

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

# **ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ: ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΠΑΝΑΓΟΥ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ (Α.Μ. 6596)**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΙΑΝΝΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ (ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ)**

**ΠΑΤΡΑ 2018**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στην τεχνολογία αφαλάτωσης θαλασσινού νερού, καθώς και στις επιδράσεις αυτής στην υγεία και το περιβάλλον. Λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου, έχουν προκύψει διάφορα προβλήματα σχετικά με το πόσιμο νερό όπως λειψυδρία, ξηρασίες και γενικότερα μείωση των αποθεμάτων του πόσιμου νερού σε ορισμένες περιοχές του πλανήτη, που αργά ή γρήγορα θα επηρεάσουν και τις υπόλοιπες. Συνεπώς, η ανάγκη μελέτης του πεδίου της αφαλάτωσης είναι επιτακτική για τον άνθρωπο, την κοινωνία και το περιβάλλον.

Στην αρχή, αναφέρονται και αναλύονται οι επιμέρους μέθοδοι - τεχνικές αφαλάτωσης, οι ομάδες κατηγοριοποίησης τους, η αξιοποίηση διαφόρων μορφών ενέργειας στον τομέα της αφαλάτωσης (π.χ. η ηλιακή ενέργεια) καθώς και τα προβλήματα που πηγάζουν από την διαδικασία. Στην συνέχεια, αναφέρονται και αναλύονται η χημική σύσταση του νερού, οι επιβλαβείς χημικοί και βιολογικοί παράγοντες και γενικότερα οι επιπτώσεις της αφαλάτωσης στην ανθρώπινη υγεία. Τέλος, αναφέρονται και αναλύονται οι επιπτώσεις στο περιβάλλον καθώς και η κείμενη Ευρωπαϊκή και Ελληνική νομοθεσία που σχετίζεται με την ίδια την διαδικασία, αλλά και με την διαχείριση και προστασία των υδάτων γενικότερα.

Ευχαριστώ θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Ιωάννη Γιαννάκη, συνεργάτη στην βαθμίδα του Καθηγητή Εφαρμογών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε., για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση, που μου πρόσφερε στην πραγματοποίηση της Εργασίας.

Πανάγου Βασίλειος  
Ιούλιος 2018

**Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή:** Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής  
(Ονοματεπώνυμο)

.....  
(Υπογραφή)



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως αντικείμενο μελέτης την τεχνολογία αφαλάτωσης και τις επιδράσεις της στην υγεία και το περιβάλλον, με την ανάπτυξη του θέματος να γίνεται σε κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο λοιπόν, αναφέρονται και αναλύονται οι επιμέρους μέθοδοι αφαλάτωσης, οι τρεις κύριες ομάδες ταξινόμησης τους, η αξιοποίηση της ηλιακής και της πυρηνικής ενέργειας για την ενεργειοδότηση της διαδικασίας και οι προκλήσεις - προβλήματα που συνεπάγεται η ίδια η διαδικασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, μελετάται η χημική σύσταση του νερού και προσδιορίζονται οι επιπτώσεις της διαδικασίας της αφαλάτωσης στον ανθρώπινο οργανισμό και πιο συγκεκριμένα, οι επιπτώσεις των τοξικών χημικών στοιχείων και παραγόντων καθώς και των αντίστοιχων βλαβερών βιολογικών παραγόντων και μικροοργανισμών. Επίσης, αναφέρονται οι τρόποι απομάκρυνσης των τοξικών και βλαβερών χημικών και βιολογικών παραγόντων, μαζί με τα στάδια επεξεργασίας του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης και χρήσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται λόγος για τις επιπτώσεις της διαδικασίας στο φυσικό περιβάλλον (οικοσυστήματα, βιότοποι), με τις ίδιες τις επιπτώσεις να ταξινομούνται και να διαχωρίζονται σε αυτές των παράκτιων μονάδων αφαλάτωσης και σε εκείνες των μονάδων αφαλάτωσης της ενδοχώρας. Επίσης, αναφέρονται οι τρόποι απόρριψης του αλμόλοιπου, οι τρόποι αντιμετώπισης της αλατότητας, η κατανάλωση ενέργειας της διαδικασίας καθώς και η εξοικονόμηση ενέργειας που έχει επιτευχθεί μέχρι σήμερα. Επιπλέον, αναφέρονται και προτείνονται κάποιες τελικές παρατηρήσεις - συμπεράσματα μαζί με το «πράσινο» μοντέλο της διαχείρισης των υδάτων του Ισραήλ, που αποτελεί παράδειγμα προς μίμηση.

Τέλος, το τέταρτο κεφάλαιο ασχολείται με την κείμενη και ισχύουσα Ευρωπαϊκή και Ελληνική νομοθεσία όσον αφορά την ποιότητα του πόσιμου νερού, αλλά και γενικότερα με τις Ευρωπαϊκές και αντίστοιχες Ελληνικές διατάξεις περί διαχείρισης και προστασίας των υδάτινων πόρων. Επιπλέον, αναφέρεται η Ελληνική νομοθεσία που σχετίζεται με την ίδρυση και λειτουργία εγκαταστάσεων και μονάδων αφαλάτωσης στην Ελλάδα.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Ορισμός και έννοια της αφαλάτωσης.....	1
2. Ιστορική αναδρομή θερμικών μεθόδων.....	1
3. Ιστορική αναδρομή μεθόδων μεμβρανών.....	2

### 1. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

1.1 Ημιπερατές μεμβράνες, ώσμωση και ωσμωτική πίεση.....	5
1.2 Μέθοδοι - τεχνικές αφαλάτωσης.....	
1.2.1 Μέθοδοι εξάτμισης.....	10
1.2.1.1 Απόσταξη πολλαπλών αποτελεσμάτων (MED).....	10
1.2.1.2 Πολυβάθμια εκρηκτική απόσταξη (MSF).....	18
1.2.1.3 Θερμική και μηχανική συμπίεση ατμών (TVC - MVC).....	25
1.2.1.4 Απόσταξη κενού.....	35
1.2.2 Μέθοδοι μεμβρανών.....	37
1.2.2.1 Αντίστροφη ώσμωση (RO).....	37
1.2.2.2 Νανοδιήθηση (NF).....	58
1.2.2.3 Εμπρόσθια ώσμωση (FO).....	61
1.2.2.4 Ηλεκτροδιάλυση (ED).....	65
1.2.2.5 Συνεχής ηλεκτρικός απιονισμός (CEDI).....	69
1.2.2.6 Απόσταξη μεμβρανών (MD).....	71
1.2.3 Υπόλοιπες μέθοδοι.....	73
1.2.3.1 Υγροποίηση - Αφυγροποίηση (HDH).....	73
1.2.3.2 Ψύξη - Απόψυξη (FM).....	75
1.2.3.3 Ιοντοανταλλαγή.....	77
1.3 Αφαλάτωση και ηλιακή ενέργεια.....	80
1.3.1 Χρήση της ηλιακής ενέργειας για αφαλάτωση.....	81
1.3.1.1 Άμεση χρήση της ηλιακής ενέργειας.....	81
1.3.1.2 Έμμεση χρήση της ηλιακής ενέργειας.....	82
1.3.2 Αντίστροφη ώσμωση με την χρήση ηλιακής ενέργειας.....	83
1.4 Αφαλάτωση και πυρηνική ενέργεια.....	85
1.4.1 Σύζευξη μονάδων αφαλάτωσης με πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος.....	85
1.4.2 Σύζευξη μονάδων αφαλάτωσης με θερμικούς πυρηνικούς αντιδραστήρες.....	86

1.4.3 Σύζευξη μονάδων αφαλάτωσης με πυρηνικούς αντιδραστήρες συμπαγωγής.....	87
1.5 Προκλήσεις - προβλήματα αφαλάτωσης.....	89

## **2. ΧΗΜΕΙΑ, ΜΙΚΡΟΒΙΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ**

2.1 Χημεία νερού.....	91
2.1.1 Χημική δομή του μορίου του νερού.....	91
2.1.2 Φυσικές ιδιότητες του νερού.....	91
2.1.3 Ιδιαιτερότητες της πυκνότητας του νερού.....	91
2.1.4 Ιδιαιτερότητες του σημείου ζέσεως.....	92
2.1.5 Το νερό ως διαλύτης.....	92
2.1.6 Είδη - κατηγορίες νερού.....	93
2.1.7 Σκληρότητα νερού.....	95
2.1.8 Χημικοί παράγοντες και υγειονομικός αντίκτυπος.....	95
2.1.9 Αφαίρεση βαρέων μετάλλων και τοξικών μεταλλικών στοιχείων από υδατικά διαλύματα.....	98
2.2 Μικροβιολογία και επιπτώσεις στην υγεία.....	101
2.3 Στάδια επεξεργασίας του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης και χρήσης.....	106

## **3. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

3.1 Γενικά.....	109
3.2 Επιπτώσεις παράκτιων μονάδων αφαλάτωσης.....	113
3.2.1 Επιπτώσεις από την εισροή θαλασσινού νερού.....	113
3.2.2 Επιπτώσεις από την εκροή του αλμόλοιπου.....	114
3.2.3 Τρόποι αντιμετώπισης της αλατότητας.....	117
3.2.4 Κατανάλωση και εξοικονόμηση ενέργειας.....	117
3.2.5 Ισραήλ: Ένα παράδειγμα προς μίμηση στην διαχείριση των υδάτων.....	119
3.2.6 Τελικές παρατηρήσεις - συμπεράσματα.....	120
3.3 Επιπτώσεις μονάδων αφαλάτωσης της ενδοχώρας.....	121
3.3.1 Απόρριψη της άλμης σε επιφανειακά ύδατα και αποχετευτικά συστήματα.....	122
3.3.2 Απόρριψη σε λίμνες εξάτμισης.....	122
3.3.3 Απόρριψη με έγχυση σε πηγάδια υπό πίεση.....	123
3.3.4 Μηδενική απόρριψη υγρού.....	124

## **4. ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΚΑΙ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ**

4.1 Γενικά.....	125
4.2 Ποιότητα του πόσιμου νερού.....	128
4.2.1 Ευρωπαϊκή νομοθεσία.....	128
4.2.2 Ελληνική νομοθεσία.....	129
4.3 Νομοθεσία ίδρυσης και λειτουργίας εγκαταστάσεων αφαλάτωσης στην Ελλάδα.....	131

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>133</b>
--------------------------	------------





# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Ένας άνθρωπος μπορεί να επιβιώσει χωρίς οξυγόνο για τρία λεπτά, χωρίς νερό για τρεις ημέρες και χωρίς τροφή για τριάντα ημέρες. Είναι γνωστό ότι το 97% περίπου των παγκόσμιων αποθεμάτων νερού (το ίδιο το ανθρώπινο σώμα αποτελείται σε ποσοστό 70% από νερό), βρίσκεται στη θάλασσα αναμειγμένο σε μεγάλες αναλογίες με διάφορα διαλυμένα άλατα σε τέτοια μορφή, που η χρήση του είτε ως πόσιμο ή ακόμα και για βιομηχανικές διεργασίες καθίσταται αδύνατη. Συνεπώς, δημιουργήθηκε η ανάγκη για αξιοποίηση αυτών των διαθέσιμων υδάτινων αποθεμάτων, μέσω μιας διαδικασίας μετατροπής του αλμυρού ή υφάλμυρου νερού σε νερό πόσιμο και κατάλληλο για ανθρώπινη χρήση.

Αφαλάτωση, όπως αναφέρει και η ετυμολογία της λέξης «από + άλας», ονομάζεται η διεργασία αφαίρεσης αλάτων, ορυκτών αλάτων, μεταλλικών στοιχείων και ανόργανων ουσιών από μια αλατούχα ουσία και κυρίως από αλατούχα ύδατα. Έτσι, κατ' επέκταση η αφαλάτωση είναι μια μέθοδος ανάκτησης πόσιμου νερού από θαλασσινό νερό, υφάλμυρα ποτάμια και λίμνες. Εφαρμόζεται κυρίως σε περιοχές με ξηρό κλίμα, φτωχές σε πόσιμο νερό μεν, αλλά με πρόσβαση δε σε θαλασσινό. Εξίσου σημαντική με την ανάκτηση πόσιμου νερού από θαλασσινό, είναι και η καλύτερη δυνατή διαχείριση των αποθεμάτων του πόσιμου και καθαρού νερού και των υδάτινων πόρων, γενικότερα.

## 2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Η αφαλάτωση στην νεότερη ιστορία, άρχισε να αναπτύσσεται κατά τον 20<sup>ο</sup> αιώνα και συγκεκριμένα την δεκαετία του 1960. Το 1952, υπήρχαν μόνο 225 μονάδες αφαλάτωσης παγκοσμίως με ικανότητα παραγωγής 100,000 m<sup>3</sup>/ημ. πόσιμου νερού, ενώ σήμερα υπάρχουν πάνω από 15,000 μονάδες παραγωγικής ικανότητας άνω των 65,000,000 m<sup>3</sup>/ημ. Ωστόσο, καταγραφές δείχνουν ότι οι καταβολές της τοποθετούνται κατά τον 4<sup>ο</sup> π.Χ. αιώνα, όταν σύμφωνα με τον Αριστοτέλη αρχαίοι Έλληνες ναυτικοί εφάρμοζαν εξάτμιση θαλασσινού νερού. Ο ίδιος ο Αριστοτέλης το 320 π.Χ. στο έργο του «Μετεωρολογικά» έγραψε, ότι το αλμυρό νερό μέσω της εξάτμισής του και της συμπύκνωσης του παραγόμενου ατμού μετατρέπεται σε πόσιμο. Πολύ αργότερα, κατά τον 8<sup>ο</sup> μ.Χ. αιώνα σε μια πραγματεία ενός Άραβα συγγραφέα γίνεται περιγραφή αφαλάτωσης, που βασίζεται στην απόσταξη νερού. Παρά τις προσπάθειες που γίνονταν ανά τους αιώνες για αφαλάτωση των υδάτων (κυρίως βασισμένες στην εξάτμιση - απόσταξη), οι πρώτες πρώιμες συσκευές ενσωματώθηκαν στα πλοία μόλις τον 16<sup>ο</sup> αιώνα.

Τον 18<sup>ο</sup> αιώνα με την ανάπτυξη της ατμοπλοΐας η αναγκαιότητα για μεγάλη ποσότητα καθαρού νερού λόγω των ατμομηχανών, κατέστησε επιτακτική την αφαλάτωση θαλασσινού νερού για την αποφυγή διαβρώσεων στις μηχανές. Το 1843, ο Rillieux κατασκεύασε επιτυχώς, κατοχύρωσε την πατέντα του και πούλησε αποστακτήρες πολλαπλών αποτελεσμάτων. Η σπουδαιότητα αυτής της ανακάλυψης φάνηκε από το γεγονός, ότι το 1869 οι Άγγλοι εγκατέστησαν τη πρώτη μεγάλη μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού στο Άντεν της Υεμένης για τις ανάγκες του στόλου τους.

Η απόσταξη πολλαπλών αποτελεσμάτων ήταν η πρώτη τεχνική αφαλάτωσης που χρησιμοποιήθηκε, οι πρώτες μονάδες είχαν βυθισμένους σωλήνες - αποστακτήρες που παρουσίαζαν χαμηλή μεταφορά θερμότητας και υψηλά επίπεδα καθαλάτωσης. Οι κάθετοι και οριζόντιοι εξάτμιστές (πτωτικών फिल्म) όμως που υπάρχουν σήμερα, παρέχουν υψηλότερους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και η νανοδιήθηση πριν την απόσταξη πολλαπλών αποτελεσμάτων μειώνει τα επίπεδα καθαλάτωσης. Μερικά από τα μειονεκτήματα της απόσταξης πολλαπλών αποτελεσμάτων είναι η πολυπλοκότητα, η σχετικά χαμηλή μέγιστη θερμοκρασία άλμης (~ 65 °C) και το ενεργειακό κόστος.

Κατά τα τέλη της δεκαετίας του 1950, αναπτύσσεται η πολυβάθμια εκρηκτική απόσταξη και συγκεκριμένα από τον Silver το 1965, ο οποίος την κατοχύρωσε ως πατέντα του. Η μεγάλη καινοτομία που εισήγαγε ο Silver με την πολυβάθμια εκρηκτική απόσταξη, ήταν ότι διαχώρισε την εισαγωγή θερμότητας από την εξάτμιση λύνοντας έτσι ένα σημαντικό πρόβλημα στην εξάτμιση, την καθαλάτωση στην επιφάνεια του εναλλάκτη θερμότητας. Η πολυβάθμια εκρηκτική απόσταξη χρησιμοποιείται εμπορικά για πρώτη φορά από την εταιρεία Westinghouse, το 1957, στο Κουβέιτ. Το 1960, δημιουργούνται οι πρώτες μονάδες πολυβάθμιας εκρηκτικής απόσταξης εμπορικής χρήσης στο Κουβέιτ (19 στάδια, 4550 m<sup>3</sup>/ημ.) και στα Νησιά της Μάγχης (40 στάδια, 2775 m<sup>3</sup>/ημ.). Οι πρώτες μονάδες πολυβάθμιας εκρηκτικής απόσταξης (πριν το 1980) κατασκευάζονταν από ανθρακούχο χάλυβα και ήταν αρκετά βαριές και ογκώδεις για την αποφυγή διαβρώσεων. Παρόλα αυτά, μετά από μελέτες που έγιναν έχοντας ως σκοπό την μείωση της καθαλάτωσης, τον έλεγχο της διάβρωσης και την αύξηση της ικανότητας παραγωγής, οι νέες μονάδες αποτελούνταν από ανοξείδωτο χάλυβα και είχαν λιγότερο όγκο και βάρος. Οι μελλοντικές μελέτες ως προς την τεχνολογία της πολυβάθμιας εκρηκτικής απόσταξης, στοχεύουν σε θερμοδυναμικές βελτιώσεις και στην επιλογή καλύτερων υλικών.

### **3. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ**

Η παλαιότερη καταγραφή ημιπερατών μεμβρανών έγινε το 1748, όταν ο Abbe Nollet παρατήρησε το φαινόμενο της ώσμωσης. Το ίδιο φαινόμενο μελετήθηκε και κατά την δεκαετία του 1850. Την δεκαετία του 1940, ο Gerald Hassler αρχίζει να ερευνά τις ωσμωτικές ιδιότητες του σελοφάν. Το 1952, το νομοσχέδιο των Η.Π.Α. περί «αλατούχων υδάτων» έχει ως αποτέλεσμα την ίδρυση της υπηρεσίας αλατούχων υδάτων (Office of Saline Water) το 1955, που αργότερα το 1974 μετονομάζεται σε υπηρεσία υδατικής έρευνας και τεχνολογίας (Office of Water Research and Technology). Το 1959, οι Breton και Reid από το Πανεπιστήμιο της Φλόριντα παρουσιάζουν την δυνατότητα αφαλάτωσης ενός फिल्म οξικής κυτταρίνης.

Το 1962, οι Loeb και Surirajan από το Πανεπιστήμιο UCLA της Καλιφόρνια, με κρατική χρηματοδότηση, αναπτύσσουν ασύμμετρες μεμβράνες οξικής κυτταρίνης οι οποίες το 1965 θα τοποθετηθούν στην μονάδα αφαλάτωσης της Coalinga στην Καλιφόρνια. Το 1963, η εταιρεία General Atomics δημιουργεί για πρώτη φορά μια κυλινδρική δομή εντός της οποίας, περιέχονται στρώματα μεμβρανών περιτυλιγμένα σε σπείρες γύρω από έναν διάτρητο διαπερατό σωλήνα. Το 1967, η εταιρεία DuPont αναπτύσσει μια δομή με κοίλες ίνες, παρόμοια με αυτή της General Atomics. Το 1972, ο Cadotte δημιουργεί μια ενδοεπιφανειακή σύνθετη μεμβράνη πολυαμιδίου. Το 1975, η εταιρεία Fluid Systems εισάγει στην αγορά την πρώτη ενδοεπιφανειακή σύνθετη μεμβράνη εμπορικής χρήσης και τον ίδιο χρόνο αυτός ο τύπος μεμβράνης τοποθετείται στην νεόδμητη εγκατάσταση αφαλάτωσης της Jiddah (Σαουδική Αραβία). Το 1978, ο Cadotte δημιουργεί το πρώτο αρωματικό σύνθετο λεπτό φιλμ με την ονομασία FT-30 (FilmTec-30) έχοντας ως βάση την σύνθετη μεμβράνη πολυαμιδίου του 1972.

Το 1982, καταργείται η υπηρεσία υδατικής έρευνας και τεχνολογίας των Η.Π.Α. και η κρατική χρηματοδότηση για έρευνες στον τομέα της αφαλάτωσης μειώνεται αρκετά. Το 1986, οι εταιρείες Fluid Systems, Nitto Denko και FilmTec εισάγουν και διαθέτουν ευρέως στην αγορά μεμβράνες νανοδιήθησης που λειτουργούν σε συνθήκες χαμηλής πίεσης. Το 1998, οι εταιρείες Grace - Davison και Mobil εγκαθιστούν την πρώτη μεγάλη μονάδα υπερδιύλισης και διαχωρισμού διαλυτών στο διυλιστήριο του Beaumont στο Τέξας. Οι μελλοντικές μελέτες, με την βοήθεια της νανοτεχνολογίας, εστιάζουν στην ανάπτυξη νανοσύνθετων μεμβρανών με μεγαλύτερη εκλεκτικότητα, ροή νερού και αντοχή στο χλώριο, ώστε να μειωθεί το κόστος και να αυξηθεί η απόδοση.



# 1. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

## 1.1 ΗΜΙΠΕΡΑΤΕΣ ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ, ΩΣΜΩΣΗ ΚΑΙ ΩΣΜΩΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ

Ημιπερατή είναι η μεμβράνη που επιτρέπει να περνούν μέσα από τους πόρους της τα μόρια του διαλύτη, αλλά δεν επιτρέπει να περνούν τα μόρια της διαλυμένης ουσίας. Ημιπερατές μεμβράνες υπάρχουν και φυσικές (π.χ. η κυτταρική μεμβράνη) και συνθετικές (π.χ. το σελοφάν). Οι ημιπερατές μεμβράνες κατασκευάζονται από οξική κυτταρίνη ή από πολυαμίδια με τη μορφή μικροσκοπικών διάτρητων ινών. Οι ημιπερατές μεμβράνες επίσης ονομάζονται και ωσμωτικά διαφράγματα, καθώς επιτρέπουν τη διέοδο των μορίων του διαλύτη όχι όμως και των μορίων ή ιόντων της διαλυμένης ουσίας. Οι πόροι των μεμβρανών αυτών είναι γενικά μικρότεροι των 250 nm. Πολλές φυσικές, ιδίως ζωικές, μεμβράνες (κύστεις) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν ημιπερατές μεμβράνες. Πολύ καλές μεμβράνες είναι επίσης οι πορωδείς πλάκες, που περιέχουν στους πόρους τους δυσδιάλυτα άλατα. Οι ημιπερατές μεμβράνες που χρησιμοποιούνται στην πράξη, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Διογκωμένα υλικά κολλοειδούς σύστασης όπως π.χ. η ζελατίνη, το ελαστικό κόμμι, η κυτταρίνη και τα παράγωγά της κ.ά.
- Μη διογκωμένα υλικά όπως π.χ. τα περισσότερα δυσδιάλυτα σύμπλοκα άλατα όπως είναι ο σιδηροκυανιούχος χαλκός,  $\text{Cu}_2(\text{Fe}(\text{CN})_6)$ , όταν βρίσκονται στους πόρους πορωδών δοχείων, το ωσμωτικό διάφραγμα Traube κ.ά.

