Low Pressure Differential	14.5 psi (1 bar) @ 300 gpm	64		Packing and Crating	Standard
23		Maximum Lubrication Flow	4.4 gpm (1 m3/h) @ 300 gpm	65				
24		Maximum Rotational Speed	800 rpm @ 300 gpm	66				
25		Maximum Salinity Increase at Membranes	3% @ 40% Recovery	67				
26		Noise Per ISO 3744	Less Than 85 dB(A)	68				
27		Warranted Efficiency***	97.2%	69				
MATERIALS	28	Housing**	GRP	70	SHIPPING WEIGHT AND DIMENSIONS	PX-Q300 unit Shipping Dimensions	47x17x17 inch 119x43x43 cm	
	29	Rotor, Sleeve, Endcover Assembly	Ceramic-alumina			PX-Q300 unit Shipping Weight	210 lbs. (95 kg)	
	30	Low Pressure Inlet Port Fitting	PVC			Dry PX-Q300 unit weight	200 lbs. (91 kg)	
	31	Low Pressure Outlet Port Fitting	PVC			Cartridge Shipping Dimensions	20x12x12 inch 51x31x31 cm	
	32	High Pressure Inlet Port Fitting	Superduplex (S32750 OR S32760)			Cartridge Weight	49 lbs. (22 kg)	
	33	High Pressure Outlet Port Fitting	Superduplex (S32750 OR S32760)			Shipping and Storage Temperature	33°F-120°F (0.6-49°C)	
	34	Internal Low Pressure Interconnector	Titanium					
	35	Fasteners/Hardware (non-wetted)	316SS					
	36	Tension Rod Assembly*	AL-6XN* / C-276					
	37	O-rings	EPDM					
PIPING CONNECTIONS	38			77				
	39	Low Pressure Inlet Port Fitting	4" (DN100) Grooved-end Flexible Pipe Coupling	78	MISCELLANEOUS	Internal Volume	830 in ³ (13,601 cm ³)	
	40	Low Pressure Outlet Port Fitting		79		Wet Weight	230 lbs. (104 kg)	
	41	High Pressure Inlet Port Fitting	3" (DN80) Grooved-end Flexible Pipe Coupling	80				
	42	High Pressure Outlet Port Fitting		81				
	43			82				
	44			83				
	45			84				

*AL-6XN is a registered trademark of Allegheny Ludlum

**Housing designed in accordance with the engineering standards of the Boiler and Pressure Vessel Code of the American Society of Mechanical Engineers.

***The standardized efficiency test is conducted under conditions of balanced flow, 1000psi pressure and the mid-flow for the PX model under test.

ERI RESERVES THE RIGHT TO MAKE SPECIFICATION CHANGES AT ANY TIME WITHOUT PRIOR NOTICE.

PRICE: sales@energyrecovery.com	
MANUFACTURER: Energy Recovery Inc	MODEL: PX-Q300



1717 Doolittle Dr.
San Leandro, CA
94577, USA
Phone: +1(510)483-7370
Fax: +1(510)483-7371

ENERGY RECOVERY, INC.
PX-Q300

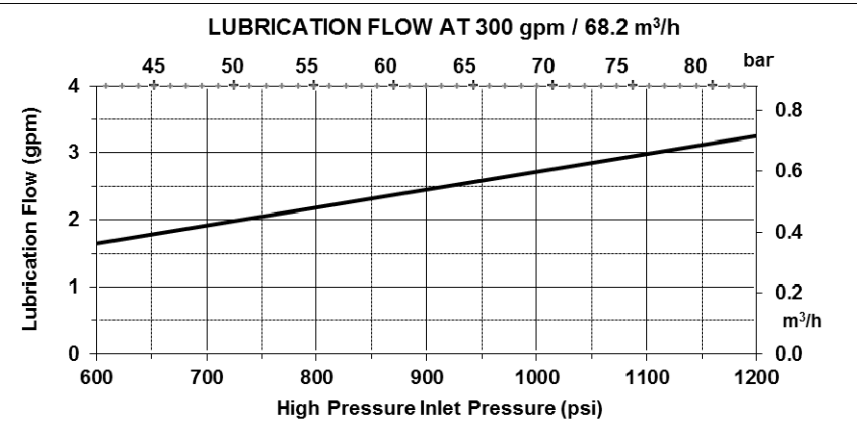
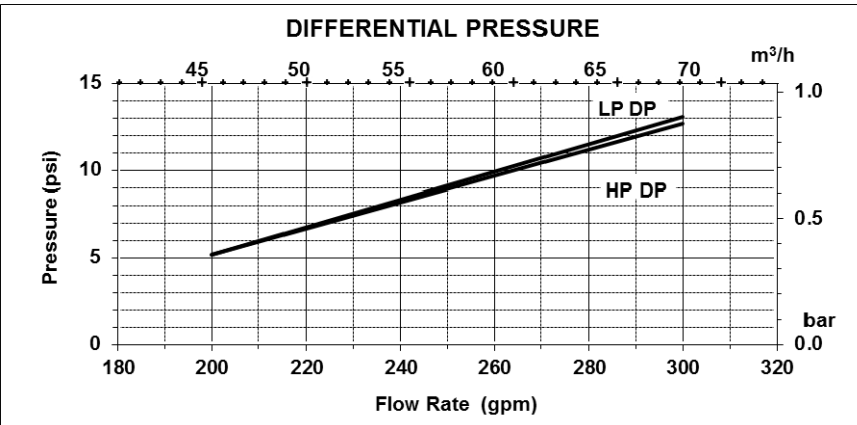
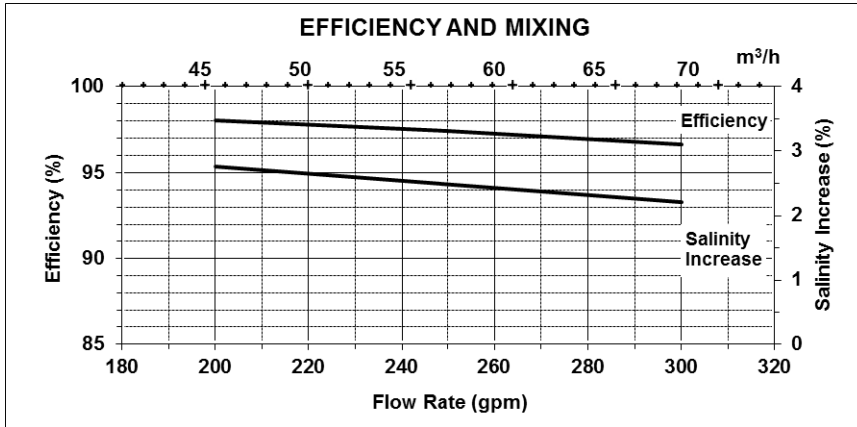
SHEET
1 of 1

DOCUMENT NUMBER
80328-01 Rev 0

MANUFACTURER
ERI

REV	BY	CKD	REVISION	DATE
0	JLA	APT	Initial Release	1/19/12

PERFORMANCE CURVES, POSITIVE
DISPLACEMENT ENERGY RECOVERY
DEVICE



NOTE: See ERI document number 80008-01 for definitions and test conditions.