

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ  
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**



**ΘΕΜΑ : ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΜΕ ΩΣΜΟΣΗ  
ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΚΟΥΡΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ  
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΧΙΛΙΤΙΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**ΝΕΑ ΜΗΧΑΝΙΩΝΑ**

**2015**

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ  
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ: : ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΜΕ  
ΩΣΜΟΣΗ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΚΟΥΡΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

**A.M : 4806**

**ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ :**

**Βεβαιώνεται η ολοκλήρωση της παραπάνω πτυχιακής εργασίας**

**Ο καθηγητής**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

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

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

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

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

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

Το σημαντικότερο μέρος της διεργασίας αποτελούν τα στοιχεία μεμβρανών, δηλαδή οι διαμορφώσεις των μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης μέσα στα δοχεία πίεσης.

## **ABSTRACT**

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

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

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

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

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

The most important parts of the whole procedure are, undoubtedly, the membrane modules, where it takes place the desalination. These modules consist of the membranes, in various formations, and the pressure vessels

# Πρόλογος

## ΤΟ ΝΕΡΟ ΣΤΟΝ ΚΟΣΜΟ

### Η σπουδαιότητα του νερού στη ζωή μας

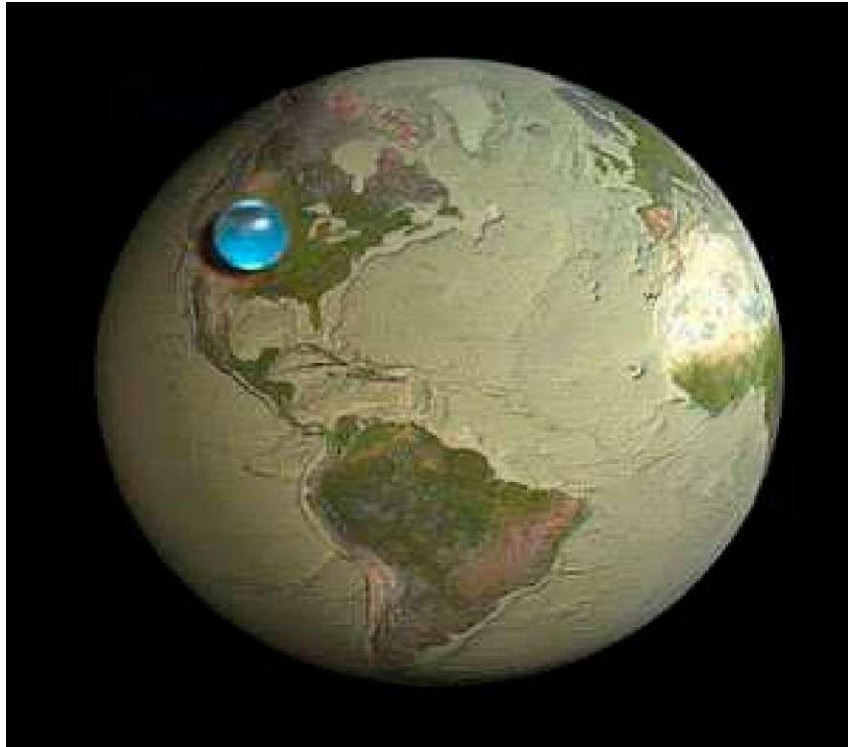
Το νερό είναι ένα μοναδικό υγρό και αποτελεί πηγή ζωής για τον πλανήτη και τους κατοίκους του. Χωρίς αυτό δεν υπάρχει πλανήτης δεν υπάρχει ζωή ! Είναι απαραίτητο σε όλες τις γνωστές μορφές ζωής καθώς όλοι οι οργανισμοί αποτελούνται κυρίως από νερό. Οι άνθρωποι και τα ζώα έχουν στο σώμα τους 55%- 80% νερό, ενώ τα κύτταρα περιέχουν έως και 90%. Το νερό συναντάται στις τρεις κοινές καταστάσεις της ύλης στη γη. Στερεή (πάγος, χιόνι), υγρή (νερό πηγών, ποταμών, θαλασσών) και αέρια (υδρατμοί στην ατμόσφαιρα).

Το νερό στη Γη κινείται συνεχόμενα μέσω του «κύκλου του νερού»(μια φυσική ανακύκλωση) που περιλαμβάνει την εξάτμιση (κυρίως των θαλασσών), τη μεταφορά της υγρασίας, τη συμπύκνωση, την κατακρήμνιση (με βροχή, χιόνι, χαλάζι κ.ά.) και την αποστράγγιση με την οποία το μεγαλύτερο ποσοστό επιστρέφει στις θάλασσες.

Ειδικοί της Γεωλογικής Υπηρεσίας των ΗΠΑ, υποστηρίζουν ότι όλο το νερό του πλανήτη θα μπορούσε να χωρέσει σε μια σχετικά μικρή φούσκα, η οποία θα είχε διάμετρο 1384 χλμ.

Η εκτίμηση αφορά το νερό των ωκεανών, των ποταμών των λιμνών αλλά και των υπόγειων αποθεμάτων νερού. Στον υπολογισμό συμπεριλήφθηκε και η ποσότητα του νερού που εκτιμάται ότι υπάρχει σε κάθε μορφή στον πλανήτη: στους παγετώνες, στην ατμόσφαιρα (νέφη, υδρατμοί κλπ.) ακόμη και στους ζωντανούς οργανισμούς. Η εκτίμηση δείχνει ότι αν και το νερό καλύπτει το 70% της επιφάνειας της Γης, η μάζα του είναι δυσανάλογα μικρή. Περίπου το 70% της επιφάνειας της γης είναι καλυμμένο με νερό, από το οποίο σχεδόν το 97% βρίσκεται στους ωκεανούς και στις θάλασσες και είναι ιδιαίτερα αλατούχο άρα δεν είναι κατάλληλο για πόση, άρδευση ή βιομηχανική χρήση.

Μόνο το 2,5%-3% του νερού της γης είναι γλυκό (πόσιμο) και λιγότερο από το 0,3% βρίσκεται στα ποτάμια τις λίμνες και την ατμόσφαιρα.



Μέχρι τα μέσα του προηγούμενου αιώνα ο άνθρωπος φαινόταν να μην απειλεί σοβαρά ούτε τους υδάτινους πόρους ούτε και τον ρυθμό αποκατάστασης τους από τη φύση. Τις τελευταίες όμως δεκαετίες λόγω της ραγδαίας αύξησης του πληθυσμού της γης παρατηρείται ότι προκαλεί σοβαρές διαταραχές, τόσο στην υπερεκμετάλλευση των υδατικών πόρων όσο και με την υποβάθμιση τους λόγω ρύπανσης.

Είναι γεγονός ότι ο πληθυσμός της γης κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα τριπλασιάστηκε και αυτό είχε σαν αποτέλεσμα η χρήση του νερού να εξαπλασιαστεί.

Πολλοί έχουν προβλέψει ότι το καθαρό νερό θα γίνει το πετρέλαιο του μέλλοντος. Οι εκτιμήσεις για το ετήσιο υδατικό δυναμικό της χώρας μας ποικίλουν. Σύμφωνα όμως με τη βάση δεδομένων AQUASTAT του FAO (Διεθνής Οργάνωση Τροφίμων και Γεωργίας) οι υδατικοί πόροι της χώρας μας ανέρχονται στα 74,2 δις. κυβικά μέτρα. Από αυτά περίπου το 85,1% του συνολικού υδατικού δυναμικού αποτελείται από επιφανειακά νερά, και το 10,6% είναι καρστικά υπόγεια νερά.

Παρόλα αυτά εμφανίζονται σημαντικά προβλήματα, λόγω της γεωγραφικής ανισοκατανομής του υδατικού δυναμικού (συγκέντρωση στα δυτικά και βόρεια της χώρας, λειψυδρία στα νησιά) και της ανορθολογικής διαχείρισής του. Το 86% των

συνολικών υδατικών πόρων της χώρας μας χρησιμοποιείται για αγροτική χρήση, περίπου το 11% για αστική χρήση και 3% για βιομηχανική και ενεργειακή χρήση.

Τα μεγαλύτερα μερίδια για αγροτική χρήση κατέχουν οι περιοχές της Θεσσαλίας (25,1%), της Ανατολικής Στερεάς (12,5%) και της Κεντρικής Μακεδονίας (10,5%). Για την αστική χρήση που το μεγαλύτερο ποσοστό της πηγαίνει στη ύδρευση, πρωτιά κατέχει η Αττική (37,1%) ζήτηση υπερτριπλάσια της Κεντρικής Μακεδονίας (10,5%). Αρκετά υδατικά διαμερίσματα της χώρας είναι ελλειμματικά κατά τους θερινούς μήνες, λόγω των αυξημένων αναγκών του γεωργικού και του τουριστικού τομέα. Το πρόβλημα εντοπίζεται κυρίως στα νησιά του Αιγαίου και τη Θεσσαλία.

Η υπερβολική χρήση άριστης ποιότητας πόσιμου νερού προερχόμενου από γεωτρήσεις, για άρδευση αποτελεί κατασπατάληση και υπερεκμετάλλευση πολύτιμων και δύσκολα ανανεώσιμων πόρων.