Το σπουδαιότερο χαρακτηριστικό γνώρισμα κάθε ημιπερατής μεμβράνης είναι η διαπερατότητά της στα διάφορα μόρια ή σωματίδια. Η διαπερατότητα εξαρτάται από τη σύσταση της μεμβράνης και ιδίως από τις ηλεκτροχημικές ιδιότητές της. Η ιδιότητα που έχει μια ημιπερατή μεμβράνη να μην επιτρέπει τη διέοδο των μορίων της διαλυμένης ουσίας, δεν οφείλεται στη διάμετρο των πόρων της μεμβράνης ή στο μέγεθος των μορίων της διαλυμένης ουσίας, αλλά σε εκλεκτική παρεμπόδιση ηλεκτροχημικής κυρίως φύσης.

Ωσμωση ονομάζεται το φαινόμενο της διέλευσης περισσότερων μορίων διαλύτη, μέσω ημιπερατής μεμβράνης, από τον διαλύτη στο διάλυμα ή από το διάλυμα μικρότερης συγκέντρωσης (αραιότερο) προς το διάλυμα μεγαλύτερης συγκέντρωσης σε διαλυμένη ουσία (πυκνότερο). Η ώσμωση είναι μια φυσική διαδικασία κατά την οποία ο διαλύτης κινείται αυθόρμητα μέσω μεμβράνης, που είναι διαπερατή για τα μόριά του όχι όμως και για τα μόρια της διαλυμένης ουσίας και είτε διαχωρίζει δύο διαλύματα διαφορετικών συγκεντρώσεων ή χωρίζει ένα διαλύτη από ένα διάλυμα. Χωρίς την ύπαρξη της μεμβράνης θα συνέβαινε απλή ανάμειξη των δύο διαλυμάτων ή του διαλύτη και του διαλύματος. Αν από την ημιπερατή μεμβράνη περνά και διαλυμένη ουσία, τότε η διαδικασία παύει να είναι ώσμωση και γίνεται

διάχυση μεταξύ των δύο διαλυμάτων. Η ώσμωση πραγματοποιείται με σκοπό να εξισωθούν οι συγκεντρώσεις των διαλυμάτων εκατέρωθεν της ημιπερατής μεμβράνης.

Ωσμωτική πίεση (Π) διαλύματος, που διαχωρίζεται με ημιπερατή μεμβράνη από τον καθαρό διαλύτη, ονομάζεται η ελάχιστη πίεση που πρέπει να ασκηθεί εξωτερικά στο διάλυμα, ώστε να εμποδιστεί το φαινόμενο της ώσμωσης, χωρίς να μεταβληθεί ο όγκος του διαλύματος. Με άλλα λόγια, είναι η ελάχιστη τιμή της εφαρμοζόμενης εξωτερικής πίεσης για την οποία σταματά και παύει το φαινόμενο της ώσμωσης και επικρατεί μια κατάσταση ισορροπίας.

## 1.2 ΜΕΘΟΔΟΙ - ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Η τεχνολογία αφαλάτωσης έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλά πεδία για την επίτευξη ειδικής ποιότητας νερού. Για παράδειγμα, στην βιομηχανία ενέργειας, η τεχνολογία απόσταξης χρησιμοποιείται για την παραγωγή πόσιμου νερού και νερού ανθρώπινης χρήσης. Στην βιομηχανία διύλισης πετρελαίου, οι μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης χρησιμοποιούνται για την παραγωγή 2000 λιβρών (περίπου ένας τόνος) νερού τροφοδοσίας λεβήτων, που απαιτούν πολύ χαμηλά επίπεδα σκληρότητας και διοξειδίου του πυριτίου. Στο πεδίο της κατασκευής μικροσίπ, οι μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης χρησιμοποιούνται για την παραγωγή νερού 18 ΜΩ (= megohm,  $10^6 \Omega$ ) για ειδικό πλύσιμο. Για τις διάφορες κοινότητες, οι μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία λυμάτων, με βάση τα πρότυπα που υπάρχουν για τις εφαρμογές παροχής νερού.

Οι εξελίξεις στον τομέα της αφαλάτωσης περιλαμβάνουν βελτιώσεις σε βασικά υλικά, τεχνικές παραγωγής, αποθήκευσης και ανάκτησης της μηχανικής ενέργειας. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο στόχος ήταν η βελτίωση της λειτουργίας της τεχνολογίας αφαλάτωσης για την επίτευξη μέγιστης ανάκτησης νερού με την λιγότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας, ελαχιστοποιώντας παράλληλα την ροή αποβλήτων υψηλής αλατότητας. Οι βελτιώσεις έχουν μειώσει θερμοκρασίες, πιέσεις λειτουργίας και ηλεκτρικές παραμέτρους κοντά στο θεωρητικό επίπεδο για εφαρμογές σε πολλά είδη παροχών νερού. Άλλες εξελίξεις, περιλαμβάνουν την επεξεργασία χημικών που επιτρέπουν την επιπλέον ανάκτηση νερού μέσω της επέκτασης των ορίων κορεσμού των αλάτων στο διάλυμα, την ελεγχόμενη καθαλάτωση αντίστροφης ώσμωσης, την εμπρόσθια ώσμωση κ.ά.

Η πιο σημαντική εξέλιξη στην τεχνολογία αντίστροφης ώσμωσης είναι οι βελτιώσεις στα υλικά των μεμβρανών. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, η βιομηχανία απομακρύνθηκε από την κυτταρίνη οξικού άλατος και προσέγγισε μια σύνθεση πολυαμιδίου, που μείωσε τις απαιτήσεις σε ενέργεια από 300 - 400 psi για εφαρμογές σε υφάλμυρα ύδατα σε θεωρητικές τιμές ωσμωτικής πίεσης της τάξης των 100 - 200 psi. Το κύριο μειονέκτημα του τελευταίου υλικού μεμβρανών είναι ότι δεν έχει αντοχή στην οξειδωση και για αυτό, είναι πιο ευάλωτο σε μολύνσεις κατά την λειτουργία του.

Η παραγωγή μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης αυτοματοποιήθηκε κατά τις αρχές του 2000. Πριν από αυτό, οι μεμβράνες κατασκευάζονταν χειροποίητα αλλά λόγω της απώλειας υλικού στην επιφάνεια της μεμβράνης και ανεπάρκειας συμμόρφωσης με τους ελέγχους ποιότητας, αυτή η πρακτική εγκαταλείφθηκε. Η αυτοματοποιημένη παραγωγή αύξησε την επιφάνεια των μεμβρανών περισσότερο

από 10% εντός των συστημάτων και επέτρεψε την εισαγωγή στοιχείων με διάμετρο από 8 μέχρι και 16 - 18 ιντσών.

Οι κυριότερες πρόοδοι στις τεχνολογίες της πολυβάθμιας εκρηκτικής απόσταξης και της απόσταξης πολλαπλών αποτελεσμάτων, έγιναν στις βελτιώσεις των υλικών για την αντιμετώπιση της διάβρωσης και της μεταφοράς θερμότητας. Πολλά υλικά σήμερα έχουν αντοχή στην φθορά και είναι πιο οικονομικά, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, επειδή αυτές οι τεχνολογίες λειτουργούν με κενό αέρος αντιμετώπισαν υπαρκτές προκλήσεις κατά την λειτουργία τους, οι οποίες όμως ξεπεράστηκαν με την βοήθεια τεχνολογιών καλύτερης σφράγισης.

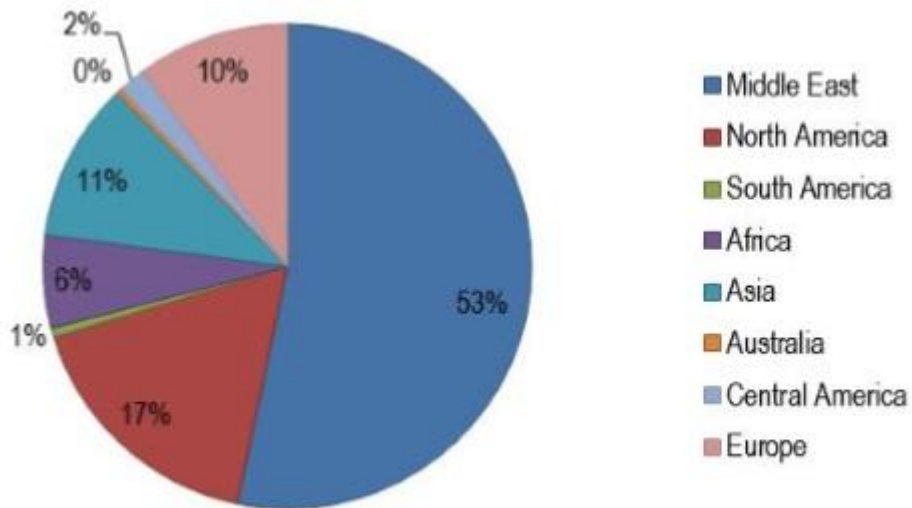
Στην βιομηχανία της αφαλάτωσης, σημαντικό ρόλο έχουν παίζει και οι συσκευές ανάκτησης ενέργειας που έχουν εισαχθεί στην αγορά. Ένα παράδειγμα είναι η συσκευή εναλλαγής πίεσης υψηλής αποδοτικότητας, που κάνει χρήση αντιδιαβρωτικών κεραμικών υλικών. Η ενεργειακή κατανάλωση για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού με την χρήση αντίστροφης ώσμωσης και την λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας, μειώθηκε από 11 - 14 kWh/kgal (kilogallons) σε 8 - 11 kWh/kgal. Στην πολυβάθμια εκρηκτική απόσταξη και την απόσταξη πολλαπλών αποτελεσμάτων, η ενεργειακή κατανάλωση που σχετιζόταν με τα υλικά και τις βελτιώσεις των διαδικασιών, μειώθηκε από 15 kWh/kgal σε 13 kWh/kgal.

Οι μέθοδοι αφαλάτωσης που χρησιμοποιούνται σήμερα κατατάσσονται κυρίως σε δύο κατηγορίες, στις θερμικές μεθόδους ή μεθόδους εξάτμισης - απόσταξης και στις μεθόδους μεμβρανών. Υπάρχουν επίσης και άλλες μέθοδοι, οι οποίες βρίσκονται ακόμη σε πειραματικό στάδιο ή δεν είναι συμφέρουσες από οικονομική άποψη. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την αφαλάτωση ταξινομούνται ως εξής:

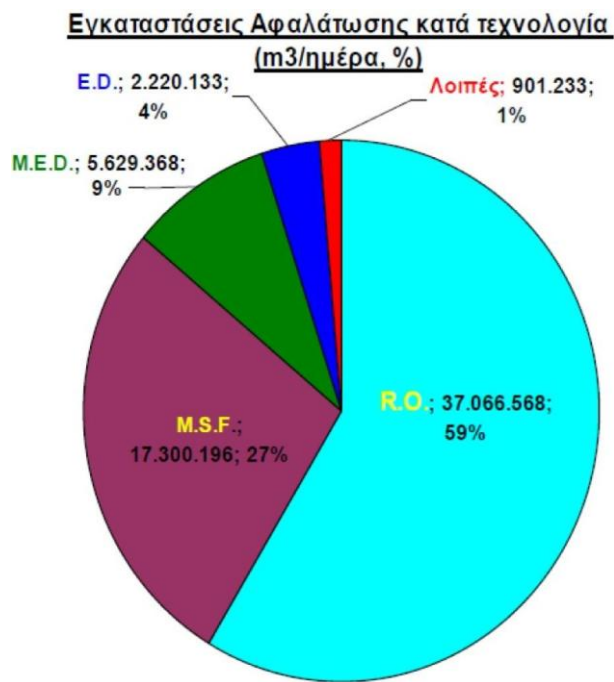
- Μέθοδοι εξάτμισης ή θερμικές: Απόσταξη πολλαπλών αποτελεσμάτων (Multiple Effect Distillation, MED), Πολυβάθμια εκρηκτική ή ακαριαία απόσταξη (Multi - Stage Flash Distillation, MSF), Θερμική και μηχανική συμπίεση ατμών (Thermal and Mechanical Vapor Compression, TVC - MVC), Απόσταξη κενού (Vacuum distillation).
- Μέθοδοι μεμβρανών: Αντίστροφη ώσμωση (Reverse Osmosis, RO), Νανοδίθηση (Nanofiltration, NF), Εμπρόσθια ώσμωση (Forward Osmosis, FO), Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis, ED), Συνεχής ηλεκτρικός απιονισμός ή ηλεκτροδιάλυση πληρωμένων κυψελών (Continuous Electrodeionization or filled - cell electrodialysis, CEDI), Απόσταξη μεμβρανών (Membrane Distillation, MD).
- Υπόλοιπες μέθοδοι: Υγροποίηση - αφυγροποίηση (Humidification - Dehumidification, HDH), Ψύξη - απόψυξη (Freezing - Melting, FM), Ιοντοανταλλαγή (Ion exchange).

Οι Εικ. 1.1, 1.2 που ακολουθούν δείχνουν αντίστοιχα τα ποσοστά των μονάδων αφαλάτωσης ανά γεωγραφική περιοχή και τα ποσοστά της παγκόσμιας χρήσης της κάθε τεχνικής αφαλάτωσης, μαζί με τα παραγόμενα  $m^3/ημ$ . Η Εικ. 1.3 δείχνει την ενεργειακή κατανάλωση ορισμένων τεχνικών σε  $kWh/m^3$ , ο Πίν. 1.1 δείχνει το σύνολο διαλυμένων στερεών (Total of Dissolved Solids, TDS) για κάποια είδη υδάτων και ο Πίν. 1.2 δείχνει τις μεγαλύτερες μονάδες αφαλάτωσης παγκοσμίως.

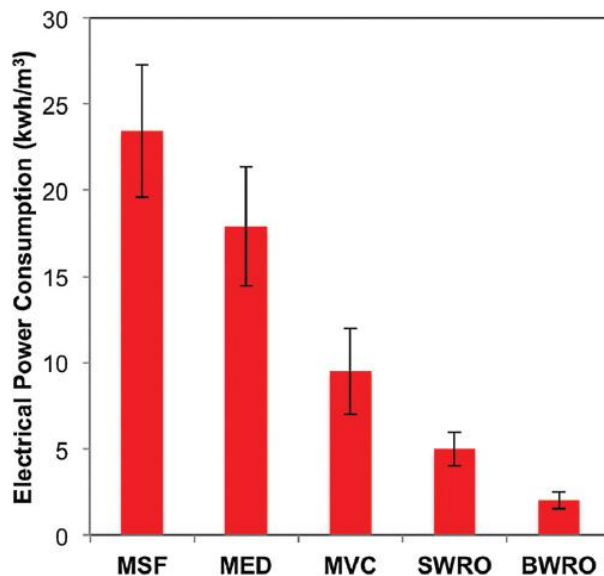




**Εικόνα 1.1:** Ποσοστά μονάδων αφαλάτωσης ανά γεωγραφική περιοχή



**Εικόνα 1.2:** Ποσοστά παγκόσμιας χρήσης τεχνικών αφαλάτωσης



**Εικόνα 1.3:** Διάγραμμα κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας των κυριότερων τεχνικών αφαλάτωσης

**Πίνακας 1.1:** Τυπικές πηγές υδάτων για αφαλάτωση μαζί με το σύνολο διαλυμένων στερεών τους και την ελάχιστη ενέργεια διαχωρισμού (ειδική κατανάλωση ενέργειας)

Πηγή Υδάτων*	Σύνολο Διαλυμένων Στερεών (TDS) (mg/l)	Ελάχιστη Ενέργεια Διαχωρισμού (kWh/m <sup>3</sup> )**
Θαλάσσια Ύδατα	15,000–50,000	0.67
Υφάλμυρα Ύδατα	1,500–15,000	0.17
Ύδατα Ποταμών	500–3,000	0.04
Πόσιμα Ύδατα	< 500	< 0.01
Μη Επεξεργασμένα Λύματα	250–1,000	0.01
Επεξεργασμένα Λύματα	500–700	0.01

\*Δεδομένα από την Αυστραλία (2008).  
 \*\*Υπολογισμός βάσει του μέσου όρου TDS του εύρους.

**Πίνακας 1.2:** Μεγαλύτερες μονάδες αφαλάτωσης παγκοσμίως

Μεγαλύτερες μονάδες αφαλάτωσης ανά τον κόσμο	
Χώρα, Μονάδα αφαλάτωσης	Παραγωγική ικανότητα (m <sup>3</sup> /ημ.)
Σαουδική Αραβία, Ras Al-Khair	1,025,000
Σαουδική Αραβία, Shuaiba III	880,000
Σαουδική Αραβία, Ras Al-Zour	800,000

Σαουδική Αραβία, Al Jobail II Ex	730,000
Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, Jebel Ali M	600,000
Κουβέιτ, Al-Zour North	567,000
Μεγαλύτερες μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης ανά τον κόσμο	
Χώρα, Μονάδα αφαλάτωσης	Παραγωγική ικανότητα (m <sup>3</sup> /ημ.)
Ισραήλ, Soreq	510,000*
Αλγερία, Magtaa	500,000
Μελβούρνη Αυστραλίας, Victoria	444,000
Τρινιδάδ, Point Lisas	109,019
Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, Tampa Bay	94,635
* Η παραγωγική ικανότητα σήμερα έχει φτάσει τα 624,000 m <sup>3</sup> /ημ.	

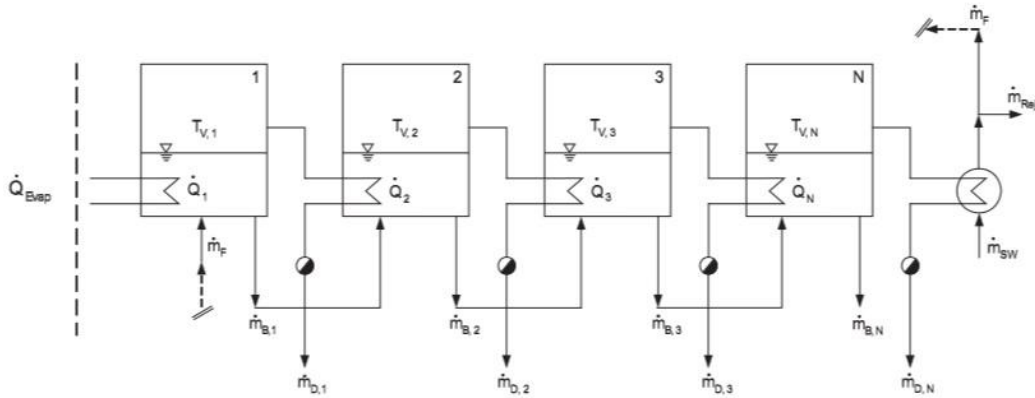
### 1.2.1 Μέθοδοι εξάτμισης - απόσταξης (ή θερμικές μέθοδοι)

#### 1.2.1.1 Απόσταξη πολλαπλών αποτελεσμάτων (Multiple Effect Distillation, MED)

Η MED λειτουργεί μέσω μιας σειράς βημάτων (αποτελεσμάτων). Το εισερχόμενο νερό ψεκάζεται πάνω σε κάθετους ή συνηθέστερα σε οριζόντια προσανατολισμένους σωλήνες, που αργότερα θερμαίνονται για να δημιουργήσουν ατμό. Ο ατμός στην συνέχεια, χρησιμοποιείται για την θέρμανση της επόμενης παρτίδας εισερχόμενου θαλασσινού νερού. Για να υπάρξει αύξηση της αποτελεσματικότητας και της απόδοσης, ο ατμός θέρμανσης του θαλασσινού νερού μπορεί να ληφθεί από κοντινούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόλο που αυτή η μέθοδος είναι η πλέον αποδοτική από θερμοδυναμικής άποψης, υπάρχουν μερικοί σημαντικοί περιορισμοί που επηρεάζουν την δυνατότητα μεγιστοποίησης της παραγωγής. Αυτοί οι περιορισμοί είναι η μέγιστη τιμή θερμοκρασίας και ο μέγιστος αριθμός αποτελεσμάτων.

Στην αφαλάτωση θαλασσινού νερού με MED, η παραγωγή πόσιμου νερού μπορεί να γίνει και σε ένα μόνο στάδιο - αποτέλεσμα. Τα πολλαπλά στάδια εξυπηρετούν μόνο τον σκοπό της ελαχιστοποίησης των ενεργειακών απαιτήσεων. Στην MED, το επόμενο στάδιο λειτουργεί ως συμπυκνωτής του ατμού που παράχθηκε στο προηγούμενο στάδιο. Το πρώτο στάδιο τροφοδοτείται με ενέργεια από εξωτερικές πηγές, συνήθως με ατμό θέρμανσης από λέβητα ή απόβλητο ατμό από κάποιον ατμοστρόβιλο.

Η Εικ. 1.4 δείχνει μια απλοποιημένη διάταξη απόσταξης πολλαπλών αποτελεσμάτων χωρίς προθέρμανση της τροφοδοσίας, δηλαδή με την προϋπόθεση ότι η ροή τροφοδοσίας, που εισέρχεται στο πρώτο στάδιο - αποτέλεσμα, είναι ήδη υπό θερμοκρασία εξάτμισης. Επίσης, γίνεται η παραδοχή ότι η συλλογή του παραγόμενου αποστάγματος των επιμέρους σταδίων, θα γίνει χωρίς την οποιαδήποτε ανάκτηση θερμότητας και ότι η ροή του συμπυκνώματος στο επακόλουθο στάδιο, γίνεται χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η «αστραπιαία» απόσταξη που αναλύεται παρακάτω.



**Εικόνα 1.4:** Απλοποιημένη διάταξη της απόσταξης πολλαπλών αποτελεσμάτων

Όπου  $\dot{m}_{D,1}$  είναι η μαζική ροή του αποστάγματος σε kg/s από το πρώτο στάδιο,  $\dot{m}_{D,2}$  είναι η μαζική ροή του αποστάγματος από το δεύτερο στάδιο,  $\dot{m}_{D,3}$  είναι η μαζική ροή του αποστάγματος από το τρίτο στάδιο,  $\dot{m}_{D,N}$  είναι η μαζική ροή του αποστάγματος από το N στάδιο,  $\dot{m}_{sw}$  είναι η μαζική ροή όλου του εισερχόμενου θαλασσινού νερού από το οποίο ένα τμήμα θα συνεχίσει στο σύστημα ( $\dot{m}_F$ ) και ένα τμήμα θα απορριφθεί αμέσως ( $\dot{m}_{rej}$ ),  $\dot{m}_F$  είναι η μαζική ροή της τροφοδοσίας,  $\dot{m}_{rej}$  είναι η μαζική ροή του θαλασσινού νερού που απορρίπτεται αμέσως μόλις εισέλθει στην μονάδα,  $\dot{m}_{B,1}$  είναι η μαζική ροή της άλμης από το πρώτο στάδιο,  $\dot{m}_{B,2}$  είναι η μαζική ροή της άλμης από το δεύτερο στάδιο,  $\dot{m}_{B,3}$  είναι η μαζική ροή της άλμης από το τρίτο στάδιο,  $\dot{m}_{B,N}$  είναι η μαζική ροή της άλμης από το N στάδιο,  $T_{V,1}$  είναι η θερμοκρασία του ατμού σε K στο πρώτο στάδιο,  $T_{V,2}$  είναι η θερμοκρασία του ατμού στο δεύτερο στάδιο,  $T_{V,3}$  είναι η θερμοκρασία του ατμού στο τρίτο στάδιο,  $T_{V,N}$  είναι η θερμοκρασία του ατμού στο N στάδιο,  $\dot{Q}_1$  είναι η ροή θερμότητας σε kJ/s (kWatt) στο πρώτο στάδιο,  $\dot{Q}_2$  είναι η ροή θερμότητας στο δεύτερο στάδιο,  $\dot{Q}_3$  είναι η ροή θερμότητας στο τρίτο στάδιο,  $\dot{Q}_N$  είναι η ροή θερμότητας στο N στάδιο και τέλος,  $\dot{Q}_{Evap}$  είναι η ροή (της απόβλητης αρκετές φορές) θερμότητας (εξάτμισης) που προέρχεται από τον εξωτερικό λέβητα ή στρόβιλο και προωθείται στο πρώτο στάδιο. Η συνολική μαζική ροή του αποστάγματος που παράγεται σε μια εγκατάσταση με N στάδια, είναι το άθροισμα των μαζικών ροών των αποσταγμάτων των επιμέρους σταδίων και δίνεται από την εξ. 1.1.

$$\dot{m}_D = \dot{m}_{D,1} + \dot{m}_{D,2} + \dot{m}_{D,N-1} + \dot{m}_{D,N} \quad (1.1)$$

Θεωρώντας αμελητέες τις απώλειες θερμότητας, το ποσό της μεταφερόμενης θερμότητας στον κάθε συμπυκνωτή - εξατμιστή δίνεται από τις εξισώσεις 1.2, 1.3, 1.4 και 1.5.

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_{D,1} \cdot \Delta h_{V,T1} \quad (1.2)$$

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_{D,2} \cdot \Delta h_{V,T2} \quad (1.3)$$

$$\dot{Q}_{N-1} = \dot{m}_{D,N-1} \cdot \Delta h_{V,TN-1} \quad (1.4)$$

$$\dot{Q}_N = \dot{m}_{D,N} \cdot \Delta h_{V,TN} \quad (1.5)$$

Όπου  $\Delta h_{V,T1}$  είναι η ενθαλπία (μεταβολή της θερμότητας εξάτμισης) σε kJ/kg του πρώτου σταδίου,  $\Delta h_{V,T2}$  είναι η ενθαλπία του δεύτερου σταδίου και  $\Delta h_{V,TN}$  είναι η ενθαλπία του N σταδίου.

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας, όλες οι ροές θερμότητας είναι ίσες και ισχύει η εξ. 1.6.

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}_{N-1} = \dot{Q}_N = \dot{Q}_{\text{evap}} \quad (1.6)$$

Η ειδική κατανάλωση θερμότητας μιας μονάδας MED, μπορεί να εκφραστεί από την εξ. 1.7.

$$\frac{\dot{Q}_{\text{evap}}}{\dot{m}_D} = \frac{\dot{Q}_{\text{evap}}}{\dot{m}_{D,1} + \dot{m}_{D,2} + \dot{m}_{D,N-1} + \dot{m}_{D,N}} = \frac{\dot{Q}_{\text{evap}}}{\frac{\dot{Q}_1}{\Delta h_{V,T1}} + \frac{\dot{Q}_2}{\Delta h_{V,T2}} + \frac{\dot{Q}_{N-1}}{\Delta h_{V,TN-1}} + \frac{\dot{Q}_N}{\Delta h_{V,TN}}} = \frac{1}{\frac{1}{\Delta h_{V,T1}} + \frac{1}{\Delta h_{V,T2}} + \frac{1}{\Delta h_{V,TN-1}} + \frac{1}{\Delta h_{V,TN}}} \quad (1.7)$$

Η εξ. 1.7 μπορεί να απλοποιηθεί με την εισαγωγή της μέσης τιμής της ενθαλπίας  $\Delta h_{V,Tm}$  ως εξής:

$$\frac{\dot{Q}_{\text{evap}}}{\dot{m}_D} = \frac{\Delta h_{V,Tm}}{N} \quad (1.8)$$

$$T_m = \frac{\sum T_i}{N} \quad (1.9)$$

Όπου  $T_m$  είναι η μέση τιμή όλων των θερμοκρασιών των επιμέρους σταδίων.

Ερευνώντας την διαδικασία από την οπτική της εξοικονόμησης ενέργειας, είναι αξιοσημείωτο να γίνει επιλογή του μεγαλύτερου δυνατού αριθμού σταδίων. Κάθε επιπλέον στάδιο αυξάνει το επενδυτικό κόστος και για αυτό πρέπει να βρεθεί ο μέγιστος δυνατός αριθμός σταδίων, με το μικρότερο επενδυτικό κόστος και την μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Η μόνωση ενός σωλήνα δεν πρέπει να είναι τόσο έντονη (παχιά), ώστε το κόστος για το υλικό της μόνωσης να καταναλώνει το κόστος που εξοικονομήθηκε ενεργειακά. Για τον υπολογισμό του επενδυτικού κόστους μιας μονάδας MED, είναι απαραίτητο να είναι γνωστό το μέγεθος της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας του εξατμιστή - συμπυκνωτή.

Η ενσωμάτωση της προθέρμανσης της ροής τροφοδοσίας και η ανάκτηση της θερμότητας των επιμέρους σταδίων, μπορεί να γίνει με μια επέκταση στο όλο σύστημα. Σε αυτήν την διάταξη, η ροή τροφοδοσίας έχει αντίθετη ροή από το απόσταγμα και την άλμη και τα χαρακτηριστικά της είναι ένας προθερμαντήρας και ένας εξατμιστής, σε κάθε στάδιο. Επιπλέον, είναι απαραίτητοι ένας εξωτερικός προθερμαντήρας και ένας εξωτερικός συμπυκνωτής. Ως εξωτερικοί παράγοντες και μη ενσωματωμένοι στο σύστημα, έχουν διαφορετική πηγή ενέργειας από το σύστημα και ο σχεδιασμός τους γίνεται ξεχωριστά. Ο εξωτερικός προθερμαντήρας έχει ως σκοπό ύπαρξης την θέρμανση του ρεύματος τροφοδοσίας μέχρι αυτό να φτάσει σε θερμοκρασία εξάτμισης. Ως εκ τούτου, η τελική διαφορά θερμοκρασίας και η ανύψωση του σημείου βρασμού συσχετίζονται σύμφωνα με την εξ. 1.10.

$$\dot{Q}_{PH,1} = \dot{m}_F \cdot c_p \cdot (\Delta T_{TTD} + \Delta T_{BPE}) \quad (1.10)$$

Όπου  $\dot{Q}_{PH,1}$  είναι η ροή θερμότητας του προθερμαντήρα στο πρώτο στάδιο,  $c_p$  είναι η ειδική θερμότητα σε  $\text{kJ}/(\text{kgK})$ ,  $\Delta T_{TTD}$  είναι τελική διαφορά θερμοκρασίας (terminal temperature difference) και  $\Delta T_{BPE}$  είναι η ανύψωση του σημείου βρασμού (boiling point elevation).

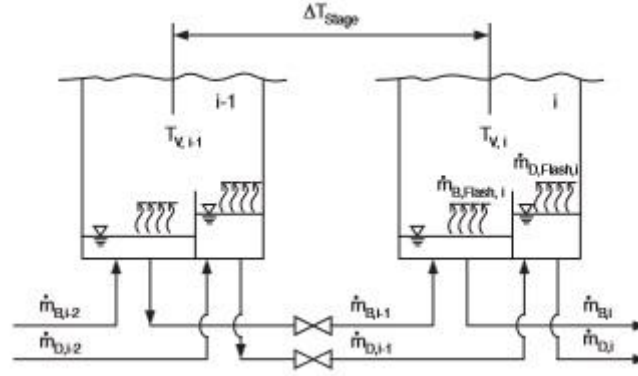
Η μάζα του ατμού του πρώτου σταδίου συμπυκνώνεται στην επιφάνεια του προθερμαντήρα του πρώτου σταδίου και επίσης στον συμπυκνωτή του δεύτερου σταδίου. Επιπλέον, από τον εξατμιστή του δεύτερου σταδίου παράγεται ατμός, ο όγκος του οποίου είναι μειωμένος, λόγω της ποσότητας που συμπυκνώνεται στον προθερμαντήρα. Ωστόσο, η παραπάνω ανάλυση της αρχής των πολλαπλών αποτελεσμάτων που δείχνει ότι η ροή του αποστάγματος ισούται με το προϊόν της ροής του ατμού θέρμανσης είναι ανακριβής, γιατί δεν έχει ληφθεί υπόψη η αποθηκευμένη στην άλμη και στο απόσταγμα ενέργεια, που χρησιμοποιείται. Σε μια μονάδα MED, η άλμη και το απόσταγμα τροφοδοτούνται από στάδιο σε στάδιο. Και τα δύο διαλύματα φεύγουν από το κάθε στάδιο υπό την μορφή βραστού νερού. Η θερμοκρασία βρασμού και η πίεση βρασμού, καθορίζονται από τις συνθήκες που επικρατούν στο κάθε στάδιο. Για να μεταφερθεί η θερμότητα στον συμπυκνωτή - εξατμιστή, πρέπει να υπάρχει μια κινητήρια διαφορά θερμοκρασίας. Αυτό σημαίνει ότι και η άλμη και το απόσταγμα, εισέρχονται σε έναν θάλαμο στον οποίο υπάρχει χαμηλότερη πίεση και χαμηλότερη θερμοκρασία βρασμού. Η μοναδική πιθανότητα απελευθέρωσης αυτού του παρόντος πλεονάσματος ενέργειας υπό αυτές τις συνθήκες, είναι μέσω μιας αυτόματης παραγωγής ατμού. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως «αστραπιαία εξάτμιση». Σε περίπτωση που η ανύψωση του σημείου βρασμού θεωρηθεί αμελητέα, το μαζικό και το ενεργειακό ισοζύγιο οδηγούν σε δύο εξισώσεις 1.11, 1.12 για την μάζα που παράγεται από την άλμη και το απόσταγμα της αστραπιαίας εξάτμισης.

$$\dot{m}_{B,Flash,i} \cdot \Delta h_{V,Ti} = \dot{m}_{B,i-1} \cdot c_{p,B} \cdot (T_{i-1} - T_i) \Rightarrow \frac{\dot{m}_{B,Flash,i}}{\dot{m}_{B,i-1}} = \frac{c_{p,B} \cdot (T_{i-1} - T_i)}{\Delta h_{V,Ti}} = \frac{c_{p,B} \cdot \Delta T_{stage,i}}{\Delta h_{V,Ti}} \quad (1.11)$$

$$\dot{m}_{D,Flash,i} \cdot \Delta h_{V,Ti} = \dot{m}_{D,i-1} \cdot c_{p,D} \cdot (T_{i-1} - T_i) \Rightarrow \frac{\dot{m}_{D,Flash,i}}{\dot{m}_{D,i-1}} = \frac{c_{p,D} \cdot (T_{i-1} - T_i)}{\Delta h_{V,Ti}} = \frac{c_{p,D} \cdot \Delta T_{stage,i}}{\Delta h_{V,Ti}} \quad (1.12)$$

Όπου  $\dot{m}_{B,Flash,i}$  και  $\dot{m}_{D,Flash,i}$  είναι αντίστοιχα η μαζική ροή της άλμης και του αποστάγματος στο  $i$  στάδιο της αστραπιαίας εξάτμισης,  $c_{p,B}$  και  $c_{p,D}$  είναι αντίστοιχα η ειδική θερμότητα της άλμης και του αποστάγματος και  $\Delta T_{stage}$  είναι η διαφορά των θερμοκρασιών βρασμού ή ζέσεως ανάμεσα στα επιμέρους στάδια (Εικ. 1.5) που προκύπτει από την ολική διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta T_o$  όλης της μονάδας (εξ. 1.13).

$$\Delta T_{stage} = \frac{\Delta T_o}{N} \quad (1.13)$$



**Εικόνα 1.5:** Διαφορά θερμοκρασιών βρασμού  $\Delta T_{stage}$

Ο ατμός που παράγεται από την αστραπιαία εξάτμιση προστίθεται στον ατμό που παράγεται από την εξάτμιση και έτσι η συνολική μαζική ροή του παραγόμενου αποστάγματος  $\dot{m}_{D,i}$  στο στάδιο  $i$  δίνεται από την εξ. 1.14.

$$\dot{m}_{D,i} = \dot{m}_{D,E,i} + \dot{m}_{D,Flash,i} + \dot{m}_{B,Flash,i} \quad (1.14)$$

Όπου  $\dot{m}_{D,E,i}$  είναι η μαζική ροή του αποστάγματος της εξάτμισης στο στάδιο  $i$ .

Ενώ όμως, ο ατμός που παράγεται στην εξάτμιση ( $\dot{m}_{D,E,i}$ ) συμπυκνώνεται στο συμπυκνωτή - εξεταμιστή του επόμενου σταδίου, ο ατμός της αστραπιαίας εξάτμισης ( $\dot{m}_{D,Flash,i} + \dot{m}_{B,Flash,i}$ ) συμπυκνώνεται στην επιφάνεια του προθερμαντήρα του ίδιου σταδίου. Έτσι, αυτός ο ατμός είναι επίσης διαθέσιμος για την προθέρμανση της τροφοδοσίας του πρώτου σταδίου. Η τροφοδοσία πρέπει να προθερμανθεί από την διαφορά θερμοκρασιών  $\Delta T_{stage}$ , ώστε να γίνει η αστραπιαία εξάτμιση στην είσοδο του πρώτου σταδίου. Αυτό μπορεί να γίνει στον εξωτερικό προθερμαντήρα του δεύτερου σταδίου, με την απαιτούμενη ροή θερμότητας να δίνεται από την εξ. 1.15.

$$\dot{Q}_{PH,2} = \dot{m}_F \cdot c_p \cdot \Delta T_{stage} \quad (1.15)$$

Οπότε αν αθροιστούν όλες οι ροές θερμότητας, που είναι απαραίτητες για την διαδικασία, προκύπτει ότι (εξ. 1.16):

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_{H,1} + \dot{Q}_{PH,1} + \dot{Q}_{PH,2} \quad (1.16)$$

Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας της απόσταξης πολλαπλών αποτελεσμάτων, η μαζική ροή του παραγόμενου από την εξάτμιση στα επιμέρους στάδια αποστάγματος μπορεί να υπολογιστεί κατά προσέγγιση από την ποσότητα του συνολικού αποστάγματος και τον αριθμό των σταδίων. Καθώς λοιπόν, ο όγκος του παραγόμενου από την αστραπιαία εξάτμιση αποστάγματος είναι σχετικά μικρός, αυτό είναι επιτρεπτό και έτσι είναι δυνατή μια κάποια προσέγγιση των ειδικών απαιτήσεων σε θερμότητα μιας μονάδας MED μέσω της εξ. 1.17.

$$\frac{\dot{Q}_H}{\dot{m}_D} = \frac{\Delta h_{v,Tm}}{N} + \frac{CF}{CF-1} \cdot c_p \cdot (\Delta T_{stage} + \Delta T_{TTD} + \Delta T_{BPE}) \quad (1.17)$$

Όπου CF είναι ο συντελεστής συγκέντρωσης (concentration factor) και δίνεται από την εξ. 1.17α. Επιπλέον, από τον CF προκύπτει και ο ρυθμός ανάκτησης  $\varphi$  που δίνεται από την εξ. 1.17β και ουσιαστικά αποτελεί την απόδοση της παραγωγής του συστήματος. Για παράδειγμα, έστω ότι ο ρυθμός ανάκτησης  $\varphi$  ισούται με 0.3, αυτό σημαίνει ότι 30% του θαλασσινού νερού μπορεί να ανακτηθεί ως απόσταγμα και το υπόλοιπο 70% απορρίπτεται ως άλμη.

$$CF = \frac{\dot{m}_F}{\dot{m}_B} \quad (1.17\alpha)$$

$$\varphi = \frac{CF-1}{CF} \quad (1.17\beta)$$

Σε αυτό το σημείο πρέπει να διερευνηθεί η απαιτούμενη επιφάνεια του εναλλάκτη θερμότητας και ο υπολογισμός του κεφαλαιακού κόστους που συνδέεται αναλογικά με το κόστος των επιφανειών των εναλλακτών θερμότητας, ώστε έχοντας ως δεδομένο τον αριθμό των απαιτούμενων τετραγωνικών μέτρων το κόστος των επιφανειών να προβάλλεται και να προβλέπεται από το κεφαλαιακό κόστος. Η συνολική επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας μιας μονάδας MED χωρίζεται σε τρία μέρη, στους προθερμαντήρες, στους εξατμιστές και στον τελικό συμπυκνωτή (εξ. 1.18).

$$A_{ME} = A_{PH} + A_E + A_C \quad (1.18)$$

Όπου  $A_{ME}$  είναι η συνολική επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας σε  $m^2$ ,  $A_{PH}$  είναι η επιφάνεια των προθερμαντήρων,  $A_E$  είναι η επιφάνεια των εξατμιστών και  $A_C$  είναι η επιφάνεια του τελικού συμπυκνωτή. Η διαδικασία του υπολογισμού μπορεί να ξεκινήσει με την ακόλουθη γενική εξίσωση μεταφοράς θερμότητας (εξ. 1.19).

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T_{HT} \quad (1.19)$$

Όπου  $k$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας σε  $W/m^2K$  και  $\Delta T_{HT}$  είναι η κινητήρια διαφορά θερμοκρασίας που προκαλεί την μεταφορά θερμότητας. Ο ατμός που προέρχεται από το προηγούμενο στάδιο συμπυκνώνεται στον εξατμιστή του επόμενου σταδίου και παράγει την ίδια ποσότητα ατμού, με την ροή θερμότητας που μεταφέρεται στον εξατμιστή του σταδίου  $i$  να δίνεται από την εξ. 1.20.

$$\dot{Q}_{E,i} = \dot{m}_{D,i} \cdot \Delta h_{V,i} \quad (1.20)$$

Αν εξισώσουμε τις σχέσεις 1.19 και 1.20 ( $\dot{Q} = \dot{Q}_{E,i}$ ), προκύπτει η εξ. 1.21 που δίνει την επιφάνεια του εξατμιστή ενός σταδίου  $i$ .

$$A_{E,i} = \frac{\dot{m}_{D,i} \cdot \Delta h_{V,i}}{k_{E,i} \cdot \Delta T_{HT,i}} \quad (1.21)$$

Έχοντας ως δεδομένο ότι οι επιφάνειες των εξατμιστών των επιμέρους σταδίων έχουν ίδιο μέγεθος, η συνολική επιφάνεια προκύπτει από την εξ. 1.22.



$$A_E = N \cdot A_{E,i} = N \cdot \frac{\dot{m}_{D,i} \cdot \Delta h_{V,i}}{k_{E,i} \cdot \Delta T_{HT,i}} \quad (1.22)$$

Ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα - παραδοχές η εξ. 1.22 μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω:

1. Εισάγεται μια μέση τιμή του αριθμού των σταδίων για την ενθαλπία (στο  $i$  στάδιο) και τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του εξατμιστή:

$$\Delta h_{V,i} = \Delta h_V, k_{E,i} = k_E$$

2. Το προϊόν του αριθμού των σταδίων και της ποσότητας του ατμού ανά στάδιο ισούται με την συνολική μάζα του αποστάγματος:

$$N \cdot \dot{m}_{D,i} = \dot{m}_D$$

3. Η κινητήρια διαφορά θερμοκρασίας για την μεταφορά θερμότητας πηγάζει από την διαφορά θερμοκρασίας του κάθε σταδίου  $i$  πλην την ανύψωση του σημείου βρασμού και είναι ίδια για το κάθε στάδιο:

$$\Delta T_{HT} = \Delta T_{HT,i} = \Delta T_{stage,i} - \Delta T_{BPE,i} = \frac{\Delta T_o}{N} - \Delta T_{BPE}$$

Έτσι, καταλήγουμε σε έναν απλό τύπο για την ειδική επιφάνεια του εξατμιστή (εξ. 1.23).

$$\frac{A_E}{\dot{m}_D} = \frac{\Delta h_V}{k_E \cdot \Delta T_{HT}} = \frac{N \cdot \Delta h_V}{k_E \cdot (\Delta T_o - N \cdot \Delta T_{BPE})} \quad (1.23)$$

Για τον προσδιορισμό της επιφάνειας ενός προθερμαντήρα υπολογίζεται πρώτα η ροή της θερμότητας τροφοδοσίας του προθερμαντήρα (εξ. 1.24).

$$\dot{Q}_{PH,i} = \dot{m}_F \cdot c_{p,i} \cdot \Delta T_{stage,i} \quad (1.24)$$

Με την βοήθεια της εξ. 1.19 η μεταφερόμενη θερμότητα μπορεί να διατυπωθεί αναλυτικά σε σχέση με την επιφάνεια και σε αυτήν την περίπτωση, χρησιμοποιείται η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta T_{ln,i}$  (εξ. 1.25).

$$\dot{Q}_{PH,i} = k_{PH,i} \cdot A_{PH,i} \cdot \Delta T_{HT,i} = k_{PH,i} \cdot A_{PH,i} \cdot \Delta T_{ln,i} \quad (1.25)$$

Η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας για ένα στάδιο  $i$  δίνεται από την εξ. 1.26.

$$\Delta T_{ln,i} = \frac{\Delta T_{stage,i}}{\ln \frac{\Delta T_{TTD,i} + \Delta T_{BPE,i} + \Delta T_{HT,i}}{\Delta T_{TTD,i}}} \quad (1.26)$$

Η επιφάνεια λοιπόν  $A_{PH,i}$ , ενός προθερμαντήρα μπορεί να προσδιοριστεί από τις σχέσεις 1.24 και 1.25 (εξ. 1.27).

$$A_{PH,i} = \frac{\dot{m}_F \cdot c_{p,i} \cdot \Delta T_{stage,i}}{k_{PH,i} \cdot \Delta T_{ln,i}} \quad (1.27)$$

Αν αυτή η εξίσωση πολλαπλασιαστεί με τον αριθμό των σταδίων, τότε η συνολική επιφάνεια προκύπτει από την εξ. 1.28.

$$A_{PH} = N \cdot A_{PH,i} = \frac{N \cdot \dot{m}_F \cdot c_{p,i} \cdot \Delta T_{stage,i}}{k_{PH,i} \cdot \Delta T_{ln,i}} \quad (1.28)$$

Η εξ. 1.28 μπορεί τώρα να απλοποιηθεί κατά παρόμοιο τρόπο με την αντίστοιχη της επιφάνειας του εξαμιστή ως εξής (εξ. 1.29):

$$A_{PH} = \dot{m}_D \cdot \frac{CF}{CF-1} \cdot N \cdot \frac{c_p}{k_{PH}} \cdot \frac{\Delta T_{stage,i}}{\Delta T_{ln,i}} \quad (1.29)$$

Με την βοήθεια της εξ. 1.26, προκύπτει η ειδική επιφάνεια του προθερμαντήρα (εξ. 1.30).

$$\frac{A_{PH}}{\dot{m}_D} = \frac{CF}{CF-1} \cdot N \cdot \frac{c_p}{k_{PH}} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\Delta T_{BPE} + \Delta T_{HT}}{\Delta T_{TTD}} \right) \quad (1.30)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο εξωτερικός προθερμαντήρας, που τροφοδοτείται με ατμό θέρμανσης από τον λέβητα, εμπεριέχεται επίσης σε αυτήν την εξίσωση μέσω της ανάλυσης της συνολικής διαφοράς θερμοκρασίας, αλλά όχι και ο τελικός συμπυκνωτής. Κατά τον σχεδιασμό του τελικού συμπυκνωτή, πρέπει να ληφθεί υπόψη και η μεταβαλλόμενη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού καθ' όλη την διάρκεια του έτους. Συνήθως, λαμβάνεται υπόψη η αλλαγή της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού μέσω μιας αλλαγής της μαζικής ροής που ρέει εντός του τελικού συμπυκνωτή ως ψυκτικό μέσο. Για την ροή θερμότητας  $Q_c$  εντός του τελικού συμπυκνωτή ισχύει η εξ. 1.31, οπότε λύνοντας ως προς  $A_c$  προκύπτει η επιφάνεια του συμπυκνωτή (εξ. 1.31α, 1.31β).