# Κεφάλαιο 1

## 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ

Ως η καταλληλότερη λύση για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας, θεωρείται η χρήση μονάδων αφαλάτωσης θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού η οποία αρχίζει να υιοθετείται από διάφορες χώρες όλο και περισσότερο. Με τον όρο "αφαλάτωση" εννοούμε οποιαδήποτε διεργασία αφαίρεσης αλάτων από μια αλατούχα ουσία και κυρίως από αλατούχα ύδατα. Άρα η αφαλάτωση είναι μια μέθοδος ανάκτησης πόσιμου νερού από θαλασσινό νερό, υφάλμυρα ποτάμια ή λίμνες.

Τεχνολογίες αφαλάτωσης είναι σε χρήση σε όλο τον κόσμο εξυπηρετώντας διάφορους σκοπούς, συμπεριλαμβανομένης της παροχής πόσιμου νερού για οικιακή και δημόσια χρήση, βιομηχανικές εργασίες και σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης νερό για τους πρόσφυγες και για στρατιωτικές επιχειρήσεις. Αφαλάτωση χρησιμοποιείται ακόμα σε πολλά ποντοπόρα πλοία και σε υποβρύχια.

Η αφαλάτωση εφαρμόζεται κυρίως σε περιοχές με ξηρό κλίμα, άνυδρες με πρόσβαση όμως σε θαλασσινό νερό. Έτσι η εγκατάσταση μονάδων αφαλάτωσης σε πολλές άνυδρες και με ελάχιστη ποσότητα διαθέσιμου νερού περιοχές είναι ζωτικής σημασίας για την οικονομική τους ανάπτυξη. Συγκεκριμένα η αφαλάτωση είναι μια σημαντική πηγή νερού σε άνυδρες περιοχές της Μέσης Ανατολής (Περσικός Κόλπος, Βόρεια Αφρική) τα νησιά της Καραϊβικής και άλλες περιοχές όπου η φυσική διαθεσιμότητα του πόσιμου νερού δεν επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση και όπου οι παραδοσιακές επιλογές ύδρευσης ή η μεταφορά νερού από άλλες περιοχές έχουν χαρακτηριστεί αδύνατες ή αντιοικονομικές.

## 1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

350 πχ Ο Αριστοτέλης πειραματίζεται με τον διαχωρισμό νερού και αλατιού. 200μχ Ναυτικοί μεταφέρουν μικρές πρωτόγονες μονάδες αφαλάτωσης στα πλοία τους.

16ος αιώνας Τα πλοία που εξερευνούν τους ωκεανούς μεταφέρουν μονάδες αφαλάτωσης οι οποίες επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν μόνο σε περίπτωση ανάγκης.



1850 Ο Αμερικανός μηχανικός Norbert Rillieux κατοχυρώνει πατέντες για μεθόδους απόσταξης της ζάχαρης που ελαττώνουν τις απαιτήσεις ενέργειας κατά 80%.

1890 Στην Δυτική Αυστραλία λόγω του ξηρού κλίματος κατασκευάζονται μονάδες αφαλάτωσης (πάντα με την θερμαντική μέθοδο). Το νερό ήταν ακριβό αφού τα 4,5 λίτρα νερού κόστιζαν όσο το ένα τρίτο του μισθού του ανειδίκευτου εργάτη.

Τέλη 19ου αιώνα Η μέθοδος απόσταξης του Rillieux αρχίζει να εφαρμόζεται και στην αφαλάτωση.

1950 Η Αμερικανική κυβέρνηση ιδρύει το Τμήμα Αλμυρού Νερού με σκοπό να υποστηρίξει την έρευνα για την αφαλάτωση.

1950 Ξεκινά μια νέα μέθοδος θερμαντικής αφαλάτωσης και εφαρμόζεται σε χώρες της Μέσης Ανατολής

1960 Ξεκινούν στο πανεπιστήμιο UCLA της Καλιφόρνια τα πειράματα πάνω στην ανάστροφη όσμωση με την κατασκευή των πρώτων μεμβρανών από δύο ερευνητές, τους Sydney Loeb και Shrinivasa Sourirajan. 1965 Η πρώτη πειραματική μονάδα αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού με την μέθοδο της ανάστροφης όσμωσης

Τέλοςδεκαετίας '70 Ο John Cadotte του America's Midwest Research Institute και του Film Tec Corporation εφεύρει μια πολύ βελτιωμένη μεμβράνη που θα χρησιμοποιηθεί καθολικά στα επόμενα χρόνια.

1980 Η πρώτη μονάδα αφαλάτωσης που εξυπηρετεί τον Δήμο, ξεκινά την λειτουργία της στην Jeda της Σαουδικής Αραβίας

1990-2003 Το κόστος της αφαλάτωσης πέφτει στο 1 τρίτο.

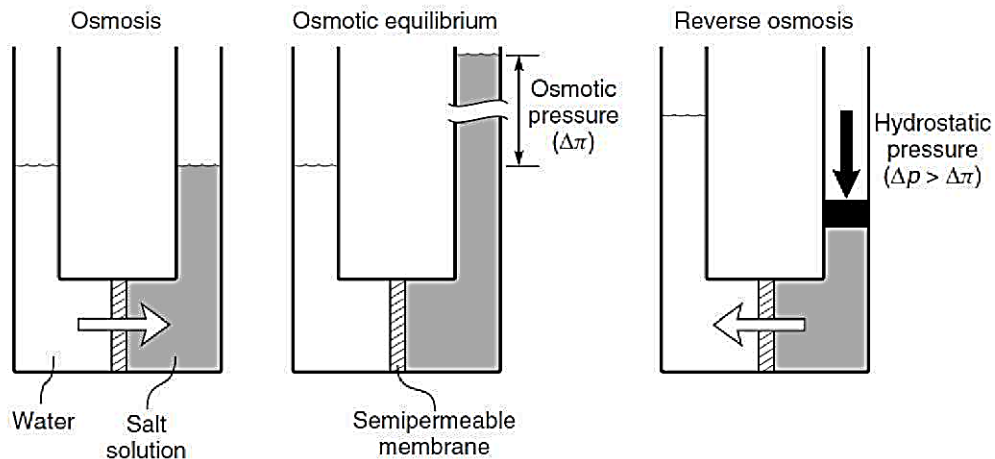
2006 Μελέτη που δημοσιεύεται στο επιστημονικό περιοδικό Science αναφέρει ότι η χρήση νανοσωλήνων άνθρακα μπορεί να βελτιώσει πολύ την παραγωγή καθαρού νερού.

2006 Μελέτη στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αφαλάτωσης από το Pacific Institute (όχι απαγορευτικές αλλά ούτε και αμελητέες).

## Κεφάλαιο 2

### 2.1 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΟΣΜΩΣΗ - ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η διεργασία της αντίστροφης όσμωσης είναι συνέπεια της εφαρμογής μιας εξωτερικής πίεσης, μεγαλύτερης της οσμωτικής, σε ένα πυκνό διάλυμα το οποίο διαχωρίζεται από ένα αραιότερο διάλυμα με μία ημιπερατή μεμβράνη.



Εικόνα: Σχηματική επεξήγηση αντίστροφης όσμωσης. Πηγή: Baker R., Membrane technology and applications, 2nd edition, p.30, Wiley, 2004

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

Η κινητικότητα των μορίων του νερού στη διεπιφάνεια νερού - μεμβράνης είναι μεγαλύτερη από αυτή των αλάτων, με αποτέλεσμα τα άλατα να απορρίπτονται από την μεμβράνη και να παραμένουν στο θάλαμο με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση. Το καθαρό νερό που διαχέεται μέσα από την μεμβράνη ελαττώνει την πίεση και αυξάνει την συγκέντρωση των αλάτων του καθαρού νερού, ενώ συγχρόνως αραιώνει το πυκνότερο διάλυμα (αλμυρό νερό) και αυξάνει την πίεση στο αντίστοιχο θάλαμο. Η αύξηση αυτή εμφανίζεται ως υδροστατική διαφορά της στάθμης των δύο διαλυμάτων. Η αύξηση αυτή της υδροστατικής πίεσης έχει ως συνέπεια την βαθμιαία ελάττωση της ροής του νερού. Σε κάποιο σημείο της διεργασίας, η αύξηση της υδροστατικής πίεσης αντισταθμίζει τη ροή και αποκαθίσταται μια κινητική

ισορροπία, όπου το νερό ρέει και προς τις δύο κατευθύνσεις με τον ίδιο ρυθμό. Στο σημείο ισορροπίας, η υδροστατική διαφορά πίεσης ονομάζεται οσμωτική πίεση ( $\Delta\Pi$ ) και το φαινόμενο συνολικά καλείται όσμωση.