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{sw} \cdot c_{p,sw} \cdot (T_{sw,out} - T_{sw,in}) = k_c \cdot A_c \cdot \Delta T_{ln} \quad (1.31)$$

Όπου  $c_{p,sw}$  είναι η ειδική θερμότητα του θαλασσινού νερού,  $T_{sw,out}$  είναι η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού εξόδου και  $T_{sw,in}$  είναι η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού εισόδου.

Συνεπώς:

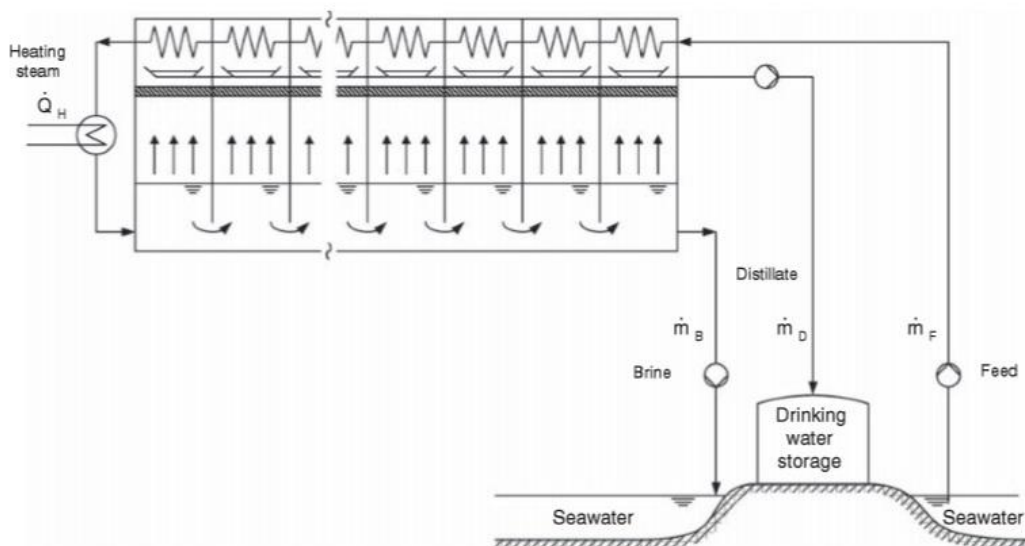
$$A_c = \frac{\dot{m}_{sw} \cdot c_{p,sw} \cdot (T_{sw,out} - T_{sw,in})}{k_c \cdot \Delta T_{ln}} \quad (1.31α)$$

Όπου  $\Delta T_{ln}$ :

$$\Delta T_{ln} = \frac{T_{sw,out} - T_{sw,in}}{\ln \left( \frac{T_v - T_{sw,in}}{T_v - T_{sw,out}} \right)} \quad (1.31β)$$

### 1.2.1.2 Πολυβάθμια εκρηκτική ή ακαριαία απόσταξη (Multi - Stage Flash Distillation, MSF)

Κατά την MSF, το νερό τροφοδοσίας ρέει μέσα από τους προθερμαντήρες και εισάγεται στο πρώτο στάδιο, όπου αρχίζει η εκρηκτική (φλας) απόσταξη, με την ίδια την διαδικασία να συνεχίζεται από στάδιο σε στάδιο. Ο ατμός που δημιουργείται συμπυκνώνεται στον κάθε προθερμαντήρα, όπου συλλέγεται το απόσταγμα, στην συνέχεια οδηγείται στο επόμενο στάδιο και αφαιρείται από το τελευταίο στάδιο ως προϊόν. Το συγκεντρωμένο διάλυμα της άλμης απορρίπτεται από το τελευταίο στάδιο στην θάλασσα (Εικ. 1.6). Μια μονάδα MSF, μπορεί επίσης να ανακυκλώνει τον παραγόμενο αλμόλοιπο (Εικ. 1.8). Ωστόσο, για τον υπολογισμό της απαιτούμενης θερμότητας της διαδικασίας δεν παίζει σημαντικό ρόλο η ανακύκλωση ή μη του αλμόλοιπου. Όπως δείχνει η Εικ. 1.6, φαίνεται να υπάρχει μόνο ένας εξωτερικός προθερμαντήρας σε μια μονάδα MSF. Αυτός ο προθερμαντήρας συνήθως αποτελεί τον θερμαντήρα του αλμόλοιπου. Σε αντίθεση με μια μονάδα MED, στα επιμέρους και μεμονωμένα στάδια της MSF δεν υπάρχουν εξωτερικά θερμαινόμενοι εξατμιστές. Στον τελικό συμπυκνωτή τώρα, εισάγεται θαλασσινό νερό που έχει ως στόχο την απορρόφηση της θερμότητας του ατμού συμπύκνωσης από το τελευταίο στάδιο, με ένα μέρος του εισερχόμενου θαλασσινού νερού να απορρίπτεται πίσω στην θάλασσα. Το εναπομείναν θαλασσινό νερό τροφοδοσίας (remainder ή make-up feed) ρέει μέσα από τους προθερμαντήρες των σταδίων, στο πάνω τμήμα της μονάδας. Στην ουσία υπάρχει ένας μακρύς σωλήνας εντός του οποίου το νερό τροφοδοσίας θερμαίνεται διαδοχικά μέσω του ατμού συμπύκνωσης που παράγεται από την αστραπιαία και εκρηκτική απόσταξη (φλας) της άλμης στους θαλάμους. Στον θερμαντήρα της άλμης, η ροή τροφοδοσίας δέχεται θερμότητα ώστε να φτάσει στο επιθυμητό και απαιτούμενο επίπεδο θερμοκρασίας.



**Εικόνα 1.6:** Διάταξη μονάδας MSF χωρίς ανακύκλωση της άλμης

Ένα ενεργειακό ισοζύγιο για τον θερμαντήρα της άλμης δίνει το ακόλουθο αποτέλεσμα για την ροή θερμότητας  $\dot{Q}_H$ , με την οποία πρέπει να εφοδιαστεί το σύστημα (εξ. 1.32).

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_F \cdot c_p \cdot (\Delta T_{\text{stage}} + \Delta T_{\text{TTD}} + \Delta T_{\text{BPE}} + \Delta T_{\text{απωλ}}) \quad (1.32)$$

Όπου  $\Delta T_{\text{απωλ}}$  είναι οι απώλειες που προκύπτουν λόγω του πεπερασμένου μήκους του θαλάμου, το οποίο εμποδίζει την συνέχιση της εκρηκτικής απόσταξης μέχρι να επιτευχθεί το απαιτούμενο ισοζύγιο, για αυτό λέγονται και απώλειες μη ισοζυγίου.

Η θερμοκρασία μειώνεται από στάδιο σε στάδιο λόγω της εκρηκτικής απόσταξης, της ανύψωσης του σημείου βρασμού και των απωλειών μη ισοζυγίου. Η άλμη απορρίπτεται από την μονάδα έχοντας την θερμοκρασία του τελευταίου σταδίου. Η διαφορά της υψηλότερης θερμοκρασίας στην είσοδο του πρώτου σταδίου, δηλαδή της μέγιστης θερμοκρασίας της άλμης  $T_{\text{top}}$  και της θερμοκρασίας της άλμης στο τελευταίο στάδιο  $T_{\text{B,N}}$ , ορίζεται ως η ολική διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta T_o$  (εξ. 1.33).

$$\Delta T_o = T_{\text{top}} - T_{\text{B,N}} \quad (1.33)$$

Αν διαιρέσουμε την ολική διαφορά θερμοκρασίας με τον αριθμό των σταδίων, προκύπτει η  $\Delta T_{\text{stage}}$  και η εξ. 1.13. Όπως και στην MED, έτσι και στην MSF η μάζα του ατμού που παράγεται μπορεί να υπολογιστεί από την μαζική ροή του υπό βρασμό υγρού, την διαφορά θερμοκρασίας από στάδιο σε στάδιο και την θερμότητα της εξάτμισης. Έτσι, για όλη την μονάδα έχουμε (εξ. 1.34):

$$\frac{\dot{m}_D}{\dot{m}_F} = \frac{c_p \cdot \Delta T_o}{\Delta h_{v,Tm}} \quad (1.34)$$

Αν αυτή η εξ. εισαχθεί στην εξ. 1.32, προκύπτουν οι ειδικές απαιτήσεις σε θερμότητα (εξ. 1.35).

$$\frac{\dot{Q}_H}{\dot{m}_D} = \frac{\Delta h_{v,Tm}}{c_p \cdot \Delta T_o} \cdot c_p \cdot (\Delta T_{\text{stage}} + \Delta T_{\text{TTD}} + \Delta T_{\text{BPE}} + \Delta T_{\text{απωλ}}) \quad (1.35)$$

Η εξ. 1.35 μαζί με την προσθήκη της εξ. 1.13 για την  $\Delta T_{\text{stage}}$  γίνεται (εξ. 1.36):

$$\frac{\dot{Q}_{H,MSF}}{\dot{m}_D} = \frac{\Delta h_{v,Tm}}{N} \cdot \left( 1 + N \cdot \frac{\Delta T_{\text{TTD}} + \Delta T_{\text{BPE}} + \Delta T_{\text{απωλ}}}{\Delta T_o} \right) \quad (1.36)$$

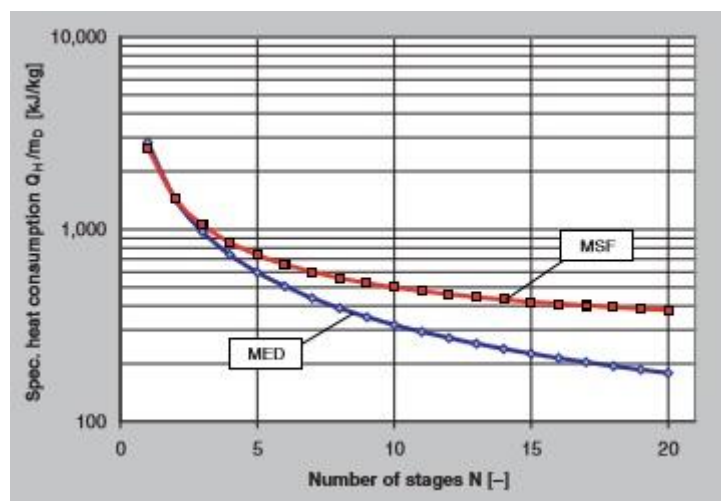
Σε αυτό το σημείο για λόγους σύγκρισης αναφέρεται και η εξ. 1.17 περί ειδικών απαιτήσεων σε θερμότητα μιας μονάδας MED, πάλι με προσθήκη της εξ. 1.13 (εξ. 1.37).

$$\frac{\dot{Q}_{H,ME}}{\dot{m}_D} = \frac{\Delta h_{v,Tm}}{N} + \frac{CF}{CF-1} \cdot c_p \cdot \frac{\Delta T_o}{N} \left( 1 + N \cdot \frac{\Delta T_{\text{TTD}} + \Delta T_{\text{BPE}}}{\Delta T_o} \right) \quad (1.37)$$

Στην MED οι απώλειες από την μη επίτευξη ισοζυγίου δεν είναι σημαντικές και δεν υπάρχει ο όρος  $\Delta T_{\text{απωλ}}$ , διότι η εκρηκτική απόσταξη είναι ένα υποπροϊόν που παίζει δευτερεύοντα ρόλο και γιατί το μέγεθος των θαλάμων καθορίζεται από το μέγεθος των εξατμιστών. Οι εξισώσεις 1.36 και 1.37 για τις μεθόδους MED και MSF φαίνεται να είναι ίδιες ή τουλάχιστον παρόμοιες, ωστόσο το παράδειγμα που ακολουθεί έχει ως στόχο την αναγνώριση της διαφοράς των δύο μεθόδων στην προκειμένη περίπτωση. Η Εικ. 1.7 δείχνει ένα διάγραμμα σύγκρισης της ειδικής

κατανάλωσης θερμότητας  $\frac{\dot{Q}_H}{\dot{m}_D}$  μιας μονάδας MSF με μια μονάδα MED, συναρτήσει του αριθμού των σταδίων για τα ακόλουθα δεδομένα:

- Ολική διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta T_o = 35 \text{ K}$
- Τελική διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta T_{TTD} = 2 \text{ K}$
- Ανύψωση σημείου βρασμού  $\Delta T_{BPE} = 0.8 \text{ K}$
- Απώλειες μη επίτευξης ισοζυγίου  $\Delta T_{\text{απωλ}} = 0.5 \text{ K}$
- Συντελεστής συγκέντρωσης  $CF = 1.4$
- Ειδική θερμότητα ή θερμοχωρητικότητα  $c_p = 4 \text{ kJ/(kgK)}$
- Μέση τιμή ενθαλπίας  $\Delta h_{v,Tm} = 2376 \text{ kJ/kg}$



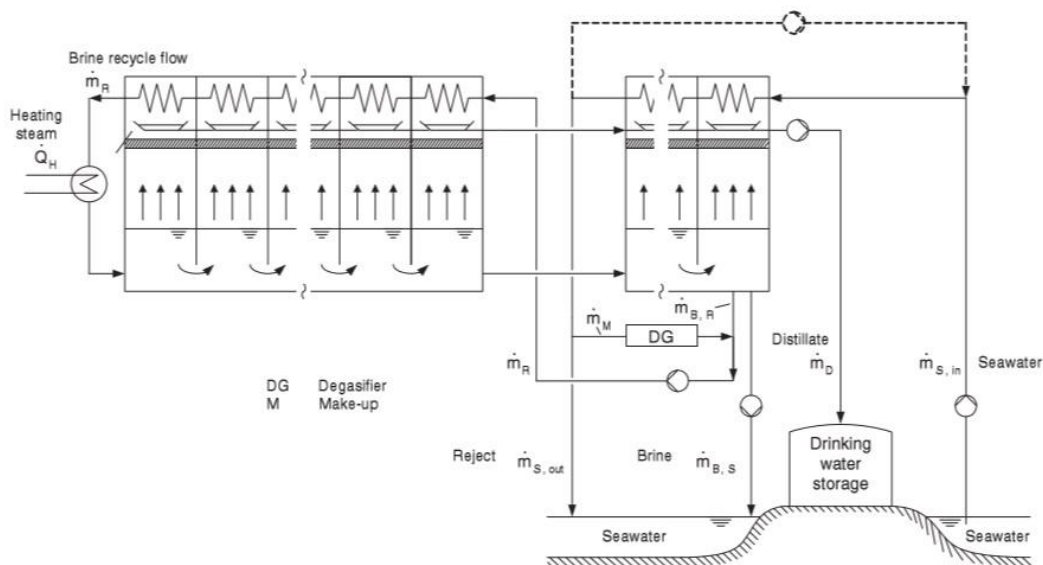
**Εικόνα 1.7:** Σύγκριση της ειδικής κατανάλωσης θερμότητας μιας μονάδας MSF με μια μονάδα MED συναρτήσει του αριθμού των σταδίων

Από το διάγραμμα μπορεί να διαπιστώσει κάποιος, ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των σταδίων, τόσο η μονάδα MED γίνεται ολοένα και πιο αποτελεσματική όσον αφορά την ειδική κατανάλωση θερμότητας, σε σχέση με την μονάδα MSF. Ωστόσο, αυτό δεν σημαίνει σε καμία περίπτωση ότι πάντοτε η καλύτερη λύση είναι η κατασκευή μιας μονάδας MED με πολλά στάδια, γιατί για την εύρεση της καλύτερης λύσης πρέπει να πραγματοποιηθεί ένας υπολογισμός της οικονομικής απόδοσης (ενεργειακό και κεφαλαιακό κόστος). Για παράδειγμα, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ένα στάδιο - αποτέλεσμα μιας μονάδας MED είναι πολύ πιο ακριβό από ένα αντίστοιχο στάδιο μιας μονάδας MSF λόγω της ύπαρξης των εξατμιστών στο κάθε στάδιο.

Η Εικ. 1.8 δείχνει την διάταξη μιας μονάδας MSF με ανακύκλωση και επανακυκλοφορία της άλμης. Ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι ότι μπορεί να μειωθεί το κόστος της προεπεξεργασίας. Η προεπεξεργασία τυπικά περιλαμβάνει την εξαέρωση και γενικότερα τις συνθήκες, όπου επικρατούν χημικά μέσα αντικαθαλάτωσης και αντιαφρισμού. Επίσης, στην διάταξη MSF με ανακύκλωση της άλμης μόνο το εναπομείναν θαλασσινό νερό υφίσταται επεξεργασία, σε αντίθεση με το μοντέλο διάταξης της MSF χωρίς ανακύκλωση της άλμης, κατά το οποίο όλη η ροή τροφοδοσίας υφίσταται προεπεξεργασία. Στην προκειμένη περίπτωση, το μοντέλο ανακύκλωσης της άλμης,

παρουσιάζει κάποια παραπάνω σημαντικά πλεονεκτήματα όπως η επίτευξη μειωμένου κόστους και η ευελιξία ως προς την λειτουργία της μονάδας, μέσω του πρόσθετου βαθμού ελευθερίας που προσφέρει η ανακύκλωση. Φυσικά, το μοντέλο ανακύκλωσης εκτός από πλεονεκτήματα έχει και μειονεκτήματα όπως τα παρακάτω:

- Υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις λόγω της μεγαλύτερης αντλίας
- Μεγάλος αριθμός αντλιών και σωληνώσεων, που είναι επιρρεπείς σε αστοχίες και σφάλματα με απαιτήσεις συντήρησης και επιδιόρθωσης
- Πολυπλοκότητα ως προς την διαρρύθμιση, με όλες τις συνεπαγόμενες δυσκολίες



**Εικόνα 1.8:** Διάταξη μονάδας MSF με ανακύκλωση της άλμης (όπου DG είναι ο εξαερωτής)

Όπου  $\dot{m}_{s,in}$  είναι η μαζική ροή του θαλασσινού νερού εισόδου,  $\dot{m}_{s,out}$  είναι η μαζική ροή του θαλασσινού νερού που απορρίπτεται αμέσως,  $\dot{m}_M$  είναι η μαζική ροή του τμήματος του θαλασσινού που προωθείται για αφαλάτωση στο σύστημα ως τροφοδοσία (make-up feed),  $\dot{m}_{B,S} (= \dot{m}_R - \dot{m}_{B,R})$  είναι η μαζική ροή της ανακυκλωμένης άλμης που απορρίπτεται μετά το πέρας της διαδικασίας,  $\dot{m}_{B,R} (= \dot{m}_R - \dot{m}_{B,S})$  είναι η μαζική ροή της ανακυκλωμένης άλμης μετά το πέρας της διαδικασίας που τίθεται σε επανακυκλοφορία και  $\dot{m}_R (= \dot{m}_M + \dot{m}_{B,R})$  είναι η συνολική μαζική ροή επανακυκλοφορίας που αποτελείται από την μαζική ροή του εναπομείναντος θαλασσινού νερού τροφοδοσίας και της μαζικής ροής της προς επανακυκλοφορία ανακυκλωμένης άλμης.

Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της διάταξης χωρίς ανακύκλωση είναι τα εξής:

- Υψηλό κόστος προεπεξεργασίας
- Μειωμένη δυνατότητα ευελιξίας ως προς την λειτουργία
- Μειωμένη θερμική απόδοση από την απόρριψη άλμης υψηλής θερμοκρασίας (40 °C)

- Μικρότερος αριθμός αντλιών και σωληνώσεων, που συνεπάγεται μικρότερο κόστος συντήρησης και επιδιόρθωσης
- Λειτουργική απλότητα και αξιοπιστία
- Υψηλότερο επίπεδο διαθεσιμότητας συνολικά

Παρόλα αυτά, σε αυτό το σημείο δεν υπάρχει η δυνατότητα μιας ολοκληρωμένης και οριστικής αξιολόγησης. Ωστόσο, κατά την επιλογή του βέλτιστου μοντέλου για το εκάστοτε σχέδιο και έργο, πρέπει να διερευνώνται και οι δύο τύποι διατάξεων βάσει και των συνθηκών που επικρατούν. Οι ειδικές απαιτήσεις σε θερμότητα του μοντέλου ανακύκλωσης της άλμης δεν διαφέρουν από εκείνες του μοντέλου μη ανακύκλωσης. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η μαζική ροή που ρέει μέσα από τον θερμαντήρα της άλμης αποτελεί την ροή ανακύκλωσης και βάσει του θερμοκρασιακού προφίλ του μοντέλου ανακύκλωσης το τμήμα ανάκτησης και απόρριψης της μονάδας πρέπει να χρησιμοποιηθεί ως μια συνολική και αποτελεσματική κινητήρια διαφορά θερμοκρασίας για την μονάδα. Έτσι, με την βοήθεια της εξ. 1.34, προκύπτει η εξής σχέση (εξ. 1.38) για το μοντέλο ανακύκλωσης της άλμης:

$$\frac{\dot{m}_D}{\dot{m}_R} = \frac{c_p \cdot \Delta T_o}{\Delta h_{v, T_m}} \quad (1.38)$$

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, η διάταξη ανακύκλωσης της άλμης έχει έναν πρόσθετο βαθμό ελευθερίας, λόγω της επανακυκλοφορίας και ανακύκλωσης, που συνεπάγεται την ύπαρξη δύο συντελεστών συγκέντρωσης, του  $CF_M$  και του  $CF_R$ . Ο  $CF_M$  είναι ο συντελεστής συγκέντρωσης του εναπομείναντος θαλασσινού νερού τροφοδοσίας (εξ. 1.39) και ο  $CF_R$  είναι ο συντελεστής συγκέντρωσης του ρεύματος της ανακύκλωσης (εξ. 1.40).

$$CF_M = \frac{\dot{m}_M}{\dot{m}_{B,S}} \quad (1.39)$$

$$CF_R = \frac{\dot{m}_R}{\dot{m}_{B,N}} \quad (1.40)$$

Επίσης, αξίζει να αναφερθεί και ο συντελεστής  $\beta$  (make-up feed factor) του εναπομείναντος θαλασσινού νερού τροφοδοσίας, που εκφράζει την σχέση μεταξύ της μαζικής ροής του εναπομείναντος θαλασσινού νερού τροφοδοσίας  $\dot{m}_M$  και της μαζικής ροής του αποστάγματος  $\dot{m}_D$  (εξ. 1.41). Τέλος, για το μοντέλο ανακύκλωσης ισχύουν κανονικά οι παραπάνω σχέσεις 1.13 και 1.36.

$$\beta = \frac{\dot{m}_M}{\dot{m}_D} = \frac{CF_M}{CF_M - 1} \quad (1.41)$$

Σε αυτό το σημείο ακολουθεί ο υπολογισμός της απαιτούμενης επιφάνειας του συμπυκνωτή μιας μονάδας MSF, επειδή κατ' αναλογία με μια μονάδα MED, πρέπει εξίσου και για μια μονάδα MSF να βρεθεί ο βέλτιστος αριθμός σταδίων. Ωστόσο, αυτό μπορεί να γίνει μόνο μέσω της ανάλυσης του κόστους και για αυτό πρέπει να είναι γνωστή η απαιτούμενη επιφάνεια. Οι σχέσεις για την μεταφορά θερμότητας σε έναν προθερμαντήρα/συμπυκνωτή μιας μονάδας MSF, είναι ίδιες με αυτές για μια μονάδα MED. Ως εκ τούτου προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις 1.42 και 1.43.

$$\dot{Q}_{MSF,i} = \dot{m}_{D,i} \cdot \Delta h_{V,i} \quad (1.42)$$

$$\dot{Q}_{MSF,i} = k_{MSF,i} \cdot A_{MSF,i} \cdot \Delta T_{ln,i} \quad (1.43)$$

Συνεπώς η επιφάνεια του συμπυκνωτή για ένα στάδιο  $i$  είναι (εξ. 1.44):

$$A_{MSF,i} = \frac{\dot{m}_{D,i} \cdot \Delta h_{V,i}}{k_{MSF,i} \cdot \Delta T_{ln,i}} \quad (1.44)$$

Η επιφάνεια του συμπυκνωτή για όλη την μονάδα (εκτός του θερμαντήρα της άλμης), προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της εξ. 1.44 με τον αριθμό των σταδίων (εξ. 1.45).

$$A_{MSF} = N \cdot A_{MSF,i} = \frac{N \cdot \dot{m}_{D,i} \cdot \Delta h_{V,i}}{k_{MSF,i} \cdot \Delta T_{ln,i}} \quad (1.45)$$

Η εξ. 1.45 μπορεί να τροποποιηθεί περαιτέρω με βάση τα παρακάτω βήματα:

1. Εισάγεται μια μέση τιμή για την ενθαλπία και για τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας:

$$\Delta h_{V,i} = \Delta h_V, k_{MSF,i} = k_{MSF}$$

2. Το προϊόν του αριθμού των σταδίων και της ποσότητας του αποστάγματος ανά στάδιο ισούται με την συνολική μαζική ροή του αποστάγματος:

$$N \cdot \dot{m}_{D,i} = \dot{m}_D$$

3. Η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας που θα χρησιμοποιηθεί για την μεταφορά θερμότητας είναι ίδια για το κάθε  $i$  στάδιο:

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_o}{N \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta T_o}{N \cdot \Delta T_{TTD}}\right)}$$

Βάσει των παραπάνω παραδοχών, η συνολική ειδική επιφάνεια του συμπυκνωτή μιας μονάδας MSF θα είναι (εξ. 1.46):

$$\frac{A_{MSF}}{\dot{m}_D} = \frac{\Delta h_V}{k_{MSF}} \cdot N \cdot \frac{\ln\left(1 + \frac{\Delta T_o}{N \cdot \Delta T_{TTD}}\right)}{\Delta T_o} \quad (1.46)$$

Η απαιτούμενη επιφάνεια τώρα μιας μονάδας MSF, μπορεί να συσχετιστεί με τις ενεργειακές απαιτήσεις (εξ. 1.47):

$$\frac{\dot{Q}_{H,MSF}}{\dot{m}_D} = \Delta h_{V,Tm} \cdot \left( \frac{1}{N} + \frac{\Delta T_{TTD} + \Delta T_{BPE} + \Delta T_{απωλ}}{\Delta T_o} \right) \quad (1.47)$$

Ο δείκτης απόδοσης (Gained Output Ratio, GOR) ορίζεται ως μέτρο της αποτελεσματικότητας μιας θερμικής μονάδας αφαλάτωσης και ισούται με τον λόγο



της μαζικής ροής του παραγόμενου αποστάγματος  $\dot{m}_D$  προς την μαζική ροή του ατμού θέρμανσης  $\dot{m}_{HS}$  που παρέχεται από έναν λέβητα ή κάποιον στρόβιλο (εξ. 1.48). Με άλλα λόγια, ο GOR είναι ένας δείκτης της ενεργειακής απόδοσης της μονάδας που εκφράζει τον λόγο του παραγόμενου πόσιμου νερού προς την απαιτούμενη ενέργεια, δηλαδή την προς κατανάλωση ενέργεια.

$$GOR = \frac{\dot{m}_D}{\dot{m}_{HS}} \quad (1.48)$$

Αν εισαχθεί και μια μέση τιμή για την ενθαλπία, τότε η θερμότητα που εισάγεται σε μια μονάδα MSF εκφράζεται ως εξής (εξ. 1.49):

$$\dot{Q}_{H,MSF} = \dot{m}_{HS} \cdot \Delta h_{v,Tm} \quad (1.49)$$

Αν η παραπάνω εξ. εισαχθεί στην εξ. 1.47, προκύπτει η ακόλουθη εξ. 1.50 για τον υπολογισμό του GOR.

$$GOR = \left( \frac{1}{N} + \frac{\Delta T_{TTD} + \Delta T_{BPE} + \Delta T_{απωλ}}{\Delta T_o} \right)^{-1} \quad (1.50)$$

Η Εικ. 1.9 δείχνει την μονάδα αφαλάτωσης Umm Al Nar East στο Abu Dhabi των Ηνωμένων Αραβικών Εμιράτων, που χρησιμοποιεί τρεις μονάδες εξατμιστών MSF (φαίνονται στην εικόνα) με παραγωγική ικανότητα 27,240 m<sup>3</sup>/ημ. Η κάθε μονάδα αποτελείται από 16 στάδια και ο δείκτης απόδοσης GOR που επιτυγχάνει, ισούται με 6. Συγκρίνοντας όμως, την συγκεκριμένη μονάδα με μια σύγχρονη μονάδα MSF που αποτελείται από 20 στάδια και επιτυγχάνει δείκτη απόδοσης 8, γίνεται αντιληπτό ότι η συγκεκριμένη μονάδα δεν είναι τόσο αποδοτική ενεργειακά. Ωστόσο, η μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα της μονάδας και η απόσβεση του επενδυτικού κόστους εξασφαλίζονται από την στιβαρότητα της εγκατάστασης, την μεγάλη διάρκεια ζωής (20 - 30 έτη) και την χρήση της απόβλητης θερμότητας της μονάδας ηλεκτροπαραγωγής. Σήμερα, οι περισσότερες και οι μεγαλύτερες θερμικές μονάδες αφαλάτωσης, χρησιμοποιούν την μέθοδο MSF και συνήθως συνδέονται ή τροφοδοτούνται ενεργειακά τουλάχιστον, από σταθμούς παραγωγής ενέργειας.



**Εικόνα 1.9:** Μονάδα αφαλάτωσης και ηλεκτροπαραγωγής Umm Al Nar East του Abu Dhabi (Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα)

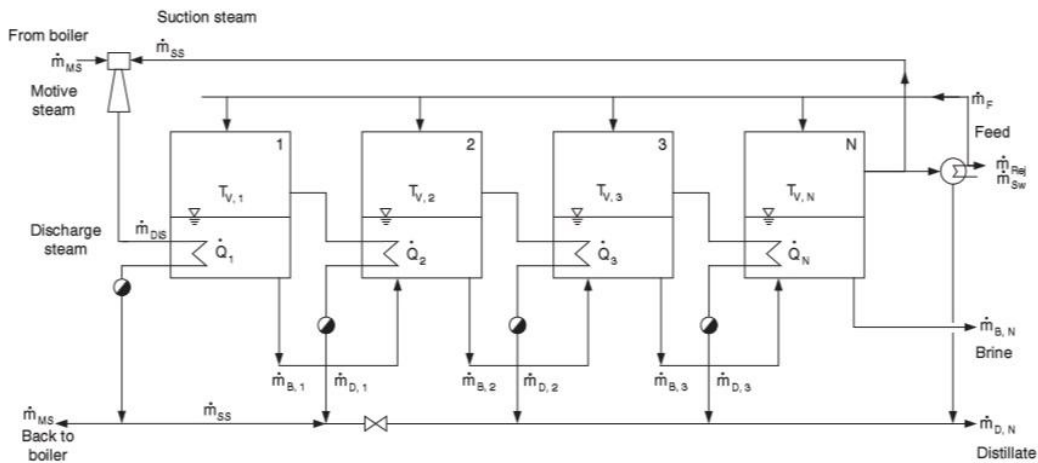
### 1.2.1.3 Θερμική (Thermal Vapor Compression, TVC) και μηχανική συμπίεση ατμών (Mechanical Vapor Compression, MVC)

Ο σκοπός του φαινομένου της συμπίεσης των ατμών, είναι η χρήση και αξιοποίηση της λανθάνουσας θερμότητας που απορρίπτεται, κατά την διάρκεια της συμπύκνωσης για την δημιουργία επιπλέον ατμού. Η αξιοποίηση της λανθάνουσας θερμότητας όμως καθίσταται δυνατή λόγω της αύξησης της πίεσης και της θερμοκρασίας, που προκαλείται από την ίδια την συμπίεση. Το φαινόμενο της συμπίεσης γίνεται μέσω δύο μεθόδων που παρουσιάζουν ελάχιστες διαφορές. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί ένα σύστημα εκτοξευτήρων, που κινητοποιείται με ατμό υπό υψηλή μανομετρική πίεση από μια εξωτερική πηγή, έχοντας ως στόχο την ανακύκλωση και επανακυκλοφορία του ατμού από την διαδικασία αφαλάτωσης. Αυτή η μέθοδος λέγεται Θερμική Συμπίεση Ατμών (Thermal Vapor Compression, TVC). Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί μια μηχανική συσκευή, όπως π.χ. έναν μηχανικό συμπιεστή ή έναν στρόβιλο συμπίεσης, που τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η μέθοδος λέγεται Μηχανική Συμπίεση Ατμών (Mechanical Vapor Compression, MVC).

Ο πεπιεσμένος ατμός χρησιμοποιείται για την παροχή της απαιτούμενης θερμότητας, που χρειάζεται για την εξάτμιση του υπόλοιπου θαλασσινού νερού. Έχοντας ως δεδομένο ότι η αύξηση της πίεσης του ατμού προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας συγκέντρωσης, ο ατμός χρησιμοποιείται ως μέσο θέρμανσης του συμπυκνωμένου υγρού ή διαλύματος από το οποίο προέρχεται. Σε περίπτωση που δεν υπήρχε συμπίεση, ο ατμός θα ήταν στην ίδια θερμοκρασία με το υγρό που δέχεται βρασμό και δεν θα μπορούσε να γίνει μεταφορά θερμότητας. Ο ατμός λοιπόν, μετά την δημιουργία του, μεταφέρεται σε έναν συμπυκνωτή εναλλαγής θερμότητας που επαναφέρει τον ατμό στην αρχική του υδατική κατάσταση, το παραγόμενο καθαρό νερό συλλέγεται και αποθηκεύεται, ενώ η θερμότητα που αφαιρείται κατά την συμπύκνωση μεταφέρεται στην τροφοδοσία.

Απόσταση πολλαπλών αποτελεσμάτων με θερμική συμπίεση ατμών (MED - TVC):

Η TVC μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις, όπου υπάρχει διαθεσιμότητα ατμού υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης για να βελτιώσει την απόδοση μιας μονάδας αφαλάτωσης. Η Εικ. 1.10 δείχνει την διάταξη μιας μονάδας MED - TVC. Σε αυτόν τον τύπο διάταξης, ο συμπιεστής παίρνει ένα τμήμα του ατμού από το τελευταίο στάδιο (ατμός αναρρόφησης), το συμπιέζει με την βοήθεια του κινητήριου ατμού και δημιουργείται ένα μείγμα ατμού αναρρόφησης και κινητήριου ατμού. Στην συνέχεια, το μείγμα αυτό της εξόδου του συμπιεστή (ατμός απόρριψης) προωθείται στο πρώτο στάδιο ως ατμός θέρμανσης. Υπό κανονικές συνθήκες, ο κινητήριος ατμός παράγεται σε λέβητα, με την μαζική ροή του να τίθεται υπό επανακυκλοφορία και με τον ατμό αναρρόφησης να συμπυκνώνεται μετά το πρώτο στάδιο και να συλλέγεται ως απόσταγμα.



**Εικόνα 1.10:** Διάταξη μονάδας MED - TVC με ακαθάριστο υπόλοιπο

Όπου  $\dot{m}_{MS}$  είναι η μαζική ροή του κινητήριου ατμού από τον λέβητα,  $\dot{m}_{SS}$  είναι η μαζική ροή του ατμού αναρρόφησης από το τελευταίο N στάδιο και  $\dot{m}_{DIS} (= \dot{m}_{MS} + \dot{m}_{SS})$  είναι η μαζική ροή της εξόδου του θερμικού συμπιεστή που χρησιμοποιείται για την θέρμανση του πρώτου σταδίου.

Γενικά, λοιπόν ισχύει ότι (εξ. 1.51):

$$\dot{m}_D = N \cdot (\dot{m}_{MS} + \dot{m}_{SS}) \quad (1.51)$$

Ο λόγος της μαζικής ροής του κινητήριου ατμού προς την μαζική ροή του ατμού αναρρόφησης καλείται συντελεστής ενσωμάτωσης  $w$  (entrainment factor) (εξ. 1.52). Ο συντελεστής  $w$  είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα του ίδιου του συμπιεστή και εξαρτάται από τα διάφορα επίπεδα πίεσης και την εσωτερική απόδοση της συσκευής.

$$w = \frac{\dot{m}_{MS}}{\dot{m}_{SS}} \quad (1.52)$$

Με την προϋπόθεση ότι ο συντελεστής  $w$  είναι γνωστός, η εξ. 1.51 γίνεται (εξ. 1.53):

$$\dot{m}_D = N \cdot \dot{m}_{MS} \cdot (1 + w) \quad (1.53)$$

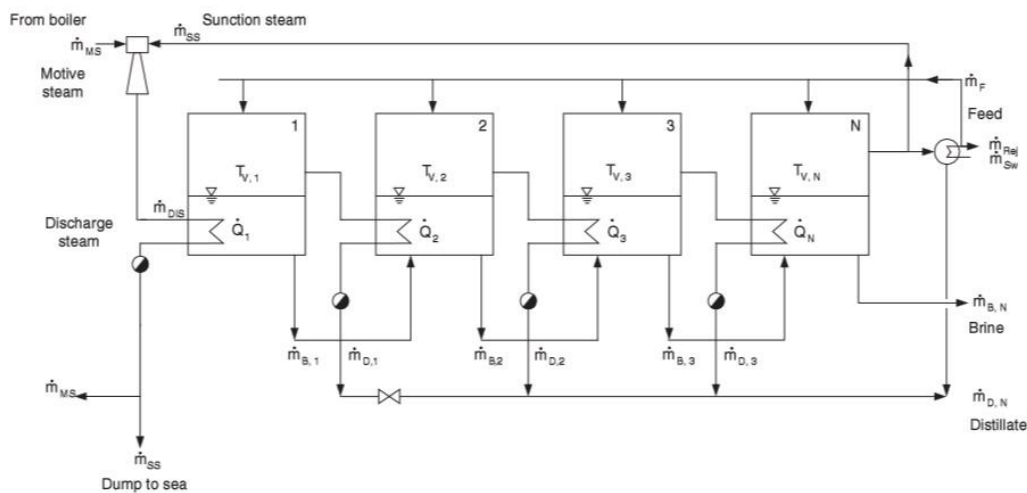
Η ειδική μάζα του κινητήριου ατμού δίνεται από την εξ. 1.54:

$$\frac{\dot{m}_{MS}}{\dot{m}_D} = \frac{1}{N \cdot (1 + w)} \quad (1.54)$$

Αν ο συντελεστής  $w$  και ο αριθμός των σταδίων της μονάδας είναι γνωστοί, τότε η ποσότητα του κινητήριου ατμού που είναι απαραίτητη για την συμπίεση μπορεί να υπολογιστεί από αυτήν την εξίσωση. Η ποσότητα της μάζας του κινητήριου ατμού που παρέχεται από τον ατμολέβητα, μπορεί να εξισωθεί με τις απαιτήσεις σε θερμική ενέργεια της μονάδας MED - TVC.

Η TVC είναι μια ανοικτή διαδικασία κατά την οποία ο κινητήριος ατμός που προέρχεται από τον λέβητα, αναμειγνύεται με τον ατμό αναρρόφησης με το μείγμα

που προκύπτει να τροφοδοτείται στον εξατμιστή του πρώτου σταδίου και αργότερα, μετά την συμπύκνωση, να εμφανίζεται ως υγρό απόσταγμα. Ένα τμήμα αυτού του αποστάγματος επιστρέφει στον λέβητα ως νερό τροφοδοσίας, ενώ το υπόλοιπο προστίθεται στο διάλυμα του αποστάγματος των επιμέρους σταδίων, με άλλα λόγια γίνεται προϊόν και μέρος του παραγόμενου νερού. Σε περίπτωση όμως, που το παραγόμενο νερό προορίζεται για πόσιμο, υπάρχει ο κίνδυνος μόλυνσης του τελευταίου από τα χημικά που προστίθενται στο νερό τροφοδοσίας του λέβητα. Ως εκ τούτου, το παραγόμενο νερό πλέον, θα είναι ακατάλληλο για ανθρώπινη χρήση και θα πρέπει το συμπύκνωμα του πρώτου σταδίου που δεν επιστρέφει στον λέβητα είτε να απορρίπτεται ή να αξιοποιείται διαφορετικά και να μην ενώνεται με την ροή του διαλύματος του αποστάγματος. Η Εικ. 1.11 δείχνει μια διάταξη MED - TVC, κατά την οποία το συμπύκνωμα (όχι της άλμης) του ατμού αναρρόφησης (από τον ατμό απόρριψης του πρώτου σταδίου), είναι επιζήμιο για την ανθρώπινη υγεία και απορρίπτεται, δυστυχώς στην θάλασσα μαζί με τα χημικά μέσα.



**Εικόνα 1.11:** Διάταξη MED - TVC με καθαρό υπόλοιπο

Για αυτήν την περίπτωση η μαζική ροή του αποστάγματος δίνεται από την εξ. 1.55.

$$\dot{m}_D = \dot{m}_{MS} \cdot N \cdot \left( (1 + w) - \frac{w}{N} \right) \quad (1.55)$$

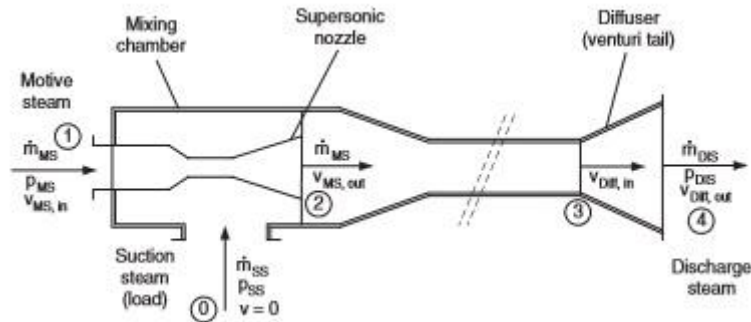
Η ειδική μάζα του κινητήριου ατμού δίνεται από την εξ. 1.56.

$$\frac{\dot{m}_{MS}}{\dot{m}_D} = \frac{1}{N \cdot \left( (1 + w) - \frac{w}{N} \right)} \quad (1.56)$$

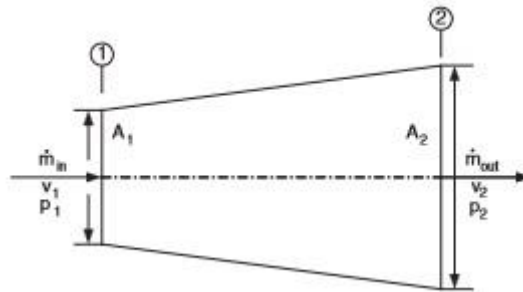
Σε σύγκριση με την διάταξη της μονάδας του ακαθάριστου υπολοίπου ο όρος  $\left( -\frac{w}{N} \right)$  που εμφανίζεται σε αυτήν την περίπτωση, αυξάνει την ποσότητα του κινητήριου ατμού με την επιρροή του ωστόσο, να είναι αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των σταδίων και να μειώνεται όσο αυτά αυξάνονται.

Σε αυτό το σημείο, ακολουθεί η ανάλυση του θερμικού συμπιεστή της μεθόδου TVC. Η Εικ. 1.12 δείχνει την σχηματική αναπαράσταση ενός θερμικού συμπιεστή, ο οποίος

αποτελείται από τρία κύρια τμήματα, το ακροφύσιο, τον θάλαμο ανάμειξης και τον διαχυτήρα (Εικ. 1.13).



**Εικόνα 1.12:** Σχηματική αναπαράσταση θερμικού συμπιεστή



**Εικόνα 1.13:** Σχηματική αναπαράσταση του διαχυτήρα

Μπορούμε να κατανοήσουμε την βασική αρχή του συμπιεστή με την βοήθεια της εξ. του Bernoulli, η οποία αναφέρει ότι για ασυμπίεστα ρευστά το άθροισμα της πίεσης  $p$ , της κινητικής ενέργειας  $\frac{\rho}{2} \cdot v^2$  και της δυναμικής ενέργειας  $\rho \cdot g \cdot z$  σε μια ρευματογραμμή παραμένει σταθερό (εξ. 1.57). Ωστόσο, για να γίνει αυτό πρέπει να υπάρχει η παραδοχή ότι ο ατμός είναι ασυμπίεστο ρευστό, ενώ δεν είναι.

$$p + \frac{\rho}{2} \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot z = \text{σταθ.} \quad (1.57)$$

Η Εικ. 1.13 δείχνει τον διαχυτήρα σε μεγέθυνση. Υπό την προϋπόθεση λοιπόν, ότι η δυναμική ενέργεια μεταξύ των σημείων 1 και 2 παραμένει σταθερή, η εξ. 1.57 γίνεται (εξ. 1.58):

$$p_1 + \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} \cdot v_2^2 \quad (1.58)$$

Με την βοήθεια της εξίσωσης της συνέχειας για την μαζική ροή που εισέρχεται ( $\dot{m}_{in}$ ) και εξέρχεται ( $\dot{m}_{out}$ ) του διαχυτήρα (εξ. 1.59), η πίεση  $p_2$  στην έξοδο του διαχυτήρα προκύπτει ως εξής (εξ. 1.60):

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} \Rightarrow \rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 \quad (1.59)$$

Με  $\rho = \rho_1 = \rho_2$  έχουμε:

$$p_2 = p_1 + \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 \cdot \left(1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2\right) \quad (1.60)$$

Από την εξ. 1.60 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για τον διαχυτήρα:

- Αν η διατομή  $A_2$  είναι μεγαλύτερη από την  $A_1$ , τότε η πίεση  $p_2$  είναι μεγαλύτερη από την πίεση  $p_1$  και το αντίστροφο.
- Αν η ταχύτητα μειωθεί στον διαχυτήρα, τότε η πίεση αυξάνεται και το αντίστροφο.

Με την βοήθεια των παραπάνω συμπερασμάτων, οι διαδικασίες που διενεργούνται εντός του συμπιεστή περιγράφονται παρακάτω ως εξής:

- Στο ακροφύσιο ο κινητήριος ατμός, ο οποίος έχει υψηλή πίεση και σχετικά χαμηλή ταχύτητα, επιταχύνει και στην συνέχεια, στην έξοδο του ακροφυσίου αποκτά μια πολύ υψηλή ταχύτητα, ενώ ταυτόχρονα η ήδη υπάρχουσα και επικρατούσα πίεση στην γύρω περιοχή είναι πολύ χαμηλή.
- Αυτή η χαμηλή πίεση των ατμών από την μονάδα εξάτμισης, που αναρροφάται σε αυτό το τμήμα του συμπιεστή, ονομάζεται ατμός αναρρόφησης ή πιο απλά φορτίο.
- Στον θάλαμο ανάμειξης, ο κινητήριος ατμός και ο ατμός αναρρόφησης αναμειγνύονται και τέλος,
- στον διαχυτήρα, η ταχύτητα αυτού του μείγματος ατμών μειώνεται σταδιακά με την πίεση να αυξάνεται ξανά.

Τέλος, στον συμπιεστή δύο φαινόμενα έχουν ιδιαίτερη σημασία:

- Η ταχύτητα στην έξοδο του ακροφυσίου είναι υπερηχητική.
- Στον διαχυτήρα, η ταχύτητα μειώνεται από μια βίαιη αναταραχή που εκφράζεται μέσω ενός κύματος κρούσης - κλονισμού (υπερηχητικός κρότος).

Η Εικ. 1.14 δείχνει μια μονάδα MED - TVC στο Tobruk της Λιβύης, που αποτελείται από τρία τμήματα παραγωγικής ικανότητας 13,333 m<sup>3</sup>/ημ. το καθένα, με το κάθε τμήμα να περιέχει τέσσερα στάδια - αποτελέσματα. Ένας θερμικός συμπιεστής για το κάθε τμήμα (τρεις συνολικά) στο πάνω μέρος της εγκατάστασης δεσμεύει ένα τμήμα του ατμού από το τέταρτο και τελευταίο στάδιο (ατμός αναρρόφησης), το οποίο αναρροφάται από τον συμπιεστή, συμπιέζεται και αναμειγνύεται με τον κινητήριο ατμό από τον λέβητα και προωθείται στο πρώτο στάδιο ως ατμός θέρμανσης, βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση της όλης εγκατάστασης.

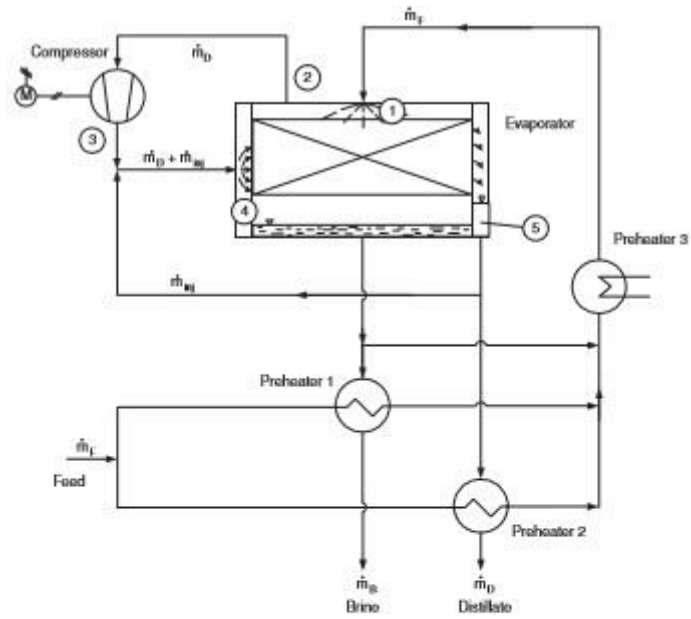


**Εικόνα 1.14:** Μονάδα MED - TVC στο Tobruk της Λιβύης

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να σημειωθεί ότι οι μέθοδοι MSF και TVC (συγκεκριμένα η MED - TVC), απλοποιούν την αρχή των πολλαπλών σταδίων - αποτελεσμάτων. Στην MSF γίνεται απλή προθέρμανση ακολουθούμενη από την εκρηκτική (ακαριαία) απόσταξη και στην MED - TVC δεν υπάρχει προθέρμανση, απλά εξάτμιση. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, το αποτέλεσμα είναι ένας απλός σχεδιασμός για την όλη εγκατάσταση. Ουσιαστικά η MED - TVC λόγω της απλότητας του σχεδιασμού και της αξιοπιστίας που προσφέρει, αντικαθιστά τον συνδυασμό των μεθόδων MSF και MED, που είναι πρακτικά αδύνατος λόγω της πολυπλοκότητας του σχεδιασμού και της αδυναμίας ενσωμάτωσης του προθερμαντήρα και του εξατμιστή σε ένα στάδιο.

Μονοβάθμια εξάτμιση με μηχανική συμπίεση ατμών (MVC):

Σε αυτήν την μέθοδο αφαλάτωσης ο θερμικός συμπιεστής που περιγράφεται παραπάνω αντικαθίσταται από έναν μηχανικό συμπιεστή. Όσον αφορά τις ενεργειακές ανάγκες, η MVC είναι μια μέθοδος που απαιτεί μόνο μηχανική ενέργεια και για αυτόν τον λόγο μπορεί να συγκριθεί με την RO. Ωστόσο, η πραγματική διαδικασία αφαλάτωσης είναι θερμικής φύσης (διαχωρισμός νερού - αλάτων μέσω εξάτμισης), ενώ στην RO ο διαχωρισμός αλάτων και νερού συμβαίνει λόγω της διαμεμβρανικής διαφοράς πίεσης και ως εκ τούτου, έχει αμιγώς μηχανικό χαρακτήρα. Η Εικ. 1.15 δείχνει την διάταξη μιας μονάδας μονοβάθμιας εξάτμισης με MVC και μια φωτογραφία μιας τέτοιας τυπικής μονάδας και η Εικ. 1.16, δείχνει έναν εξατμιστή MVC, παραγωγικής ικανότητας 300 m<sup>3</sup>/ημ., κατά την εγκατάσταση του σε μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο Geesthacht της Γερμανίας.



**Εικόνα 1.15:** Διάταξη και φωτογραφία μιας τυπικής μονάδας μονοβάθμιας εξάτμισης με MVC



**Εικόνα 1.16:** Εξατμιστής MVC κατά την εγκατάσταση του σε μονάδα ηλεκτροπαραγωγής στο Geesthacht της Γερμανίας



Το σύστημα αποτελείται και περιλαμβάνει τα παρακάτω στοιχεία:

- Την μονάδα εξάτμισης
- Τον (μηχανικό) συμπιεστή
- Τον προθερμαντήρα (1) της τροφοδοσίας από το απόσταγμα
- Τον προθερμαντήρα (2) της τροφοδοσίας από την άλμη
- Την αντλία κυκλοφορίας
- Τον εξωτερικά θερμαινόμενο προθερμαντήρα (3) για την κυκλοφορία

Σε αυτό το σημείο, ακολουθεί μια περιγραφή της διαδικασίας βάσει της διάταξης της Εικόνας.

- Φάση 1→2: Το νερό τροφοδοσίας συνήθως ψεκάζεται στον θάλαμο εξάτμισης και ένα τμήμα του τίθεται υπό συνεχή εξάτμιση.
- Φάση 2→3: Ο παραγόμενος ατμός έχει συγκεκριμένη θερμοκρασία σύμφωνα με την επικρατούσα πίεση στον εξατμιστή και αναρροφάται από τον συμπιεστή ώστε να αποκτήσει υψηλότερη πίεση.
- Φάση 3→4: Γίνεται η έγχυση μικρής ποσότητας αποστάγματος ( $\dot{m}_{inj}$ ) και σύμφωνα με την υπάρχουσα πίεση στην έξοδο του συμπιεστή, παράγεται κορεσμένος και εμποτισμένος ατμός.
- Φάση 4→5: Όπως αυτή η πίεση, έτσι και η θερμοκρασία κορεσμού είναι υψηλότερη από αυτή που υπάρχει εξωτερικά του εξατμιστή, με τον κορεσμένο ατμό να χρησιμοποιείται ως ατμός θέρμανσης και με την συμπύκνωση του τελευταίου, να λαμβάνει χώρα εντός ειδικών σωλήνων συμπύκνωσης, οι οποίοι σχηματίζουν μια δέσμη που βρίσκεται κάτω από τον εξατμιστή.

Από το ενεργειακό ισοζύγιο περίξ του θαλάμου εξάτμισης, προκύπτει ότι η συμπύκνωση 1 kg ατμού θέρμανσης εσωτερικά των σωλήνων συμπύκνωσης παράγει 1 kg ατμού εξωτερικά των σωλήνων. Ωστόσο, παρά το γεγονός αυτό, υπάρχουν ακόμα ενεργειακές απαιτήσεις για την προθέρμανση του θαλασσινού νερού σε θερμοκρασία εξάτμισης. Για αυτόν τον σκοπό χρησιμοποιούνται εναλλάκτες θερμότητας διαμέσου των οποίων ρέει το θαλασσινό νερό και απορροφά την θερμότητα του αποστάγματος και του συμπυκνώματος. Για την μεταφορά θερμότητας απαιτείται μια κινητήρια διαφορά θερμοκρασίας, δηλαδή μια τελική διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta T_{TTD}$ . Σε αυτήν την περίπτωση όμως, η προθέρμανση που προσφέρεται από τους προθερμαντήρες 1 και 2 μέσω των διαλυμάτων του αποστάγματος και του αλμόλοιπου, είναι ανεπαρκής ως προς την αύξηση της θερμοκρασίας του διαλύματος της τροφοδοσίας σε θερμοκρασία εξάτμισης. Για αυτόν τον λόγο, τοποθετείται και ένας τρίτος εξωτερικά θερμαινόμενος με ηλεκτρική ενέργεια προθερμαντήρας, που αυξάνει την θερμοκρασία του μείγματος της ροής επανακυκλοφορίας της άλμης και της ροής τροφοδοσίας. Επιπλέον, ο εξωτερικός προθερμαντήρας καλύπτει επίσης και τις απώλειες μόνωσης που αντιστοιχούν στο 1% περίπου της θερμότητας εξάτμισης. Η σταθερή και συνεχής κυκλοφορία μιας συγκεκριμένης ποσότητας νερού είναι κυρίως απαραίτητη για την διατήρηση της ασφάλειας των επιφανειών των εναλλακτών θερμότητας και ειδικά στην προκειμένη περίπτωση, των εξωτερικών τοιχωμάτων των σωλήνων. Τα εξωτερικά τμήματα των σωλήνων πρέπει να είναι πάντοτε βρεγμένα και υγρά, ώστε να παρεμποδίζεται η κρυστάλλωση των αλάτων. Η καθαλάτωση (λεβητόλιθος) σε αυτά τα σημεία αρχικά

θα εμποδίζει μόνο την μεταφορά θερμότητας, αλλά στην συνέχεια με την κλιμάκωση του φαινομένου και την ανάπτυξη και επέκταση της κρούστας των αλάτων, η δέσμη των σωλήνων θα αποκλειστεί ολοκληρωτικά.

Υποθέτοντας μια πολυτροπική αλλαγή κατάστασης στον συμπιεστή, για τις θερμοκρασίες και τις πιέσεις στην είσοδο και την έξοδο του συμπιεστή ισχύουν η εξ. 1.61 για την πολυτροπική αλλαγή κατάστασης, η εξ. 1.62 των ιδανικών αερίων και η εξ. 1.63 για την θερμοκρασία συμπύκνωσης στην έξοδο του συμπιεστή.

$$p \cdot v^n = \text{σταθ.} \quad (1.61)$$

$$p \cdot v = R \cdot T \quad (1.62)$$

$$T_c = T_v \cdot \left(\frac{p_v}{p_c}\right)^{\frac{n}{n-1}} \quad (1.63)$$

Όπου  $n$  είναι ο πολυτροπικός εκθέτης,  $T_v$  είναι η θερμοκρασία εξάτμισης στην είσοδο του συμπιεστή,  $p_v$  είναι η πίεση εξάτμισης και  $p_c$  είναι η πίεση συμπύκνωσης. Επίσης, για την θερμοκρασία συμπύκνωσης ισχύει και η σχέση 1.64.

$$T_c = T_v + \Delta T_{HT} \quad (1.64)$$

Για τον πολυτροπικό εκθέτη ισχύει η σχέση 1.65.

$$\frac{n}{n-1} = \frac{k}{k-1} \cdot \eta_{vc} \quad (1.65)$$

Όπου  $k$  είναι ο ισεντροπικός εκθέτης ( $k=1.326$  για το νερό και για θερμοκρασία  $< 100^\circ\text{C}$ ) και  $\eta_{vc}$  είναι η απόδοση του συμπιεστή.

Η μηχανική ενέργεια  $P_t$  (σε Watt) που εισάγεται στο σύστημα για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες ισχύος του συμπιεστή δίνεται από την εξ. 1.66.

$$P_t = \dot{m}_D \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \eta_{vc} \cdot R \cdot T_v \cdot \left[ \left(\frac{p_c}{p_v}\right)^{\frac{k}{k-1} \cdot \eta_{vc}} - 1 \right] \quad (1.66)$$

Όπου  $R$  είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων ( $R=8314 \text{ J/kgK}$ ). Με την βοήθεια των εξισώσεων 1.63, 1.64 και 1.65, η εξ. 1.66 γίνεται (εξ. 1.67):

$$P_t = \dot{m}_D \cdot \frac{n}{n-1} \cdot R \cdot \Delta T_{HT} \quad (1.67)$$

Ως εκ τούτου, για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας, πρέπει να είναι γνωστή η παραγωγική ικανότητα αποστάγματος ( $\dot{m}_D$ ) της μονάδας, καθώς και οι πιέσεις και θερμοκρασίες στις οποίες γίνονται η εξάτμιση και η συμπύκνωση. Σύμφωνα με την εξ. 1.64 αυτό σημαίνει ότι για την μεταφορά θερμότητας πρέπει να υπάρχει μια διαφορά θερμοκρασίας ( $\Delta T_{HT}$ ), η οποία ωστόσο αποτελεί πρόβλημα βελτιστοποίησης καθώς εμφανίζεται στην εξίσωση μεταφοράς θερμότητας (εξ. 1.68) αλλά και στην εξίσωση της απόδοσης του συμπιεστή (εξ. 1.69).

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T_{HT} \quad (1.68)$$

$$P_t = \dot{m}_D \cdot \frac{n}{n-1} \cdot R \cdot \Delta T_{HT} \cdot \frac{1}{\eta_{vc}} \quad (1.69)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις δείχνουν ότι όσο ελαττώνονται η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας και συνεπώς το κόστος του συμπιεστή, τόσο αυξάνονται η διαφορά θερμοκρασίας και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας. Για την μείωση λοιπόν, του επενδυτικού κόστους πρέπει να υπάρχει υψηλή διαφορά θερμοκρασίας και υψηλός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας. Ωστόσο, η διαφορά θερμοκρασίας δεν μπορεί να παίρνει τιμές αυθαίρετα για του παρακάτω λόγους. Πρώτον, γιατί η διαφορά θερμοκρασίας είναι ευθέως ανάλογη της κατανάλωσης ενέργειας του συμπιεστή και στην περίπτωση χρησιμοποίησης πτερωτής απλής δομής και φθηνής κατασκευής, το μέγιστο τεχνικό όριο είναι τα 10 K. Υψηλότερες διαφορές θερμοκρασίας μπορούν μόνο να επιτευχθούν με την χρήση δαπανηρών συμπιεστών τύπου κοχλία. Ωστόσο, τέτοιοι συμπιεστές είναι άχρηστοι λόγω της εξοικονόμησης που γίνεται στις επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας. Δεύτερον, γιατί η εξάτμιση του θαλασσινού νερού περιορίζεται λόγω της κρυστάλλωσης των αλάτων (π.χ. ανθρακικό ασβέστιο, θειικό ασβέστιο). Στην περίπτωση σχηματισμού φυσαλίδων κατά την εξάτμιση, θα αναπτυχθούν κρύσταλλοι αλάτων στα άκρα των φυσαλίδων στην επιφάνεια του εξατμιστή και με την πάροδο του χρόνου, η κρούστα αλάτων που θα σχηματιστεί, θα επικαλύψει όλη την επιφάνεια. Το φαινόμενο του βρασμού με φυσαλίδες συμβαίνει, όταν η πυκνότητα της ροής θερμότητας ( $\text{kW/m}^2$ ) ή η κινητήρια διαφορά θερμοκρασίας υπερβεί μια συγκεκριμένη τιμή. Για το νερό ή το θαλασσινό νερό, αυτή η τιμή είναι περίπου 7 K και ειδικά στην περίπτωση της αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού, δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να γίνει υπέρβαση αυτού του ορίου. Τρίτον, γιατί στην MVC μπορούν να επιτευχθούν από τον συμπιεστή μόνο μικρές διαφορές θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα να είναι εφικτή μόνο η μονοβάθμια εξάτμιση (σε αντίθεση με την TVC όπου οι υψηλότερες διαφορές θερμοκρασίας που επιτυγχάνει ο θερμικός συμπιεστής, επιτρέπουν την απόσταση με πολλαπλά στάδια - αποτελέσματα). Επιπλέον, το κόστος του συμπιεστή είναι σημαντικός περιορισμός της παραγωγικής ικανότητας της μονάδας, καθώς συνήθως μόνο οι μικρές μονάδες (με μέγιστη παραγωγική ικανότητα τα  $2000 \text{ m}^3/\text{ημ.}$ ) είναι εξοπλισμένες με συμπιεστές MVC.

Σύγκριση των μεθόδων MVC - TVC:

Αυτοί οι δύο τρόποι συμπίεσης ατμών έχουν διαφορετικά πεδία εφαρμογής, αν και μερικές φορές συμπίπτουν. Μία μονάδα MVC θα είναι προτιμότερη για μια μεγάλη μονάδα, χάρη στη μειωμένη κατανάλωση ενέργειας. Ο μεγαλύτερος ενιαίος εξατμιστής MVC (1968, από την Whiting Co., αργότερα Swenson Evaporator Co.) ήταν ένας κρυσταλλωτής άλατος, που είχε έναν συμπιεστή αξονικής ροής (Brown Boveri, αργότερα ABB), εξατμίζοντας περίπου 400 μετρικούς τόνους νερού ανά ώρα. Οι εξατμιστές MVC με ικανότητα εξάτμισης 10 τόνων ή περισσότερο είναι συνήθεις. Ο λόγος συμπίεσης σε μια μονάδα MVC δεν υπερβαίνει συνήθως το 1.8. Με έναν λόγο συμπίεσης 1.8 και με την προϋπόθεση ότι η εξάτμιση θα γίνει σε ατμοσφαιρική πίεση 1 atm, η πίεση συμπίεσης μετά την συμπίεση, θα είναι 1.8 atm. Μια μικρή διαφορά θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ) οδηγεί σε αργή μεταφορά θερμότητας, αυτό σημαίνει ότι θα χρειαστεί μια πολύ μεγάλη θερμαντική επιφάνεια, για να μεταφερθεί η απαιτούμενη θερμότητα. Οι συμπιεστές αξονικής ροής και τύπου Roots μπορούν να φτάσουν ελαφρώς υψηλότερους λόγους συμπίεσης. Οι εξατμιστές TVC μπορούν να φτάσουν σε υψηλότερες αναλογίες συμπίεσης, αλλά με κόστος. Ένας λόγος συμπίεσης 2 είναι πιθανός, αλλά αν ο κινητήριος ατμός δεν είναι σε μια αρκετά

υψηλή πίεση (π.χ. 16 bar ή περισσότερο) η κατανάλωση του κινητήριου ατμού θα κυμαίνεται στα 2 kg ανά 1 kg ατμών αναρρόφησης. Ο υψηλότερος λόγος συμπίεσης σημαίνει μικρότερο εναλλάκτη θερμότητας και μειωμένο επενδυτικό κόστος. Επιπλέον, ένας συμπιεστής είναι μια μηχανή υψηλού κόστους, ενώ ένας εκτοξευτήρας είναι πολύ απλούστερος και φθηνότερος. Συμπερασματικά, οι μηχανές MVC χρησιμοποιούνται σε μεγάλες, ενεργειακά αποδοτικές μονάδες, ενώ οι μηχανές TVC τείνουν να περιορίζουν τη χρήση τους σε μικρές μονάδες, όπου η κατανάλωση ενέργειας δεν αποτελεί μεγάλο ζήτημα.