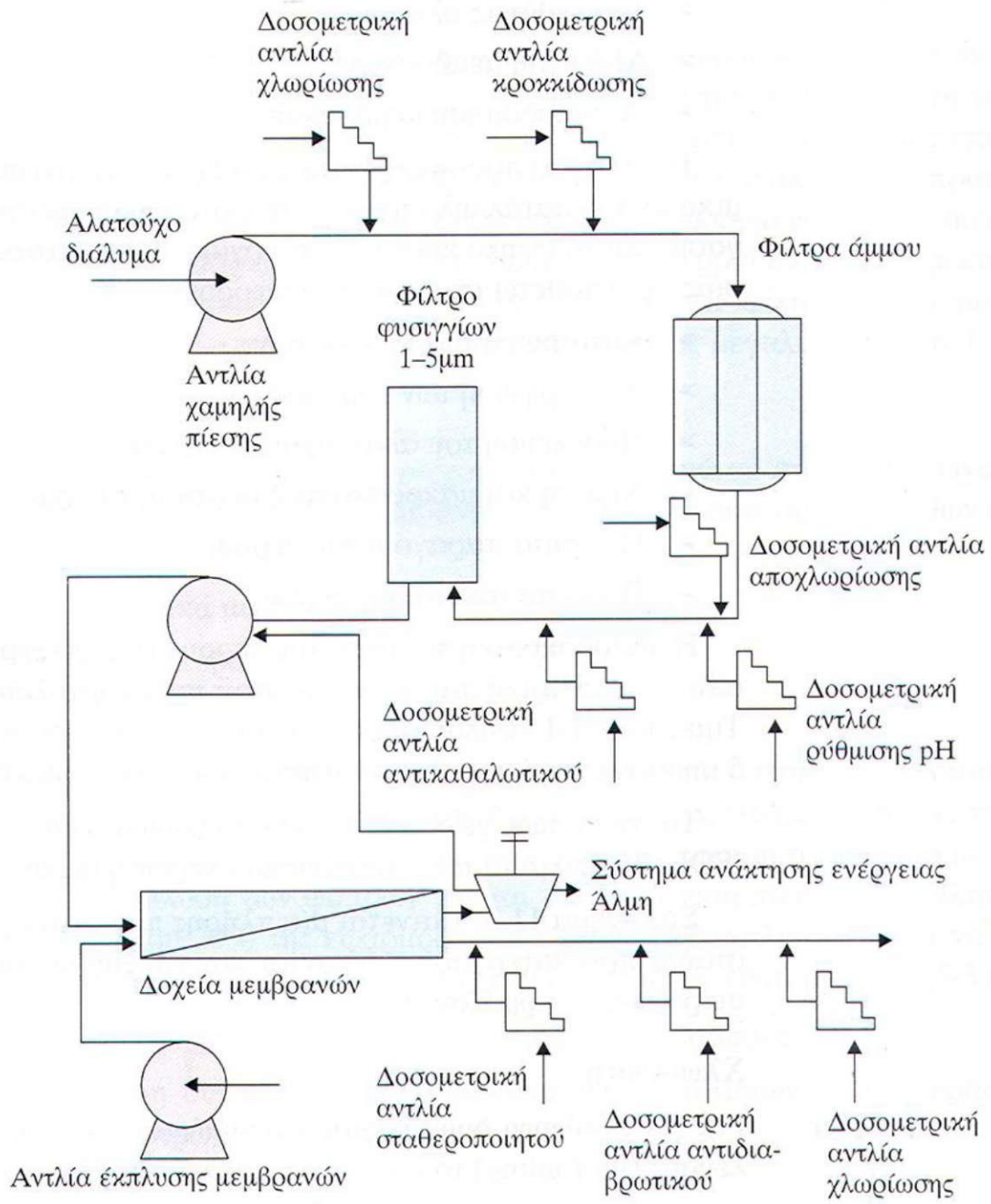
Εάν εφαρμοστεί μια εξωτερική πίεση ( $\Delta P$ ) στην επιφάνεια του αλμυρού νερού, μεγαλύτερη της οσμωτικής, το φαινόμενο της όσμωσης αντιστρέφεται και τα μόρια του νερού διαχέονται από το θάλαμο υψηλής συγκέντρωσης προς το θάλαμο χαμηλής συγκέντρωσης. Η ταχύτητα ροής του νερού είναι ανάλογη με την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

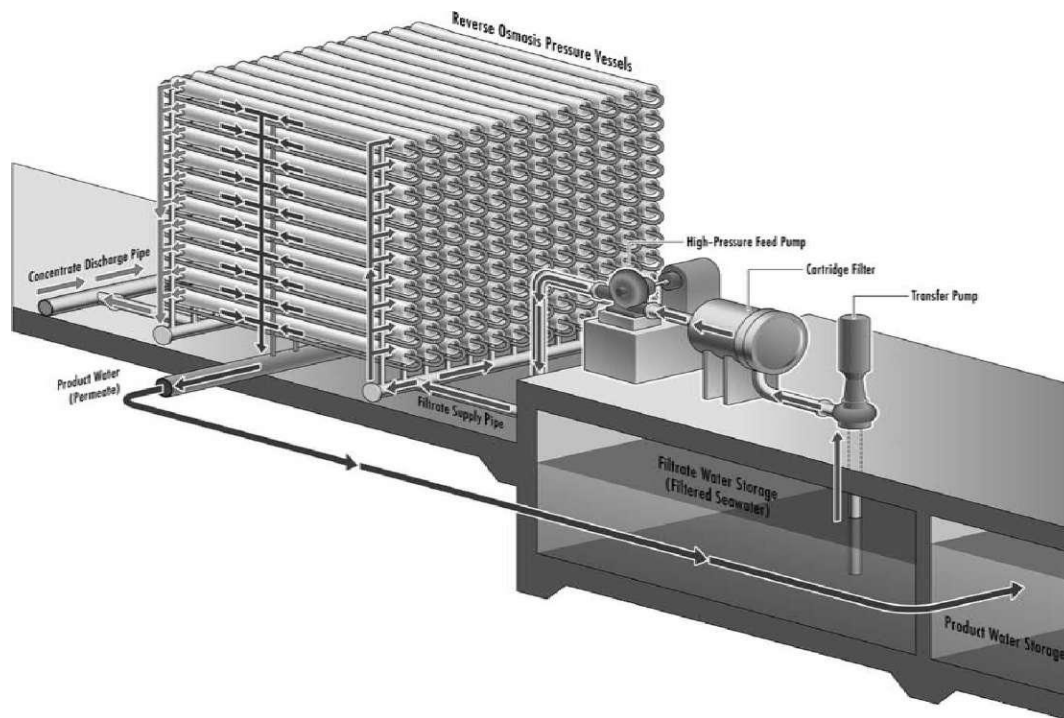
## **2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΟΣΜΩΣΗ**

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

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

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





Εικόνα: Τρισδιάστατη απεικόνιση διάταξης μονάδας αφαλάτωσης RO

### 2.3 ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ

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

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

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

### 2.4 ΠΡΟΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ

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

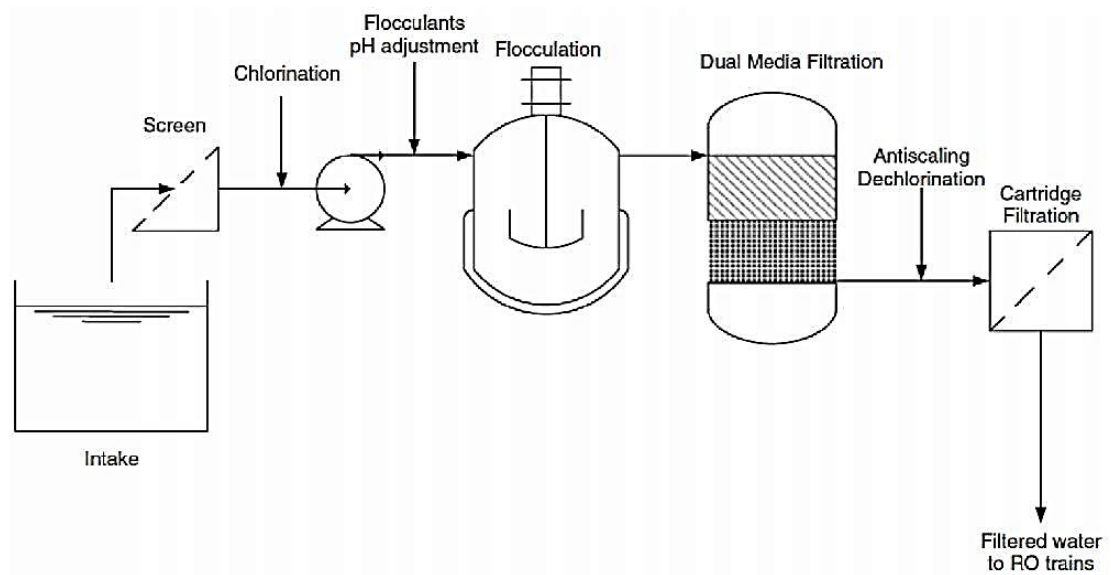
Πέραν των αλάτων, περιέχονται διάφορα αιωρούμενα συστατικά, κολλοειδείς ουσίες και μικροοργανισμοί, όπου η παρουσία τους ρυπαίνει και αποσθρώνει τις

μεμβράνες, ελαττώνοντας έτσι την απόδοση της εγκατάστασης και το χρόνο ζωής των μεμβρανών. Ειδικότερα παρουσιάζονται προβλήματα όπως:

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

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

- Διαχωρισμός σωματιδίων μεγάλου μεγέθους (> 10mm) με στατικά κόσκινα/σχάρες (screens)
- Προσθήκη χλωρίου (chlorination), κροκιδωτικών μέσων (flocculation agents), και οξέως για τη ρύθμιση του pH (acid addition)
- Πήξη/κροκίδωση (coagulation/flocculation)
- Φιλτράρισμα μέσω φίλτρων άμμου και φίλτρων διπλού μέσου άμμου - ανθρακίτη (slow sand filters/dual media sand - anthracite filters)
- Αποχλωρίωση / καθαρισμός επικαθίσεων (dechlorination/antiscalants)



- Φιλτράρισμα σωματιδίων μεγέθους 5-10 μm μέσω φίλτρων τύπου cartridge (cartridge filters)

## 2.5 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΠΡΟΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕΣΩ ΑΝΤΛΙΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

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



Εικόνα: Αντλία υψηλής πίεσης κατάλληλη για αντίστροφη όσμωση

## **2.6 ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΜΟΝΑΔΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ**

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

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

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

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

## **2.7 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ**

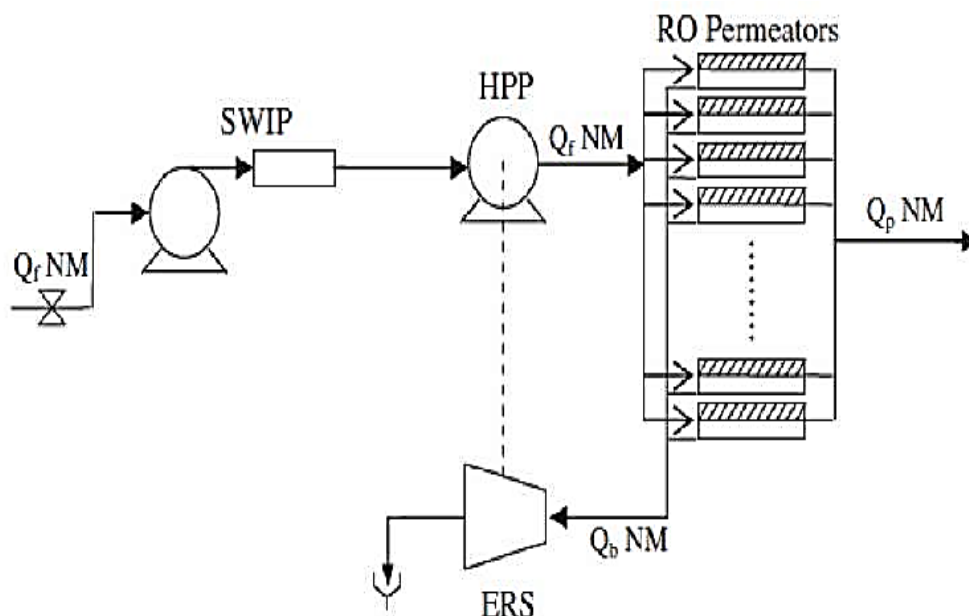
Τα στοιχεία μεμβράνης, εκτός της περίπτωσης των στοιχείων με δίσκους και πλαίσια, τοποθετούνται παράλληλα, σε σειρά ή σε συνδυασμό, ώστε να δημιουργηθεί μια διαμόρφωση κατάλληλη για τη αποτελεσματικότητα της διεργασίας. Η διαμόρφωση επιλέγεται ανάλογα με τις συνθήκες του νερού τροφοδοσίας και κυρίως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

### **ί. Διαμόρφωση μονού σταδίου**

Στην περίπτωση αυτή τα στοιχεία (modules) τοποθετούνται παράλληλα με κοινή είσοδο και έξοδο. Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα ανακυκλοφορίας της άλμης για μεγαλύτερη ανάκτηση. Είναι πολύ δημοφιλής διαμόρφωση, καθώς χρησιμοποιείται από πολλές μικρές και μεσαίες μονάδες παγκοσμίως. Η ανάκτηση που επιτυγχάνουν



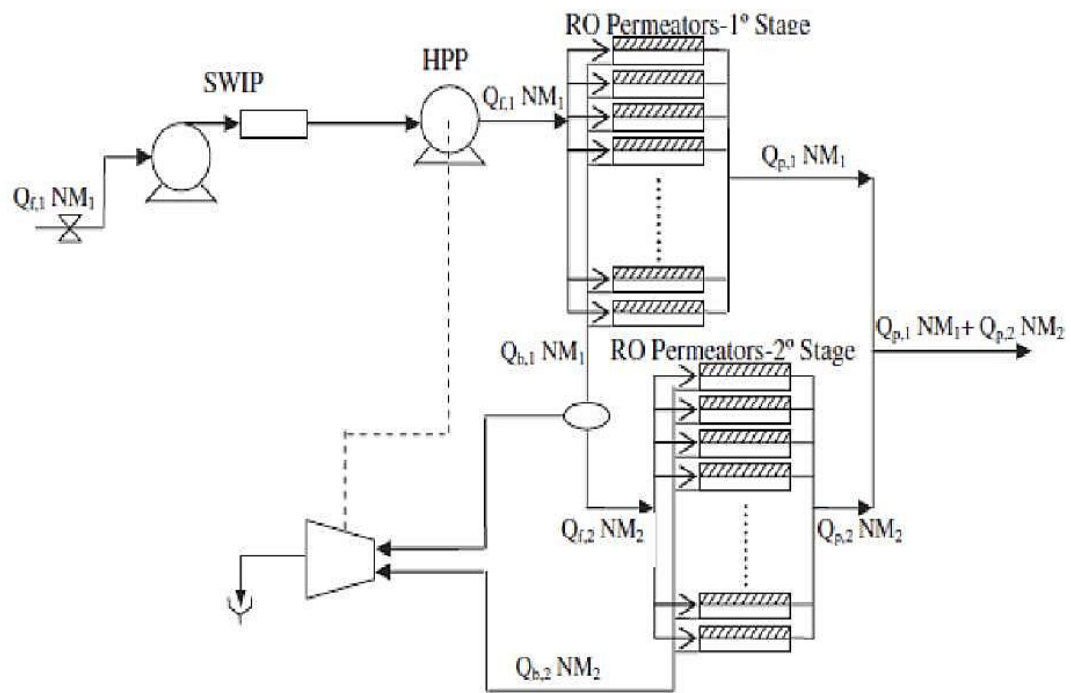
(αφαλατωμένο νερό /συνολική τροφοδοσία) κυμαίνεται μεταξύ 15 - 40%. Η μέγιστη δυνατή ποιότητα νερού που παράγουν είναι ως 200 ppm άλατα (TDS), 100 ppm χλώριο και 0,5 ppm βόριο, που είναι μέσα στα αποδεκτά όρια για χρήση από τον άνθρωπο.



Εικόνα 2.17: Διαμόρφωση μονού σταδίου

## ii. Διαμόρφωση πολλαπλών σταδίων

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



Εικόνα: Διαμόρφωση δύο σταδίων

## Κεφάλαιο 3

### 3.1 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΑΠΟΡΡΙΨΗΣ ΤΗΣ ΑΛΜΗΣ

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

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

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

- Συστήματα ανάκτησης υδραυλικής ενέργειας (hydraulic energy recovery systems)
  - ◆ Υδροστρόβιλοι Pelton (Pelton wheel turbines)
  - ◆ Φυγοκεντρικές αντλίες αντίστροφης λειτουργίας (reverse running centrifugal pumps)

Συστήματα άμεσης ανάκτησης ενέργειας / ισοβαρή συστήματα ανάκτησης (direct energy recovery systems / isobaric systems)

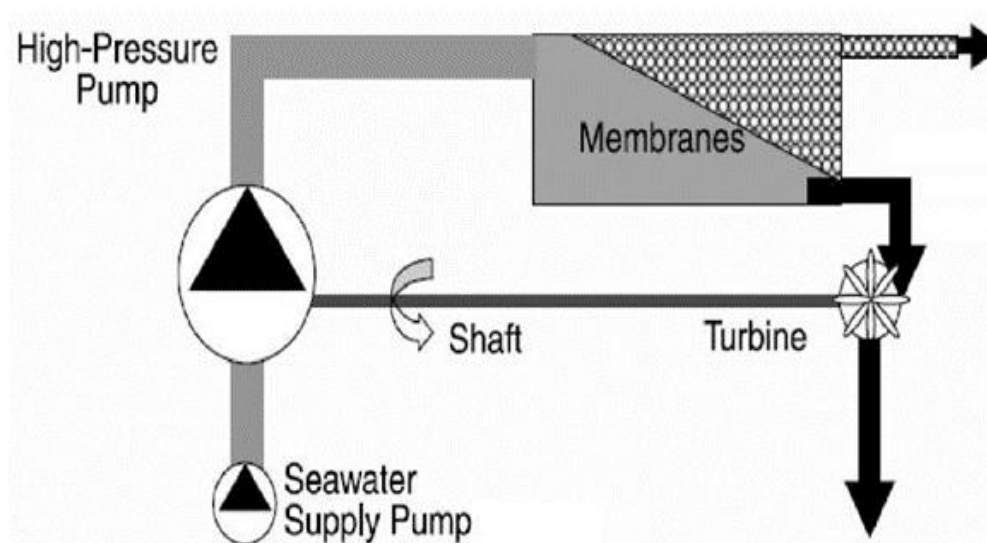
- ◆ Εναλλάκτες πίεσης (έργου) (pressure/ work exchangers)

### 3.2. ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΟΙ PELTON (PELTON WHEEL TURBINES)

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

τον κινητήρα της αντλίας υψηλής πίεσης, ώστε να μειώνει το φορτίο της αντλίας και να εξοικονομεί ενέργεια.