Η αποτελεσματικότητα αυτής της διαδικασίας της συμπίεσης ατμών εξαρτάται από την απόδοση της συσκευής συμπίεσης και από τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας που επιτυγχάνεται στον εναλλάκτη θερμότητας που έρχεται σε επαφή με τον ατμό συμπύκνωσης και το διάλυμα - υγρό δεχόμενο βρασμό. Θεωρητικά, εάν το συμπύκνωμα που προκύπτει υποψυχθεί, αυτή η διαδικασία θα μπορούσε να επιτρέψει την πλήρη ανάκτηση της λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης που διαφορετικά θα χανόταν αν ο ατμός, παρά το συμπύκνωμα, ήταν το τελικό προϊόν. Επομένως, αυτή η μέθοδος απόσταξης είναι πολύ αποδοτική ενεργειακά. Η διαδικασία απόσταξης μπορεί να οδηγείται αποκλειστικά από το μηχανικό έργο που παρέχεται από τη συσκευή συμπίεσης.

Ένας εξατμιστήρας συμπίεσης ατμών, όπως και οι περισσότεροι εξατμιστήρες, μπορεί να παράγει αρκετά καθαρό νερό από οποιαδήποτε πηγή νερού. Σε έναν κρυσταλλοποιητή άλατος για παράδειγμα, μια τυπική ανάλυση του συμπυκνώματος που προκύπτει παρουσιάζει τυπική περιεκτικότητα σε υπολειμματικά άλατα όχι μεγαλύτερη από 50 ppm ή όσον αφορά την ηλεκτρική αγωγιμότητα, όχι μεγαλύτερη από 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πόσιμο νερό, εάν πληρούνται και οι υπόλοιπες υγειονομικές απαιτήσεις. Παρόλο που, αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να ανταγωνιστεί στην αγορά την αντίστροφη ώσμωση ή την απομετάλλωση, η συμπίεση ατμών διαφέρει κυρίως από αυτές χάρη στην ικανότητά της να παράγει καθαρό νερό από κορεσμένα ή ακόμη και κρυσταλλωμένα αλατούχα ύδατα με σύνολο διαλυμένων στερεών TDS μέχρι 650 g/lit. Οι άλλες δύο τεχνικές έχουν δυνατότητα παραγωγής καθαρού νερού με σύνολο διαλυμένων στερεών TDS, όχι περισσότερο από περίπου 35 g/lit.

Για οικονομικούς λόγους οι εξατμιστές σπάνια λειτουργούν σε πηγές νερού χαμηλής περιεκτικότητας σε TDS. Σε αυτές τις εφαρμογές χρησιμοποιείται η αντίστροφη ώσμωση. Το ήδη υφάλμυρο νερό που εισέρχεται σε έναν τυπικό εξατμιστή συμπυκνώνεται περαιτέρω. Η αύξηση του συνόλου των διαλυμένων στερεών έχει ως στόχο την αύξηση της τιμής του σημείου βρασμού ή ζέσεως σε τιμή υψηλότερη από αυτή του καθαρού νερού. Το θαλασσινό νερό με TDS περίπου 30 g/lit παρουσιάζει ανύψωση σημείου βρασμού μικρότερη από 1 K, αλλά το κορεσμένο διάλυμα χλωριούχου νατρίου με TDS 360 g/lit έχει ανύψωση σημείου βρασμού περίπου 7 K. Αυτή η ανύψωση του σημείου βρασμού αυξάνει τον λόγο πίεσης που πρέπει να επιτύχει ο συμπιεστής ατμών για την πραγματοποίηση της εξάτμισης. Από την ανύψωση του σημείου βρασμού καθορίζεται ο λόγος πίεσης στον συμπιεστή, που είναι και ο κύριος παράγοντας του κόστους λειτουργίας.

#### 1.2.1.4 Απόσταξη κενού (*Vacuum distillation*)

Μια ακόμα τεχνική αφαλάτωσης είναι και η απόσταξη κενού. Ουσιαστικά, κατά την διαδικασία αυτή, γίνεται βρασμός του αλατώδους διαλύματος με αποτέλεσμα την απαλλαγή του από ακαθαρσίες (άλατα). Κατά την διενέργεια της αφαλάτωσης, μειώνεται η πίεση πάνω από την επιφάνεια του υγρού (ατμοσφαιρική πίεση), χαμηλώνοντας παράλληλα την απαιτούμενη θερμοκρασία βρασμού του διαλύματος.

Ο βρασμός του διαλύματος αρχίζει όταν η τάση ατμών εξισωθεί με την ατμοσφαιρική πίεση και εκείνη την στιγμή, τα πτητικά υγρά με τα χαμηλότερα σημεία ζέσεως, εξατμίζονται πρώτα. Το μείγμα βρίσκεται σε κατάσταση βρασμού, όταν η τιμή της πίεσης ή τάσης ατμών υπερβαίνει την τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης. Με την αύξηση όμως της θερμοκρασίας, αυξάνεται και η πίεση ατμών. Αυτή η αύξηση της πίεσης ατμών οδηγεί σε περαιτέρω βρασμό. Επιπλέον, λόγω της μειωμένης απαιτούμενης θερμοκρασίας, γίνεται χρήση της θερμικής ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας που απορρίπτεται με την μορφή λυμάτων ή αποβλήτων από μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και από βιομηχανικές μονάδες.

Η απόσταξη κενού σε εργαστηριακή κλίμακα χρησιμοποιείται όταν τα υγρά προς απόσταξη έχουν υψηλά ατμοσφαιρικά σημεία βρασμού ή αλλάζει η χημική τους σύσταση σε θερμοκρασίες κοντά στα σημεία ζέσεώς τους. Υλικά ευαίσθητα στη θερμοκρασία, όπως η Β καροτίνη επίσης χρειάζονται απόσταξη κενού για την απομάκρυνση των διαλυτών από το μείγμα χωρίς την καταστροφή του προϊόντος. Ένας άλλος λόγος που χρησιμοποιείται η απόσταξη κενού είναι ότι, σε σύγκριση με την απόσταξη ατμού, υπάρχει ένα χαμηλότερο επίπεδο συσσώρευσης υπολειμμάτων. Αυτό είναι σημαντικό στις εμπορικές εφαρμογές, όπου η μεταφορά θερμότητας γίνεται με εναλλάκτες θερμότητας. Υπάρχουν πολλές εργαστηριακές εφαρμογές για την απόσταξη κενού, όπως και πολλά είδη εξοπλισμού και συστημάτων.

Περιστροφική εξάτμιση:

Η περιστροφική εξάτμιση είναι ένα είδος συστήματος απόσταξης κενού, που χρησιμοποιείται για την αφαίρεση του κυρίου μέρους των διαλυτών από το διάλυμα προς απόσταξη. Επίσης, χρησιμοποιείται από περιβαλλοντικούς ελεγκτικούς οργανισμούς για τον προσδιορισμό της ποσότητας διαλυτών σε χρώματα, επικαλύψεις και μελάνια. Τα συστήματα περιστροφικής εξάτμισης περιλαμβάνουν μια συσκευή γνωστή ως Rotovar (rotary evaporator, δηλαδή περιστροφικός εξάτμιστής), η οποία περιστρέφει την φιάλη απόσταξης για την ενίσχυση της διαδικασίας. Περιστρέφοντας την φιάλη, το υγρό διαδίδεται στα τοιχώματα της και έτσι αυξάνεται η επιφάνεια εξάτμισης. Συχνά, εφαρμόζεται θερμότητα στην περιστρεφόμενη φιάλη με μερική εμβύθιση της σε ένα θερμαινόμενο λουτρό νερού ή κάποιου λαδιού. Τυπικά, το κενό σε τέτοια συστήματα προκύπτει από έναν αναρροφητήρα νερού ή από μια αντλία κενού.

Απόσταξη υλικών υψηλού σημείου ζέσεως και υλικών ευαίσθητων στον αέρα:

Κάποιες ενώσεις, έχουν υψηλές θερμοκρασίες βρασμού και είναι ευαίσθητες στον αέρα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται απλές γυάλινες εργαστηριακές συσκευές απόσταξης κενού, στις οποίες το κενό μπορεί να αντικατασταθεί με ένα αδρανές αέριο μετά το πέρας της απόσταξης. Ωστόσο, αυτά τα συστήματα δεν είναι εντελώς ικανοποιητικά, αν είναι επιθυμητή η συλλογή κλασμάτων υπό μειωμένη πίεση. Για καλύτερα αποτελέσματα ή για πολύ ευαίσθητες στον αέρα ενώσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μια συσκευή απόσταξης τριγώνου Perkin ή μια κεφαλή σύντομης διαδρομής.

Συσκευή απόσταξης τριγώνου Perkin:

Η συσκευή απόσταξης τριγώνου Perkin χρησιμοποιεί μια σειρά από βαλβίδες Teflon για την απομόνωση των αποσταγμένων κλασμάτων από την φιάλη απόσταξης χωρίς την απομάκρυνση του κυρίου σώματος από την πηγή του κενού ή της θερμότητας και έτσι παραμένει σε μια κατάσταση παλινδρόμησης. Για να γίνει αυτό, το δοχείο παραλαβής πρώτα απομονώνεται από το κενό μέσω των βαλβίδων Teflon. Στην συνέχεια, το κενό πάνω από το δείγμα αντικαθίσταται από ένα αδρανές

αέριο όπως το άζωτο ή το αργό και τέλος, το δοχείο παραλαβής σφραγίζεται και αφαιρείται από το σύστημα.

Κεφαλή σύντομης διαδρομής:

Η απόσταξη κενού ενός υγρού σχετικά ευαίσθητου στον αέρα και το νερό, μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας τις πρότυπες τεχνικές γραμμής Schlenk. Κατά την συναρμολόγηση του συστήματος, όλες οι γραμμές σύνδεσης στερεώνονται με σφιγκτήρες, ώστε να μην φύγουν. Όταν ολοκληρωθεί η συναρμολόγηση και το υγρό είναι στην φιάλη, η επιθυμητή τιμή κενού επιβάλλεται στο σύστημα, μέσω της σύνδεσης κενού στην κεφαλή απόσταξης σύντομης διαδρομής. Ωστόσο, πρέπει να δίνεται προσοχή στην διαδικασία εξαέρωσης του υγρού, για την αποτροπή εκδήλωσης ενδεχόμενων τρανταγμάτων. Παράλληλα, με την επιβολή του κενού, αρχίζει και η ροή του ψυκτικού μέσου μέσα από την κεφαλή απόσταξης σύντομης διαδρομής. Με την καθιέρωση του κενού εφαρμόζεται θερμότητα στην φιάλη. Αν χρειαστεί να γίνει αλλαγή του δοχείου παραλαβής, το πρώτο τμήμα του αποστάγματος μπορεί να απορριφθεί, με καθαρισμό από κάποιο αδρανές αέριο. Μετά το τέλος της απόσταξης, η θερμότητα αφαιρείται, η σύνδεση κενού κλείνει και το αδρανές αέριο καθαρίζεται περνώντας από την κεφαλή απόσταξης και το δοχείο παραλαβής. Στο δοχείο παραλαβής μπορεί να γίνει αποθήκευση εν κενώ ή υπό το αδρανές αέριο μέσω του πλευρικού βραχίονα της φιάλης.

### 1.2.2 Μέθοδοι μεμβρανών

Οι μεμβράνες και η τεχνολογία των μεμβρανών, ιδιαίτερα οι πολυμερείς μεμβράνες, είναι σημαντικές για το μέλλον του νερού στον κόσμο. Οι μεμβράνες είναι ικανές να διαχωρίζουν ένα ευρύ φάσμα μολυσματικών ουσιών από προβληματικές πηγές νερού όπως οι ιοί, τα βακτήρια, τα βαρέα μέταλλα και τα διαλυμένα άλατα.

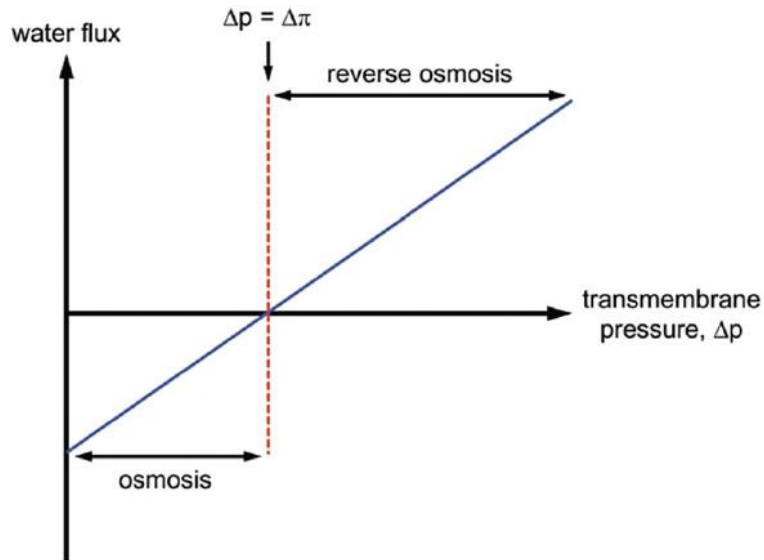
#### 1.2.2.1 Αντίστροφη ώσμωση ή αντώσμωση (Reverse Osmosis, RO)

Η τεχνική βασίζεται στην διέλευση θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού τροφοδοσίας υπό υψηλή πίεση μέσα από μεμβράνες ινών που διαχωρίζουν το νερό εισόδου σε δυο κλάσματα, αυτό της διήθησης (permeate) και αυτό της συμπύκνωσης (concentrate). Το κλάσμα διήθησης είναι το νερό που διέρχεται από την μεμβράνη (30 – 40% του νερού εισόδου) και το κλάσμα συμπύκνωσης το νερό που δεν διέρχεται (60 – 70%). Στο σκέλος της συμπύκνωσης παραμένει το 97 - 99.8% των αλάτων του διηθήματος. Το σκέλος της διήθησης ή διήθημα περιέχει νερό εξαιρετικά χαμηλής περιεκτικότητας σε άλατα κατάλληλο για ύδρευση, άρδευση και για τις περισσότερες βιομηχανικές χρήσεις. Συγκεκριμένα, κατά την RO γίνεται χρήση ημιπερατής μεμβράνης πάνω στην οποία ασκείται μια εξωτερική πίεση ( $P_{εξ}$ ) μεγαλύτερη της ωσμωτικής πίεσης ( $\Pi$ ) του νερού με αποτέλεσμα την επιλεκτική διείσδυση του νερού διαμέσου της μεμβράνης με ταυτόχρονη απόρριψη των αλάτων του.

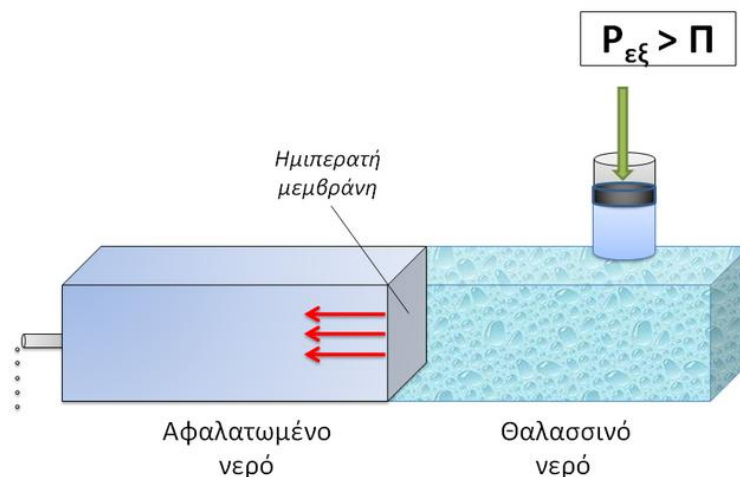
Παρακάτω αναφέρονται οι τρεις περιπτώσεις για διαλύματα (Εικ. 1.17), τα μόρια των οποίων αλληλεπιδρούν μέσω ημιπερατής μεμβράνης.

- Όταν ισχύει  $P_{εξ} > \Pi$ , τότε τα μόρια του διαλύτη (αφαλατωμένο νερό) τείνουν να εξέρχονται του διαλύματος (θαλασσινό νερό) με παράλληλη αύξηση της συγκέντρωσης και το διάλυμα λέγεται υπερτονικό (Εικ. 1.18). Πιο απλά, τα μόρια κατευθύνονται από το πυκνότερο στο αραιότερο διάλυμα (αντίστροφη ώσμωση).

- Όταν ισχύει  $P_{εξ} < \Pi$ , τότε τα μόρια του διαλύτη (αφαλατωμένο νερό) τείνουν να εισέρχονται του διαλύματος (θαλασσινό νερό), με μικρότερο ρυθμό βέβαια και με μείωση της συγκέντρωσης. Το διάλυμα αυτό λέγεται υποτονικό. Αυτήν την φορά τα μόρια έχουν κατεύθυνση από το αραιότερο στο πυκνότερο διάλυμα (ώσμωση).
- Όταν ισχύει  $P_{εξ} = \Pi$ , τότε τα μόρια του διαλύτη δεν εξέρχονται, ούτε εισέρχονται στο διάλυμα, υπάρχει μια κατάσταση ισορροπίας και η συγκέντρωση είναι σταθερή. Σε αυτήν την περίπτωση και τα δύο διαλύματα εκατέρωθεν της μεμβράνης λέγονται ισοτονικά.



**Εικόνα 1.17:** Διάγραμμα της διαμεμβρανικής πίεσης και της ροής του νερού, που δείχνει τις παραπάνω τρεις περιπτώσεις.



**Εικόνα 1.18 :** Αντίστροφη ώσμωση θαλασσινού νερού

Η ωσμωτική πίεση σε bar δίνεται από την εξ. 1.70

$$\Pi = R \cdot (T + 273) \cdot \Sigma(\dot{m}_i) \quad (1.70)$$

Όπου  $R$  η παγκόσμια σταθερά των αερίων ( $0.082 \text{ lt atm/molK}$ ),  $T$  είναι η θερμοκρασία σε  $^{\circ}\text{C}$  και  $\Sigma(\dot{m}_i)$  το άθροισμα της γραμμομοριακής συγκέντρωσης όλων των συστατικών του διαλύματος σε ppm (parts per million). Μια εκτίμηση για την ωσμωτική πίεση μπορεί να γίνει υποθέτοντας ότι η συγκέντρωση 1000 ppm του συνόλου διαλυμένων στερεών TDS, αντιστοιχεί σε 0.77 bar (11 psi) ωσμωτικής πίεσης. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι η εξίσωση ισχύει μόνο για αραιά διαλύματα αλάτων και για θερμοκρασίες κοντά στους  $25^{\circ}\text{C}$ . Σε εξαιρετικά διαφορετικές συνθήκες πρέπει να εφαρμοστούν αυστηρότεροι υπολογισμοί, οι οποίοι θα λαμβάνουν υπόψη την δραστηριότητα των ιόντων και όχι τις συγκεντρώσεις.

Ρυθμός ανάκτησης διηθήματος:

Η ανάκτηση διηθήματος είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος για τον σχεδιασμό και την λειτουργία των συστημάτων RO. Ο ρυθμός ανάκτησης διηθήματος από το νερό τροφοδοσίας δίνεται σε ποσοστό από τις εξισώσεις (1.71) και (1.72).

$$R = 100\% \cdot \left(\frac{\dot{Q}_p}{\dot{Q}_f}\right) \quad (1.71)$$

$$R = 100\% \cdot \left(\frac{\dot{Q}_p}{\dot{Q}_p + \dot{Q}_c}\right) \quad (1.72)$$

Όπου  $\dot{Q}_p$  είναι ο ρυθμός ροής σε  $\text{m}^3/\eta\mu.$  του παραγόμενου νερού (διήθημα),  $\dot{Q}_f$  είναι ο ρυθμός ροής του νερού τροφοδοσίας και  $\dot{Q}_c$  είναι ο ρυθμός ροής του συμπυκνώματος. Ο ρυθμός ανάκτησης επηρεάζει την εισχώρηση των αλάτων και την ροή παραγωγής. Όταν αυξάνεται ο ρυθμός ανάκτησης, αυξάνεται και η συγκέντρωση των αλάτων στο μέρος της τροφοδοσίας που προκαλεί αύξηση της ροής των αλάτων διαμέσου της μεμβράνης. Επίσης, μια υψηλότερη συγκέντρωση αλάτων στο διάλυμα τροφοδοσίας, αυξάνει την ωσμωτική πίεση και μειώνει την διαθέσιμη εφαρμοζόμενη εξωτερική πίεση ( $P_{εξ}$ ) μειώνοντας έτσι τον ρυθμό ροής του παραγόμενου νερού. Σε ένα σύστημα RO με πολλαπλά στάδια επεξεργασίας, ο ρυθμός ανάκτησης προσδιορίζεται για το κάθε στάδιο και για το όλο σύστημα.

Εφαρμοζόμενη εξωτερική πίεση ( $P_{εξ}$ ):

Η εφαρμοζόμενη εξωτερική πίεση (Net Driving Pressure,  $P_{εξ}$ ) είναι η πίεση που υπερνικά την ωσμωτική πίεση και ωθεί την μεταφορά του νερού τροφοδοσίας διαμέσου των ημιπερατών μεμβρανών. Η τιμή της εφαρμοζόμενης εξωτερικής πίεσης όμως, μειώνεται βαθμηδόν στην μονάδα RO και για αυτόν τον λόγο ο υπολογισμός της γίνεται κατά μέσο όρο. Η εφαρμοζόμενη εξωτερική πίεση ορίζεται ως η συνάρτηση της εφαρμοζόμενης πίεσης, που υπερβαίνει την μέση ωσμωτική πίεση της τροφοδοσίας και όποιες άλλες απώλειες πίεσης στο σύστημα σύμφωνα με την εξ. 1.73.

$$P_{εξ} = P_f - \Pi_{os} - P_p - 0.5P_d + \Pi_{osp} \quad (1.73)$$

Όπου  $P_f$  είναι η πίεση τροφοδοσίας,  $\Pi_{os}$  είναι η μέση ωσμωτική πίεση τροφοδοσίας,  $P_p$  είναι η πίεση διήθησης,  $P_d$  είναι η πτώση πίεσης διαμέσου των στοιχείων RO και  $\Pi_{osp}$  είναι η ωσμωτική πίεση διήθησης. Στις εφαρμογές RO υπό κανονικές συνθήκες, η ωσμωτική πίεση διήθησης είναι αμελητέα. Παρόλα αυτά, στις εφαρμογές νανοδιήθησης όπου η απόρριψη αλάτων είναι σχετικά χαμηλή, η αλατότητα του



διηθήματος παίζει σημαντικό ρόλο σε σύγκριση με την συγκέντρωση της τροφοδοσίας και τότε η ωσμωτική πίεση διήθησης πρέπει εξίσου να ληφθεί υπόψη. Διαχωρισμός αλάτων - νερού στην αντίστροφη ώσμωση:

Ο μηχανισμός διαχωρισμού των αλάτων από το νερό στην RO, δεν έχει κατανοηθεί επαρκώς. Οι δύο κύριες επιστημονικές προτάσεις που υπάρχουν, αφορούν την πορωδικότητα και την διάχυση. Η πορωδικότητα αφορά την μεταφορά νερού μέσα από τους φυσικούς πόρους της μεμβράνης και η διάχυση από έναν χώρο δέσμευσης σε κάποιον άλλο εντός της μεμβράνης. Η θεωρία υποδηλώνει ότι η χημική φύση της μεμβράνης είναι τέτοια που θα απορροφήσει και θα μεταφέρει το νερό επιλεκτικά. Αυτό μπορεί να συμβεί, λόγω ασθενούς χημικής σύνδεσης του νερού με την επιφάνεια της μεμβράνης ή λόγω της διάλυσης του νερού μέσα στην δομή της μεμβράνης.