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

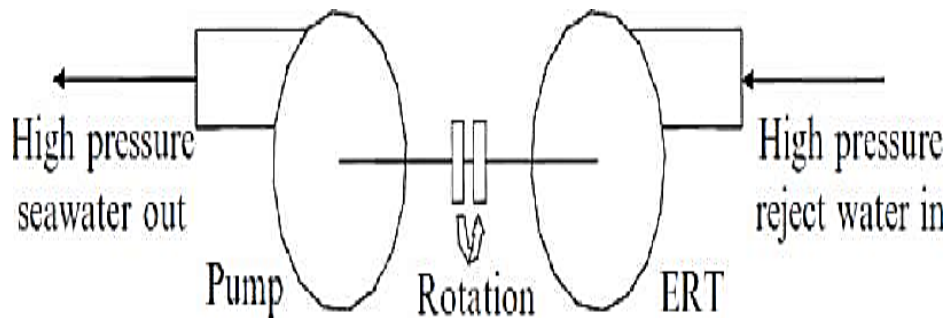


Εικόνα: Απεικόνιση ανάκτησης ενέργειας μέσω υδροστροβίλου Pelton

### **3.3 ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (REVERSE RUNNING CENTRIFUGAL PUMPS)**

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

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



Εικόνα: Απεικόνιση ανάκτησης ενέργειας μέσω φυγοκεντρικής αντλίας αντίστροφης λειτουργίας

### **3.4 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΠΙΕΣΗΣ (ΕΡΓΟΥ) (PRESSURE/WORK EXCHANGERS)**

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

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

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



## Κεφάλαιο 4

### 4.1 ΤΕΛΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΑΦΑΛΑΤΩΜΕΝΟΥ ΝΕΡΟΥ

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

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

- αύξησης των σταδίων επεξεργασίας του θαλασσινού νερού
- επεξεργασίας του αφαλατωμένου νερού από:

#### Μεμβράνες ηλεκτροδιάλυσης ο Ρητίνες ιοντοεναλλαγής

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

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

## 4.2 ΑΠΟΡΡΙΨΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΟΣ (ΑΛΜΗΣ)

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

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

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

Το πρόβλημα αυτό λύνεται κυρίως μέσω:

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



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

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

## Κεφάλαιο 5

### Μεμβράνες

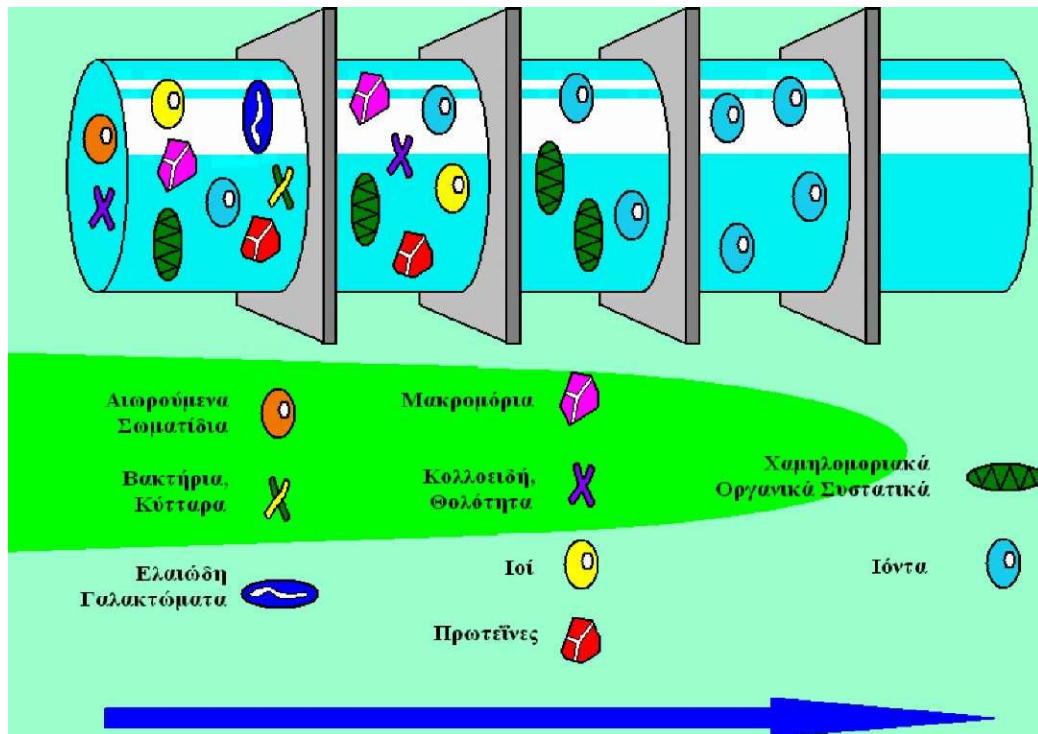
#### 5.1 ΤΥΠΟΙ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ

Μια μεμβράνη αντίστροφης ώσμωσης δρα ως το ημιδιαπερατό φράγμα της ροής, κατά την διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης, επιτρέποντας επιλεκτικά την διέλευση ενός συγκεκριμένου είδους (διαλύτη, συνήθως νερό) ή συγκρατώντας μερικώς ή πλήρως άλλα είδη (διαλυμένες ουσίες). Αυτή η διαδικασία απαιτεί μια υψηλή πίεση η οποία ασκείται στην πλευρά της υψηλής συγκέντρωσης της μεμβράνης, συνήθως 2-17 bar για γλυκό και υφάλμυρο νερό και 40-82 bar για θαλασσινό νερό. Μια μεμβράνη διαχωρισμού για να είναι κατάλληλη για την διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης πρέπει να έχει κάποιες ιδιότητες. Μια μεμβράνη πρέπει να είναι ανθεκτική σε χημική και μικροβιακή επίθεση, μηχανικά και δομικά σταθερή για μεγάλες χρονικές περιόδους λειτουργίας και να έχει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά διαχωρισμού για κάθε συγκεκριμένο σύστημα.

Ως προς την μορφολογία τους μπορούν να χωριστούν σε:

- Πυκνής δομής
- Πορώδους δομής, με δυο υποκατηγορίες
- Συμμετρικές
- Ασύμμετρες
- Σύνθετες λεπτού υμενίου

Οι μεμβράνες πορώδους μορφής μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με το μέγεθος των πόρων τους το οποίο κυμαίνεται από 10 έως 104 nm. Η απόδοση διαχωρισμού εξαρτάται από τη διαφορά μεταξύ του μεγέθους των πόρων και του μεγέθους των σωματιδίων τα οποία πρέπει να διαχωριστούν.



Οι μεμβράνες αρχικά κατασκευάζονταν από οξική κυτταρίνη. Η οξική κυτταρίνη έχει πολύ καλή απόδοση διαχωρισμού όμως έχει το μειονέκτημα να υδρολύεται εύκολα σε μικρές ή μεγάλες τιμές pH. Σήμερα η κυτταρίνη έχει αντικατασταθεί σε πολλές εφαρμογές από πολυαμίδια, πολυσουλφόνες, πολυεστέρες και άλλα νεότερα συνθετικά πολυμερή υλικά. Τα συνθετικά πολυμερή έχουν καλύτερη χημική σταθερότητα και αντοχή στη μικροβιακή αποικοδόμηση.

Οι μεμβράνες κατασκευάζονται και από κεραμικά υλικά όπως η ζirkονία, η αλουμίνα, η τιτανία κλπ.

Το κυριότερο πλεονέκτημα των ανόργανων μεμβρανών σε σύγκριση με τις πολυμερείς μεμβράνες είναι η μεγάλη σταθερότητα τους στις υψηλές θερμοκρασίες η οποία επιτρέπει την αποστείρωση τους με ατμό. Η διεργασία αυτή είναι απαραίτητη όταν χρησιμοποιούνται οι μεμβράνες σε βιοτεχνολογικές εφαρμογές και στην επεξεργασία φυσικών χυμών και τροφίμων.

Οι διαθέσιμες σήμερα μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης είναι κυρίως: οι ασύμμετρες μεμβράνες που περιέχουν ένα πολυμερές και οι σύνθετες μεμβράνες που αποτελούνται από δυο ή περισσότερες στρώσεις πολυμερούς.

Ενώ το υλικό της μεμβράνης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για την ροή της διαλυμένης ουσίας και γενικότερα για την ποιότητα του νερού, πρέπει να τονιστεί ότι ολόκληρο

το σύστημα μεμβρανών είναι επίσης εξαιρετικά σημαντικό σε μια διεργασία αντίστροφης όσμωσης. Αυτό λοιπόν το σύστημα ή στοιχείο μεμβρανών:

1. προσφέρει μηχανική υποστήριξη στις εύθραυστες μεμβράνες ακόμα και σε υψηλές πιέσεις λειτουργίας
2. είναι σχεδιασμένο να ελαχιστοποιεί την πτώση της πίεσης σε ολόκληρη τη μονάδα καθώς και την συγκέντρωση των ακαθαρσιών
3. είναι σχετικά φθηνό και εύκολο να αντικατασταθεί.

❖ Οι πιο βασικοί και εμπορικοί τύποι στοιχείων μεμβρανών είναι:

α) τα δισκοειδή στοιχεία (plate and frame module) β) τα σωληνοειδή στοιχεία (tubular module) γ) τα στοιχεία ελικοειδούς περιέλιξης (spiral - wound module) δ) τα στοιχεία κοίλων ινών (hollow - fiber module)

Τα δισκοειδή στοιχεία (ή με δίσκους και πλαίσια) αποτελούνται από στοίβες επίπεδων φύλλων μεμβράνης που είναι τοποθετημένα πάνω σε στηρίγματα. Κάθε μεμβράνη και στήριγμα χωρίζονται από διαχωριστές που κατευθύνουν την τροφοδοσία κατά μήκος κάθε μεμβράνης και διοχετεύουν το καθαρό νερό (προϊόν διήθηματος) έξω από την μονάδα.

Τα στοιχεία αυτά είναι ανθεκτικά στη ρύπανση, επιτυγχάνουν υψηλές πιέσεις λειτουργίας (120bar) και υψηλό βαθμό συμπύκνωσης. Όμως το κόστος τους είναι ιδιαίτερα υψηλό οπότε η χρήση τους είναι περιορισμένη.

Τα σωληνοειδή στοιχεία αποτελούνται από σωλήνες (αγωγούς) μεμβράνης διαμέτρου 0,7-2,5 cm που στηρίζονται εντός ενός διάτρητου σωλήνα από ανοξείδωτο χάλυβα. Καθώς το νερό τροφοδοσίας ρέει μέσα στους σωλήνες, το διήθημα διέρχεται μέσω της μεμβράνης.

Και αυτά τα στοιχεία είναι ανθεκτικά στη ρύπανση και καθαρίζονται εύκολα. Δεν χρησιμοποιούνται όμως πια στις μονάδες αντίστροφης όσμωσης αλλά εφαρμόζονται σε περιπτώσεις υπερδιήθησης όπου το όφελος είναι μεγαλύτερο και "καλύπτει" το υψηλό κόστος.

Αυτά τα δυο στοιχεία είναι ανθεκτικά στην ρύπανση και χρησιμοποιούνται μόνο σε εξαιρετικά ρυπαντικές τροφοδοσίες λόγω των πολλών μειονεκτημάτων τους. Τα πιο

ευρέως χρησιμοποιούμενα στοιχεία είναι τα στοιχεία ελικοειδούς περιέλιξης και τα στοιχεία κοίλων ινών.

> Τα στοιχεία ελικοειδούς περιέλιξης αποτελούνται από επίπεδα φύλλα μεμβράνης τα οποία συγκολλούνται ανά δυο. Μεταξύ των μεμβρανών υπάρχει ένας διαχωριστής από πορώδες υλικό και είναι τυλιγμένα γύρω από ένα διάτρητο σωλήνα συλλογής.

Το νερό τροφοδοσίας διοχετεύεται στα τυλιγμένα φύλλα, διεισδύει μέσω της μεμβράνης και συλλέγεται στο κέντρο του σωλήνα. Μπορούν να τυλιχθούν έως και 26 φάκελοι μεμβρανών στον κεντρικό σωλήνα σε μορφή κυλίνδρου, που χωρίζονται μεταξύ τους από πλαστικά πλέγματα.

Γενικά χρησιμοποιούνται 2-6 στοιχεία σε κάθε δοχείο πίεσης που είναι τοποθετημένα εν σειρά και έχουν μήκος περίπου 1 μέτρο και διάμετρο 10 - 60 εκατοστά.

Αυτός ο τύπος έχει μέτρια αντίσταση ρύπανσης αλλά χαμηλό κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας γι αυτό χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό στις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης.

> Τα στοιχεία κοίλων ινών αποτελούνται από μεγάλο αριθμό λεπτών κοίλων ινών, τοποθετημένες σε ένα δοχείο πίεσης ανά δεσμίδες, που η κάθε δεσμίδα μπορεί να περιέχει από 45 έως 3000 κοίλες ίνες. Το νερό τροφοδοσίας διασχίζει το εξωτερικό των ινών και το αφαλατωμένο νερό μεταφέρεται μέσω των κοίλων ινών στο άκρο του δοχείου όπου και συλλέγεται. Αντίστοιχα η άλμη εξέρχεται από διαφορετικό σημείο του δοχείου χωρίς να έρχεται σε επαφή με το καθαρό νερό. Τα στοιχεία κοίλων ινών δεν παρέχουν στροβιλώδη ή ομοιόμορφη ροή σε όλη την επιφάνεια των ινών κάνοντάς τα πιο επιρρεπή στη ρύπανση. Είναι λοιπόν δύσκολο να καθαριστούν εξαιτίας της αδυναμίας του καθαριστικού να εισχωρήσει στην περιοχή της ρύπανσης.

## **5.2 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΜΕ ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ**

Ο όρος διεργασίες μεμβρανών αναφέρεται σε σύγχρονες φυσικοχημικές τεχνικές διαχωρισμού που εκμεταλλεύονται τις διαφορές στην υδραυλική διαπερατότητα των διάφορων συστατικών ενός και του αυτού μείγματος (Crittenden et al., 2005). Ως τεχνικές διαχωρισμού, οι διεργασίες μεμβρανών ευρίσκουν πολλές και ποικίλες βιομηχανικές εφαρμογές, όπως στην παραγωγή πόσιμου νερού, στην επεξεργασία αστικών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων, στις γεωργικές βιομηχανίες φυτικών

προϊόντων, στις βιομηχανίες γάλακτος, στις βιομηχανίες φαρμάκων, στις βιομηχανίες χάρτου, στην υφαντουργία, στις βιομηχανίες ελαστικών κ.λ.π. (Λέκκας, 1996). Στη βιβλιογραφία, αντί του όρου διεργασίες διαχωρισμού με μεμβράνες (membrane separation processes) χρησιμοποιείται πολλές φορές με την ίδια σημασία ο όρος διεργασίες διήθησης μέσω μεμβρανών (membrane filtration processes).

### **5.3Η MEMBRANE**

#### **Ορισμός της μεμβράνης**

Σύμφωνα με την ορολογία της IUPAC, ως μεμβράνη (membrane) μπορεί να ορισθεί μία δομή που διαθέτει πολύ μεγαλύτερες πλευρικές διαστάσεις σε σχέση με το πάχος της, και μέσω της οποίας δύναται να λάβει χώρα μεταφορά μάζας υπό την επίδραση μιας ποικιλίας από ωθούσες δυνάμεις (IUPAC, 1996). Διαφορετικά, θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι μεμβράνες είναι λεπτά μοριακά φύλλα από πλαστικά ή κεραμικά υλικά, τα οποία διαθέτουν διακεκριμένη πορώδη δομή και επιτρέπουν επιλεκτικά τη διέλευση μέσω αυτών ορισμένων συστατικών ενός μείγματος, παρεμποδίζοντας ταυτόχρονα τη διέλευση άλλων συστατικών του ίδιου μείγματος (Αϊβαζίδης, 2000).

Στις περισσότερες διεργασίες μεμβρανών παρατηρούνται τρία ρεύματα. Κατά τη διάρκεια του διαχωρισμού, το προς επεξεργασία μείγμα ή ρεύμα τροφοδοσίας (feed stream) ωθείται μέσω αντλίας έναντι της επιφάνειας της μεμβράνης, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός ρεύματος προϊόντος (product stream) και ενός ρεύματος απόρριψης (waste stream). Ως ημιπερατός φραγμός, η μεμβράνη είναι ιδιαίτερα διαπερατή σε ορισμένα συστατικά του ρεύματος τροφοδοσίας και λιγότερο διαπερατή (ή αδιαπερατή) σε άλλα. Τα διαπερατά συστατικά διέρχονται μέσω της μεμβράνης, ενώ τα μη διαπερατά συγκρατούνται στην πλευρά του ρεύματος τροφοδοσίας. Επομένως, το ρεύμα προϊόντος ή διήθημα (permeate) είναι σχετικά απαλλαγμένο από μη διαπερατά συστατικά, σε αντίθεση με το ρεύμα απόρριψης ή κατακράτημα (retentate) που χαρακτηρίζεται από υψηλή συγκέντρωση μη διαπερατών συστατικών. Εξαιτίας του γεγονότος αυτού, το ρεύμα απόρριψης αναφέρεται και ως συμπύκνωμα (concentrate).

#### **5.4 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ**

Οι μεμβράνες ταξινομούνται συνήθως βάσει των αντίστοιχων διεργασιών διαχωρισμού στις οποίες χρησιμοποιούνται. Οι διεργασίες μεμβρανών που βρίσκουν εφαρμογή στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων περιλαμβάνουν τη μικροδιήθηση, την υπερδιήθηση, τη νανοδιήθηση, την αντίστροφη όσμωση και την ηλεκτροδιαπίδυση. Στους βιοαντιδραστήρες μεμβρανών χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον μεμβράνες μικροδιήθησης και υπερδιήθησης.

Η διάκριση μεταξύ των διάφορων διεργασιών μεμβρανών μπορεί να γίνει βάσει ενός αριθμού διαφορετικών κριτηρίων, όπως το είδος του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η μεμβράνη, η φύση της ωθούσας δύναμης, ο μηχανισμός διαχωρισμού που κυριαρχεί και, τέλος, το ονομαστικό μέγεθος του επιτευχθέντος διαχωρισμού (Metcalf & Eddy, 2003). Στο "Εγχειρίδιο Διηθήσεως με Μεμβράνες" (Handbook of Membrane Filtration) της εταιρίας Osmonics Inc, οι τέσσερις βασικές

#### **5.5 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ**

Η δομή, το πορώδες και τα χαρακτηριστικά μεταφορά μάζας των περισσότερων μεμβρανών MF είναι λίγο ως πολύ σταθερά σε ολόκληρη τη διατομή των μεμβρανών. Τέτοιου είδους μεμβράνες με ομοιογενή δομή διατομής ονομάζονται συμμετρικές (symmetrical) ή ισοτροπικές (isotropic). Ο όρος ισοτροπικές σημαίνει ότι, τουλάχιστο θεωρητικά, οι μεμβράνες MF διαχωρίζουν κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο, ανεξάρτητα από τη διεύθυνση ροής του ρεύματος τροφοδοσίας (π.χ. από πάνω προς τα κάτω ή από κάτω προς τα πάνω για επίπεδες μεμβράνες). Οι ισοτροπικές μεμβράνες μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες υποκατηγορίες. Έτσι, οι ισοτροπικές μεμβράνες μπορεί να είναι μικροπορώδεις ή πυκνές. Οι μικροπορώδεις μεμβράνες αποτελούνται συνήθως από άκαμπτα πολυμερή υλικά με μεγάλα διάκενα που σχηματίζουν αλληλοσυνδεόμενους πόρους. Οι πλέον κοινές μικροπορώδεις μεμβράνες είναι οι λεγόμενες μεμβράνες αναστροφής φάσεων (phase inversion membranes). Η κατασκευή των μεμβρανών αυτών στηρίζεται στη διαμόρφωση σε καλούπι (casting) ενός υμενίου από ένα διάλυμα πολυμερούς και διαλύτη και στην ακόλουθη εμβάπτιση του υμενίου σε ένα μη διαλύτη για το πολυμερές. Μιας και τα περισσότερα πολυμερή που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες εφαρμογές είναι υδρόφοβα, το νερό αποτελεί το συνηθέστερο μη διαλύτη. Κατά την επαφή τους με το νερό, τα μόρια του πολυμερούς καταβυθίζονται προς σχηματισμό της μεμβράνης. Ένας άλλος

τύπος μικροπορώδους μεμβράνης είναι η λεγόμενη μεμβράνη εγχαραγμένων διαύλων (track-etched membrane). Η κατασκευή της μεμβράνης αυτής πραγματοποιείται με βομβαρδισμό (ακτινοβολία) ενός υμενίου από πολυμερές υλικό με δέσμη ιόντων που επιτίθενται στις αλυσίδες του πολυμερούς, αφήνοντας πίσω τους "τραυματισμένα" μόρια. Εν συνεχεία, το υμένιο διέρχεται μέσω ενός όξινου διαλύματος εγχάραξης που προκαλεί διάλυση των "τραυματισμένων" μορίων προς σχηματισμό κυλινδρικών πόρων, πολλοί από τους οποίους είναι κάθετοι στην επιφάνεια της μεμβράνης. Ένας λιγότερο κοινός τύπος μικροπορώδους μεμβράνης είναι η λεγόμενη μεμβράνη διογκωμένου υμενίου (expanded-film membrane). Οι μεμβράνες της κατηγορίας αυτής είναι προσανατολισμένα κρυσταλλικά πολυμερή με διάκενα που σχηματίζονται με διαδοχική εφαρμογή των διεργασιών εξώθησης και επιμήκυνσης. Αρχικά, το πολυμερές υλικό υποβάλλεται με κατάλληλο τρόπο σε εξώθηση πλησίον του σημείου τήξης του. Εν συνεχεία, το προϊόν της προηγούμενης διεργασίας ψύχεται, σκληραίνεται δια πυρακτώσεως και υποβάλλεται σε επιμήκυνση που φτάνει το 300 % του αρχικού του μήκους. Η διεργασία της επιμήκυνσης δημιουργεί οχιομοειδείς πόρους, το μέγεθος των οποίων κυμαίνεται από 200 έως 2,500 Å.

Σε αντίθεση με τις μεμβράνες MF, οι μεμβράνες UF δεν εμφανίζουν ομοιογενή δομή σε ολόκληρη τη διατομή τους, δηλαδή η μορφολογία τους διαφέρει σημαντικά κατά μήκος του πάχους τους. Τέτοιου είδους μεμβράνες ονομάζονται ασυμμετρικές (asymmetrical) ή ανισοτροπικές (anisotropic) και αποτελούνται από μία ενεργό στιβάδα (active layer) και μία στιβάδα υποστήριξης (support layer).

Στις ανισοτροπικές μεμβράνες, ο διαχωρισμός πραγματοποιείται στην ενεργό στιβάδα, η οποία είναι ένας λεπτός φλοιός με χαμηλό πορώδες και πολύ μικρούς κενούς χώρους. Το χαμηλό πορώδες και οι μικροί πόροι δημιουργούν σημαντική αντίσταση στη ροή που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί κατασκευάζοντας την ενεργό στιβάδα όσο λεπτότερη γίνεται. Η ενεργός στιβάδα είναι τόσο λεπτή που δεν έχει καθόλου μηχανική αντοχή. Έτσι, η υπόλοιπη μεμβράνη αποτελείται από μία εξαιρετικά πορώδη στιβάδα που παρέχει μηχανική υποστήριξη και δημιουργεί ελάχιστη υδραυλική αντίσταση. Το πάχος της στιβάδας υποστήριξης σχεδόν αντιστοιχεί στο συνολικό πάχος της μεμβράνης. Από τα προηγούμενα, γίνεται φανερό ότι στις ανισοτροπικές μεμβράνες ο βαθμός συγκράτησης και οι μηχανικές ιδιότητες είναι δυνατό να σχεδιαστούν ξεχωριστά. Προφανώς, η διήθηση μέσω μιας



ανισοτροπικής μεμβράνης δεν είναι ίδια και στις δύο διευθύνσεις. Έτσι, η διήθηση στην "εσφαλμένη" διεύθυνση μπορεί να προκαλέσει έμφραξη των πόρων της στιβάδας υποστήριξης, καθώς και αποκόλληση της ενεργού στιβάδας από την υπόλοιπη μεμβράνη. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ανισοτροπικών μεμβρανών, οι μεμβράνες διαχωρισμού φάσεων (phase separation membranes) και οι σύνθετες μεμβράνες λεπτού υμενίου (thin film composite membranes). Οι μεμβράνες διαχωρισμού φάσεων αναφέρονται συχνά και ως μεμβράνες Loeb-Sourirajan, από τα ονόματα των ερευνητών που τις ανέπτυξαν πρώτοι. Οι μεμβράνες Loeb-Sourirajan είναι ομοιογενείς ως προς τη χημική τους σύσταση, αλλά όχι και ως προς τη δομή τους. Η κατασκευή τους βασίζεται σε διάφορες τεχνικές αναστροφής φάσεων, όπως αυτές που αναφέρθηκαν προηγουμένως (π.χ. έγχυση διαλύματος σε καλούπι ακολουθούμενη από καταβύθιση του πολυμερούς και εξάτμιση του διαλύτη), με τη διαφορά ότι, εδώ, το μέγεθος των πόρων και το πορώδες μεταβάλλονται κατά μήκος του πάχους της μεμβράνης. Τέλος, οι σύνθετες μεμβράνες λεπτού υμενίου είναι ανομοιογενείς, τόσο χημικά όσο και δομικά. Η κατασκευή τους βασίζεται σε διάφορες μεθόδους που περιλαμβάνουν διεπιφανειακό πολυμερισμό, επίχριση με κατάλληλα διαλύματα, πολυμερισμό πλάσματος, επιφανειακή κατεργασία κ.λ.π.

## **5.6 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ**

Η απόδοση των μεμβρανών εξαρτάται άμεσα από τις φυσικοχημικές ιδιότητες των υλικών κατασκευής τους. Ως ιδανικό θεωρείται το υλικό εκείνο που είναι σε θέση να παράγει υψηλούς όγκους διηθήματος χωρίς να φράσσει ή να ρυπαίνεται και, επιπλέον, διαθέτει μεγάλη φυσική διάρκεια, είναι χημικά σταθερό και ανθεκτικό, δε βιοαποικοδομείται και, τέλος, έχει χαμηλό κόστος. Η απουσία ενός τέτοιου ιδανικού υλικού, οδήγησε τη βιομηχανία μεμβρανών στη χρησιμοποίηση μιας μεγάλης ποικιλίας υλικών, τόσο οργανικών όσο και ανόργανων. Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μεμβρανών είναι η υδροφοβικότητα (hydrophobicity). Η εν λόγω ιδιότητα συνδέεται έντονα με την τάση των μεμβρανών για έμφραξη. Έτσι, τα υδρόφιλα υλικά, τα υλικά δηλαδή που αρέσκονται στην επαφή τους με το νερό, εμφανίζουν μικρή τάση για έμφραξη, σε αντίθεση με τα υδρόφοβα υλικά που δύναται να φράσσουν εκτεταμένα. Η υδροφοβικότητα ποσοτικοποιείται με μετρήσεις της γωνίας επαφής (contact angle measurements), κατά τις οποίες ένα σταγονίδιο νερού ή μία φυσαλίδα αέρα

τοποθετείται έναντι της επιφάνειας της μεμβράνης και μετράται η γωνία μεταξύ επιφάνειας και νερού ή αέρα. Οι υδρόφοβες επιφάνειες εμφανίζουν μεγάλες γωνίες επαφής (το σταγονίδιο νερού απλώνεται στην επιφάνεια), ενώ οι υδρόφιλες επιφάνειες εμφανίζουν μικρές γωνίες επαφής (το σταγονίδιο νερού διατηρεί τη σφαιρικότητά του). Αν και η ακριβής τιμή της γωνίας επαφής εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τεχνική μέτρησης και διάφορες άλλες παραμέτρους (π.χ. επιφανειακή τραχύτητα), συνήθως κυμαίνεται από περίπου 40° με 50° για την οξική κυτταρίνη έως περίπου 110° για το πολυπροπυλένιο. Στην περίπτωση των οργανικών υλικών, η υδροφοβικότητα είναι άμεσα εξαρτώμενη από τη χημική σύσταση του εκάστοτε πολυμερούς. Έτσι, πολυμερή που διαθέτουν ιονισμένες λειτουργικές ομάδες, πολικές ομάδες, ομάδες που περιέχουν οξυγόνο και υδροξυ- ομάδες, τείνουν να είναι ιδιαίτερος υδρόφιλα. Δυστυχώς, οι χημικές ιδιότητες που ενισχύουν την υδροφιλικότητα έχουν την τάση να ελαττώνουν τη χημική, μηχανική και θερμική σταθερότητα, καθώς τα μόρια του νερού δρουν ως πλαστικοποιητές για τα υδρόφιλα υλικά. Τα οργανικά υλικά που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στη βιομηχανία μεμβρανών περιλαμβάνουν το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυβινυλιδενοφθορίδιο (PVDF), τις πολυσουλφόνες (PSU) και πολυαιθερικές σουλφόνες (PES) και την οξική κυτταρίνη (CA), αν και ορισμένοι κατασκευαστές μεμβρανών δεν αποκαλύπτουν λεπτομέρειες σχετικά με τη χημεία των υλικών τους. Στον Πίνακα γίνεται μία σύντομη συγκριτική παρουσίαση των προαναφερθέντων οργανικών υλικών. Άλλα οργανικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μεμβρανών είναι χλωριούχα πολυβινύλια, πολυαμίδια, πολυακρυλικά, συμπολυμερή του ακρυλονιτριλίου και του βινυλοχλωριδίου, πολυβινυλική αλκοόλη, καθώς και ακετυλιωμένη κυτταρίνη. Τέλος, μεταξύ των ανόργανων υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μεμβρανών κυριαρχούν το διοξείδιο του τιτανίου (TiO<sub>2</sub>) και του ζirkονίου (ZrO<sub>2</sub>). Οι μεμβράνες

από ανόργανα πυροσωματωμένα υλικά χαρακτηρίζονται από εξαιρετική θερμική και χημική σταθερότητα, το κόστος όμως κατασκευής τους είναι ιδιαίτερος υψηλό.

Υλικό μεμβράνης	Χαρακτηριστικά
Οξική κυτταρίνη (CA)	Είναι το πλέον υδρόφιλο από τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα υλικά στη βιομηχανία μεμβρανών, γεγονός που περιορίζει την έμφραξη και βοηθάει στη διατήρηση υψηλών τιμών ροής διηθήματος. Επιπλέον, είναι εύχρηστο, έχει χαμηλό κόστος και διατίθεται σε μεγάλη ποικιλία μεγέθους πόρων. Ως παράγωγο της κυτταρίνης, όμως, είναι περισσότερο επιρρεπές σε βιολογική αποικοδόμηση σε σχέση με άλλα υλικά. Οι μεμβράνες CA είναι ανθεκτικές σε συνεχή έκθεση σε δόσεις ελεύθερου χλωρίου έως 1 mg/L ή χαμηλότερες, προς παρεμπόδιση της βιολογικής αποικοδόμησης. Η οξική κυτταρίνη δεν είναι ανθεκτική σε συνεχή έκθεση σε υψηλότερες δόσεις χλωρίου, διαλείπουσα όμως έκθεση σε δόσεις έως και 50 mg/L θεωρείται αποδεκτή. Το υλικό εμφανίζει τάση συμπίεσης υπό πίεση, προκαλώντας βαθμιαία ελάττωση στη ροή του διηθήματος κατά τη διάρκεια ζωής του. Οι μεμβράνες CA δεν είναι ανθεκτικές σε συνθήκες pH κάτω από 4 ή πάνω από 8.5, σε θερμοκρασίες άνω των 30°C και σε επιθετικά χημικά. Ως εκ τούτου, η οξική κυτταρίνη δε δύναται να καθαριστεί το ίδιο αποτελεσματικά όπως άλλα υλικά.
Πολυσουλφόνες (PSU)/ Πολυαιθερικές σουλφόνες (PES)	Πρόκειται για μετρίως υδρόφοβα υλικά που ενδέχεται όμως να είναι επιρρεπή σε μεγάλο βαθμό έμφραξης. Είναι πολύ σταθερά και εμφανίζουν εξαιρετική χημική και βιολογική ανθεκτικότητα. Αντέχουν σε συγκεντρώσεις ελεύθερου χλωρίου έως και 200 mg/L για σύντομους χρόνους επαφής, τιμές pH μεταξύ 1 και 13 και θερμοκρασίες έως 75°C. Ως εκ τούτου, οι συνθήκες καθαρισμού και απολύμανσής τους μπορεί να είναι αρκούτσως επιθετικές, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος αποικοδόμησης.
Πολυβινυλιδενοφθορίδιο (PVDF)	Είναι μετρίως υδρόφοβο και εμφανίζει εξαιρετική διάρκεια ζωής, χημική σταθερότητα και βιολογική ανθεκτικότητα. Αντέχει σε συνεχή έκθεση σε οποιαδήποτε συγκέντρωση ελεύθερου χλωρίου, τιμές pH μεταξύ 2 και 10 και θερμοκρασίες έως 75°C. Ως εκ τούτου, οι συνθήκες καθαρισμού και απολύμανσής του μπορεί να είναι επιθετικές, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος αποικοδόμησης.
Πολυπροπυλένιο (PP)	Είναι το πλέον υδρόφοβο από τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα υλικά στη βιομηχανία μεμβρανών. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή μεμβρανών MF και μόνο, μιας και είναι τόσο υδρόφοβο που δεν επιτρέπει τη διέλευση του νερού μέσω των μικρών πόρων στις μεμβράνες UF. Έχει μεγάλη διάρκεια ζωής, είναι χημικά και βιολογικά σταθερό και αντέχει σε μετρίως υψηλές θερμοκρασίες και τιμές pH μεταξύ 1 και 13, γεγονός που επιτρέπει την εφαρμογή επιθετικών συνθηκών καθαρισμού. Δυστυχώς, το πολυπροπυλένιο δεν είναι ανθεκτικό στο χλώριο, γεγονός που περιορίζει τη δυνατότητα ελέγχου της βιολογικής ανάπτυξης στη μεμβράνη.

## **ΕΠΙΛΟΓΟΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Η παρούσα πτυχιακή εργασία μας αναλύει τον τρόπο αφαλάτωσης της θάλασσας με την μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης. Εξηγεί αναλυτικά τι είναι η αντίστροφη ώσμωση και τα στάδια που περιλαμβάνει η μέθοδος αυτή καθώς και μεθόδους εξοικονόμησης ενέργειας της εγκατάστασης. Τέλος αναλύει τις μεμβράνες που χρησιμοποιούνται στην εγκατάσταση, τους τύπους, τις διεργασίες, την ταξινόμηση, την δομή, την κατασκευή αλλά και τα υλικά κατασκευής των μεμβρανών.

## **Βιβλιογραφία**

1. <http://technologiein.pathfinder.gr/desalination/>
2. <http://www.lenntech.nl/processen/zee/omgekeerde-osmose/ontzilting-proces.htm/>
3. <http://www.membraneshop.com.au/categories/Filmtec-4-inch/>
4. <http://www.leaderpumps.com/ecojetlarge.html/>
5. [http://www.appliedmembranes.com/Cat\\_Pumps.htm/](http://www.appliedmembranes.com/Cat_Pumps.htm/)
6. <http://www.hydrology-shop.gr/memvranothhkh-4040-69bar-fg.html/>
7. <http://www.membraneshop.com.au>

## Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ABSTRACT .....	4
Πρόλογος.....	5
Κεφάλαιο 1.....	8
1.1 Εισαγωγή στην αφαλάτωση .....	8
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ .....	8
Κεφάλαιο 2.....	10
2.1 Αντίστροφη όσμωση - γενικά στοιχεία.....	10
2.2 Περιγραφή της διεργασίας αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση.....	11
2.3 Τροφοδοσία θαλασσινού νερού .....	13
2.4 Προκατεργασία νερού τροφοδότησης.....	13
2.5 Μεταφορά προκατεργασμένου νερού μέσω αντλιών υψηλής πίεσης .....	15
2.6 Αφαλάτωση του νερού σε μονάδα αντίστροφης όσμωσης.....	16
2.7 Διαμόρφωση μονάδας αφαλάτωσης.....	16
Κεφάλαιο 3.....	19
3.1 Ανάκτηση ενέργειας μέσω απόρριψης της άλμης .....	19
3.2. Υδροστρόβιλοι Pelton (Pelton wheel turbines).....	19
3.3 Φυγοκεντρικές αντλίες αντίστροφης λειτουργίας (reverse running centrifugal pumps).....	20
3.4 Εναλλάκτεςπίεσης (έργου) (pressure/work exchangers).....	21
Κεφάλαιο 4.....	23
4.1 Τελική κατεργασία του αφαλατωμένου νερού.....	23
4.2 Απόρριψη του υπολείμματος (άλμης).....	24
Κεφάλαιο 5.....	26
Μεμβράνες.....	26
5.1 Τύποι μεμβρανών.....	26
5.2 Διεργασίες Διαχωρισμού με Μεμβράνες.....	29
5.3 Η μεμβράνη .....	30
5.4 Ταξινόμηση μεμβρανών διεργασιών μεμβρανών.....	31
5.5 Δομή και μέθοδοι κατασκευής μεμβρανών .....	31
5.6 Υλικά κατασκευής μεμβρανών.....	33