Η χημική φύση της μεμβράνης είναι αυτή που καθορίζει την ικανότητα της να επιτρέπει την εκλεκτική μεταφορά του διαλύτη (νερό) σε σχέση με την διαλυμένη ουσία (ιόντα αλάτων). Είναι επίσης γνωστό, ότι στην απόρριψη των αλάτων παίζει ρόλο και η τάξη μεγέθους (τα μεγαλύτερα σωματίδια φιλτράρονται ευκολότερα από ότι τα μικρότερα). Απόρριψη μπορεί να προκληθεί και από την απώθηση των διαλυμένων ιόντων των αλάτων λόγω της παρουσίας (συνήθως αρνητικών) φορτίων στην επιφάνεια της μεμβράνης. Συνήθως, τα ιόντα με υψηλό αρνητικό σθένος (φορτίο) απορρίπτονται καλύτερα. Για παράδειγμα, η απόρριψη θειικών ιόντων είναι υψηλότερη από αυτή των ιόντων χλωριδίου. Λόγω των συνθηκών διατήρησης της ηλεκτρικής ουδετερότητας των διαλυμάτων εκατέρωθεν της μεμβράνης, η απώθηση του ενός τύπου ιόντων εμποδίζει την διέλευση του ιόντος με αντίθετο φορτίο και αυξάνει την συνολική απόρριψη. Αντίθετα, η παρουσία ιόντων με υψηλή διέλευση, αυξάνει και την διέλευση των ιόντων αντίθετου φορτίου. Η συνεισφορά αυτής της απόρριψης βάσει φορτίου, ποικίλλει ανάλογα με την ιοντική σύνθεση του επεξεργαζόμενου διαλύματος.

Μεταφορά νερού στην αντίστροφη ώσμωση:

Ο ρυθμός ροής νερού διαμέσου μιας ημιπερατής μεμβράνης μπορεί να οριστεί ως (εξ. 1.74):

$$\dot{Q}_w = (\Delta P - \Delta \Pi) \cdot K_w \cdot \left(\frac{S}{d}\right) \quad (1.74)$$

Όπου  $(\Delta P - \Delta \Pi)$  είναι η διαφορά μεταξύ της εφαρμοζόμενης πίεσης και της ωσμωτικής πίεσης,  $K_w$  είναι ο συντελεστής διαπερατότητας της μεμβράνης για το νερό σε cm/sec,  $S$  είναι το εμβαδόν της επιφάνειας της μεμβράνης σε  $m^2$  και  $d$  είναι το πάχος της σε mm. Από την εξ. αυτή, μπορεί κανείς να δει ότι υπάρχει αντίστροφη σχέση μεταξύ της εφαρμοζόμενης πίεσης και του πάχους της μεμβράνης. Έτσι, μια λεπτότερη μεμβράνη θα ήταν ιδανική καθώς θα απαιτούσε λιγότερη ενέργεια (πίεση) για να παράγει μια δεδομένη ποσότητα νερού από μια προβληματική πηγή νερού μιας δεδομένης συγκέντρωσης διαλυμένων ουσιών.

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής (εξ. 1.75):

$$\dot{Q}_w = A \cdot S \cdot P_{εξ} \quad (1.75)$$

Όπου  $A$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς νερού σε  $g/cm^2 \text{ sec}$  και αποτελεί μια μοναδική σταθερά για το κάθε είδος υλικού μεμβρανών.

Μεταφορά αλάτων στην αντίστροφη ώσμωση:

Ο ρυθμός μεταφοράς αλάτων δίνεται από την εξ. 1.76.

$$\dot{Q}_s = (\Delta C) \cdot K_s \cdot \left(\frac{S}{d}\right) \quad (1.76)$$

Όπου  $K_s$  είναι ο συντελεστής διαπερατότητας της μεμβράνης για τα άλατα σε cm/sec και  $\Delta C$  είναι η μεταβολή της συγκέντρωσης των αλάτων σε ppm.

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής (εξ. 1.77):

$$\dot{Q}_s = B \cdot S \cdot (\Delta C) \quad (1.77)$$

Όπου  $B$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς των αλάτων σε g/cm<sup>2</sup> sec και αποτελεί μια μοναδική σταθερά για το κάθε είδος υλικού μεμβρανών.

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις, η αλατότητα του διηθήματος προκύπτει από την εξ. 1.78.

$$C_p = \frac{\dot{Q}_s}{\dot{Q}_w} \quad (1.78)$$

Εισχώρηση και απόρριψη αλάτων:

Η εισχώρηση των αλάτων ορίζεται ως ο λόγος της συγκέντρωσης των αλάτων στο μέρος της διήθησης σε σχέση με την μέση συγκέντρωση τροφοδοσίας εξ. 1.79.

$$SP = 100\% \cdot \frac{C_p}{C_{fm}} \quad (1.79)$$

Όπου  $C_p$  είναι η συγκέντρωση των αλάτων στο διήθημα σε ppm και  $C_{fm}$  είναι η μέση συγκέντρωση των αλάτων στην τροφοδοσία σε ppm. Η εισχώρηση των αλάτων αυξάνεται όταν μειώνεται η εφαρμοζόμενη πίεση, διότι με την μείωση της εφαρμοζόμενης πίεσης γίνεται μείωση της ροής του νερού και της αραίωσης των αλάτων στο μέρος της διήθησης (ο ρυθμός ροής των αλάτων διαμέσου της μεμβράνης γίνεται με σταθερό ρυθμό και είναι ανεξάρτητος της εφαρμοζόμενης πίεσης).

Η απόρριψη των αλάτων δίνεται από την εξ. 1.80.

$$SR = 100\% - SP \quad (1.80)$$

Η απόρριψη των αλάτων είναι μια σημαντική παράμετρος λειτουργίας των μεμβρανών RO και καθορίζει την καταλληλότητα της κάθε μεμβράνης για ποικίλες εφαρμογές.

Οι παραπάνω σχέσεις για την μεταφορά νερού - αλάτων δείχνουν σταθερές τιμές ρυθμών μεταφοράς. Ωστόσο, οι ρυθμοί μεταφοράς νερού - αλάτων μπορούν να επηρεαστούν σε μεγάλο βαθμό από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.

Επίδραση θερμοκρασίας στον ρυθμό μεταφοράς:

Πρόκειται για την επίδραση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας στην διάχυτη ροή διαμέσου της μεμβράνης. Η επίδραση της θερμοκρασίας εκφράζεται με τον συντελεστή διόρθωσης θερμοκρασίας (Temperature Correction Factor), ο οποίος δίνεται από την εξ. 1.81.

$$TCF = \frac{1}{\exp\left(C\left(\frac{1}{273+T} - \frac{1}{298}\right)\right)} \quad (1.81)$$

Όπου C είναι μια σταθερά, χαρακτηριστική για το υλικό της κάθε μεμβράνης. Για τις μεμβράνες πολυαμιδίου, το εύρος τιμών της σταθεράς C κυμαίνεται από 2500 - 3000. Είναι σύνηθες για τις εφαρμογές RO η θερμοκρασία αναφοράς να τίθεται στους 25 °C για την οποία ο TCF ισούται με 1. Η μεταφορά αλάτων - νερού αυξάνεται περίπου 3% ανά °C. Με την αύξηση της θερμοκρασίας, αυξάνεται η διαπερατότητα του νερού και η πίεση τροφοδοσίας μπορεί να πάρει χαμηλότερες τιμές για υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτή η περίπτωση βρίσκει εφαρμογή στην επεξεργασία υφάλμυρων υδάτων χαμηλής αλατότητας και στην επεξεργασία θαλάσσιων υδάτων με μικρό εύρος θερμοκρασιών τροφοδοσίας. Ωστόσο, για θερμοκρασίες άνω των 30 °C η επακόλουθη μείωση της απαιτούμενης πίεσης τροφοδοσίας αρχίζει να σταθεροποιείται. Η αυξημένη διαπερατότητα του νερού μειώνεται, όταν αυξάνεται η ωσμωτική πίεση τροφοδοσίας και επιπλέον η εισχώρηση των αλάτων μαζί με μια τυχόν πιθανή ανάγκη για δεύτερο «πέραςμα» επεξεργασίας, μπορούν να αυξήσουν την συνολική κατανάλωση ενέργειας.

Μέση ροή διαπερατότητας:

Η μέση ροή διαπερατότητας (Average Permeate Flux) είναι άλλη μια σημαντική παράμετρος σχεδιασμού των συστημάτων RO. Η μέση ροή διαπερατότητας δίνεται από την εξ. 1.82.

$$APF = \frac{\dot{Q}_p}{EN \cdot MA} \quad (1.82)$$

Όπου EN είναι ο αριθμός των στοιχείων του συστήματος RO και MA είναι η μεμβρανική περιοχή ανά στοιχείο σε.

Ειδική διαπερατότητα μεμβρανών:

Η ειδική διαπερατότητα ή ειδική ροή χαρακτηρίζει το υλικό της μεμβράνης ως προς τον ρυθμό ροής του νερού που την διαπερνά, λόγω της εφαρμοζόμενης πίεσης και δίνεται από την εξ. 1.83.

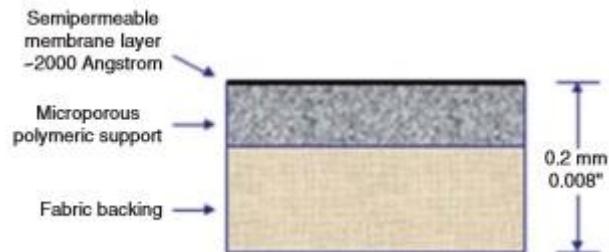
$$SF = \frac{APF}{P_{εξ}} \quad (1.83)$$

Η ειδική διαπερατότητα εξαρτάται από την αντίσταση της μεμβράνης στην ροή του νερού και συνήθως υπολογίζεται για νερό τροφοδοσίας 25 °C.

Τεχνολογία μεμβρανών RO:

Η ημιπερατή μεμβράνη των εφαρμογών της RO (και της νανοδιήθησης) αποτελείται από ένα φιλμ πολυμερικού υλικού που συγκροτείται από ένα «επιδερμικό» στρώμα πάχους αρκετών χιλιάδων angstrom (1 angstrom = 10<sup>-7</sup> mm), ένα σπογγώδες και μικροπορώδες υποστηρικτικό στρώμα πάχους περίπου 0.25 - 0.5 mm και από μια (υφασμάτινη) δομή υποστήριξης, με το συνολικό πάχος της μεμβράνης να είναι 0.15 - 0.2 mm (Εικ. 1.19). Οι μεμβράνες RO του εμπορίου πρέπει να έχουν υψηλή διαπερατότητα του νερού και υψηλό βαθμό ημιδιαπερατότητας δηλαδή ο ρυθμός μεταφοράς του νερού πρέπει να είναι πολύ υψηλότερος του ρυθμού μεταφοράς των διαλυμένων ιόντων. Τα υλικά των μεμβρανών πρέπει να παραμένουν σταθερά για ένα μεγάλο εύρος τιμών pH και θερμοκρασίας και να έχουν καλή μηχανική συνοχή. Η σταθερότητα της απόδοσης των μεμβρανών (διαπερατότητα του νερού και απόρριψη

των αλάτων) για μια χρονική περίοδο υπό συνθήκες λειτουργίας, καθορίζει την εμπορικά χρήσιμη διάρκεια ζωής των μεμβρανών, που στην περίπτωση των σημερινών εμπορικών μεμβρανών κυμαίνεται στα 5 - 10 έτη. Υπάρχουν δύο κύρια πολυμερικά υλικά για την παραγωγή εμπορικών μεμβρανών RO, η οξική κυτταρίνη και το πολυαμιδίο.



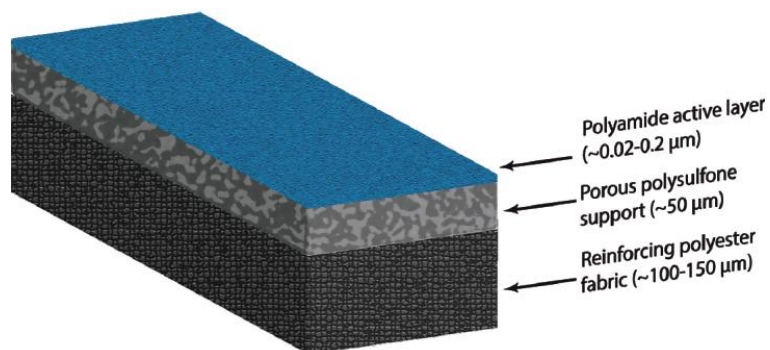
**Εικόνα 1.19:** Διαμόρφωση μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης

Μεμβράνες οξικής κυτταρίνης:

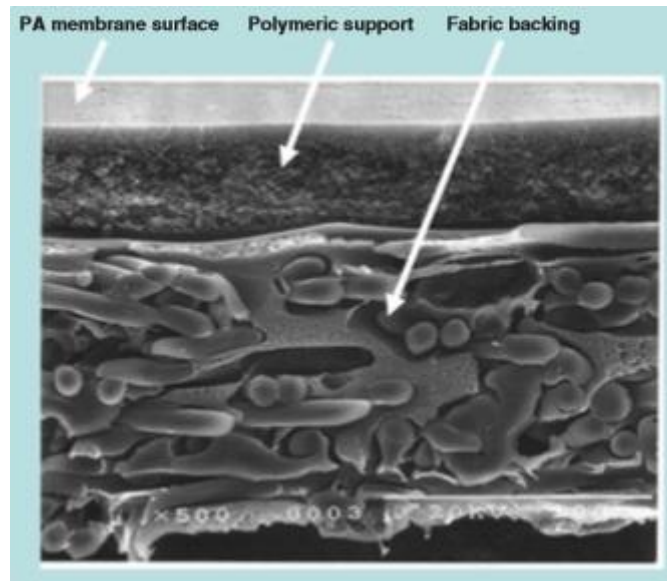
Η αρχική μεμβράνη οξικής κυτταρίνης που αναπτύχθηκε κατά τα τέλη της δεκαετίας του 1950 από τους Loeb και Surirajan, δημιουργήθηκε από διοξική κυτταρίνη. Οι σημερινές μεμβράνες οξικής κυτταρίνης κατασκευάζονται από ένα μείγμα διοξικής και τριοξικής κυτταρίνης. Η μεμβράνη σχηματίζεται από την εφαρμογή ενός διαλύματος πολυμερούς οξικής κυτταρίνης και ακετόνης, μαζί με διογκωτικά πρόσθετα, πάνω σε μια μη υφαντή δομή πολυεστέρα, σχηματίζοντας ένα λεπτό φιλμ. Μετά από αυτό, σειρά έχει ένα ψυχρό λουτρό (με παγωμένο νερό), στο οποίο βυθίζεται η μεμβράνη για να αφαιρεθεί η υπόλοιπη ακετόνη και άλλες χημικές ενώσεις απόπλυσης, ακολουθούμενο από ανόπτηση με λουτρό νερού υψηλής θερμοκρασίας της τάξης των 60 - 90 °C για την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Επίσης, κατά την διάρκεια της διαδικασίας, γίνεται και μερική απομάκρυνση του διαλύτη μέσω εξάτμισης. Η ανόπτηση βελτιώνει την ημιπερατότητα της μεμβράνης οξικής κυτταρίνης με αποτέλεσμα την μείωση της μεταφοράς του νερού και της διέλευσης των αλάτων. Μετά το πέρας της διαδικασίας, η μεμβράνη έχει μια ασύμμετρη δομή με ένα πυκνό επιφανειακό στρώμα περίπου 1000 - 2000 angstrom που είναι υπεύθυνο για την αλατοαπορριπτική ιδιότητα. Το υπόλοιπο φιλμ της μεμβράνης είναι σπογγώδες και πορώδες και διακατέχεται από υψηλή υδατική διαπερατότητα. Η απόρριψη των αλάτων και η ροή του νερού ελέγχονται μέσω των παρεκκλίσεων της θερμοκρασίας και από την διάρκεια της ανόπτησης. Επιπλέον, επειδή οι μεμβράνες οξικής κυτταρίνης υφίστανται ταχύτατα υδρόλυση υπό ακραίες τιμές pH, πρέπει το pH του νερού τροφοδοσίας να υπόκειται στο εύρος τιμών από 6 - 8. Κατά συνέπεια, και ο καθαρισμός των μεμβρανών πρέπει να γίνεται στο ίδιο εύρος pH. Ωστόσο, οι μεμβράνες αυτές επιδεικνύουν επαρκή ανοχή στο χλώριο, που καθιστά δυνατή την λειτουργία με χλωριωμένο νερό τροφοδοσίας για την απολύμανση και τον έλεγχο της ανάπτυξης βακτηριδίων. Για αυτόν τον λόγο, αυτές οι μεμβράνες χρησιμοποιούνται ακόμα και κατά κύριο λόγο για εφαρμογές που απαιτούν συχνή απολύμανση των συστημάτων RO με χλώριο, όπως οι φαρμακευτικές εταιρείες και οι εταιρείες τροφίμων. Ουσιαστικά όμως, εκτός από τις εφαρμογές που αναφέρονται παραπάνω, οι μεμβράνες τέτοιου τύπου δεν χρησιμοποιούνται πουθενά άλλου, καθώς κυρίαρχο ρόλο στον τομέα της αφαλάτωσης παίζουν οι σύνθετες μεμβράνες πολυαμιδίου.

Σύνθετες μεμβράνες πολυαμιδίου:

Η παραγωγή των σύνθετων μεμβρανών πολυαμιδίου (Εικ. 1.20, 1.21) γίνεται σε δύο στάδια. Πρώτα, ένα διάλυμα πολυσουλφόνης εφαρμόζεται σε μια μη υφαντή και κινούμενη δομή πολυεστέρα, σχηματίζοντας ένα υποστηρικτικό στρώμα πολυσουλφόνης. Μετά την εφαρμογή της πολυσουλφόνης, το τμήμα της μεμβράνης που έχει σχηματιστεί τοποθετείται σε ένα λουτρό νερού για την απομάκρυνση του διαλύτη. Το στρώμα πολυσουλφόνης είναι πολύ πορώδες και δεν διακατέχεται από ημιπερατότητα, δηλαδή δεν έχει την δυνατότητα διαχωρισμού νερού - διαλυμένων ιόντων, αλλά επιδεικνύει παρόλα αυτά υψηλή διαπερατότητα του νερού. Το επόμενο στάδιο είναι ο διεπιφανειακός ή ενδοεπιφανειακός πολυμερισμός, κατά τον οποίο σχηματίζεται ένα ημιπερατό «επιδερμικό» στρώμα πάχους 1000 - 2000 angstrom, στην επιφάνεια του υποστηρικτικού στρώματος της πολυσουλφόνης, μέσα από μια γρήγορη αντίδραση πολυμερισμού δύο μονομερών. Το ένα μονομερές είναι η μεταφαινυλενοδιαμίνη (metaphenylenediamine, MPD) που εμπεριέχει αμινο-ομάδες και το άλλο, είναι το τριμεσοϋλοχλωρίδιο ή χλωρίδιο 1,3,5-βενζολοτρικαρβοξυλικού οξέος ή τριμεσικό οξύ (trimesoyle chloride, TMC) που περιέχει καρβοξυλικό οξύ και λειτουργικές ομάδες χλωρίου. Το στρώμα αυτό που σχηματίζεται, είναι υπεύθυνο για την ιδιότητα της ημιπερατότητας. Μετά τον ενδοεπιφανειακό πολυμερισμό, η μεμβράνη ξεπλένεται σε λουτρό για την απομάκρυνση των οποιωνδήποτε χημικών παραγόντων και τοποθετείται σε κλίβανο για ξήρανση.



**Εικόνα 1.20:** Δομή μεμβράνης πολυαμιδίου



**Εικόνα 1.21:** Διατομή μεμβράνης πολυαμιδίου σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο

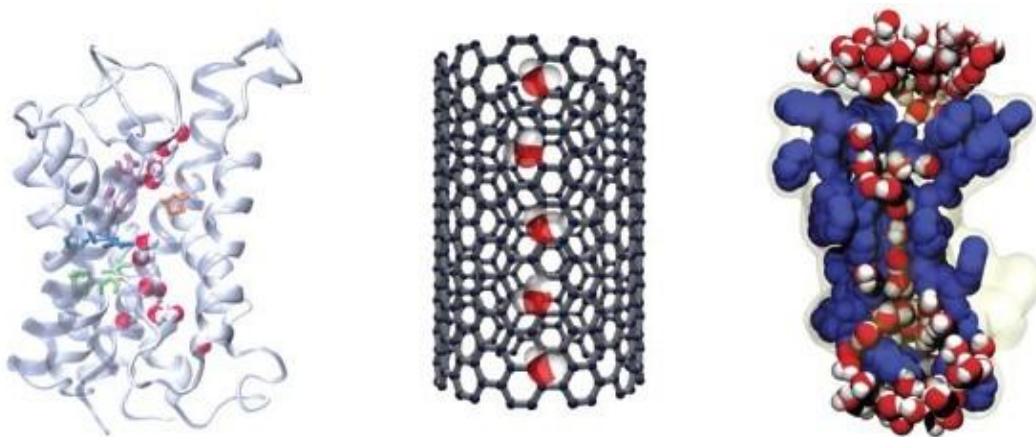
Αυτή η διαδικασία παραγωγής δύο σταδίων επιτρέπει την ανεξάρτητη βελτιστοποίηση των ξεχωριστών ιδιοτήτων των στρωμάτων της μεμβράνης. Η προκύπτουσα σύνθετη μεμβράνη χαρακτηρίζεται από υψηλότερη ειδική υδατική ροή και χαμηλότερη διέλευση των αλάτων, σε σύγκριση με τις μεμβράνες οξικής κυτταρίνης. Επιπλέον, οι σύνθετες μεμβράνες πολυαμιδίου παραμένουν σταθερές για ένα μεγαλύτερο εύρος pH από ότι οι μεμβράνες οξικής κυτταρίνης. Ωστόσο, οι μεμβράνες πολυαμιδίου είναι ευάλωτες στην οξειδωτική αποδόμηση που προκαλείται από το χλώριο, ενώ οι μεμβράνες οξικής κυτταρίνης, όπως αναφέρεται και παραπάνω, ανέχονται κάποια συγκεκριμένα επίπεδα χλωρίου. Οι πρώτες σύνθετες μεμβράνες κατασκευασμένες από αλειφατικά πολυμερή ήταν πολύ ευαίσθητες στην παρουσία οξειδωτικών παραγόντων και υπέφεραν από ανεπάρκεια λειτουργικής σταθερότητας υπό κανονικές συνθήκες. Η επόμενη γενιά σύνθετων μεμβρανών αρωματικού πολυαμιδίου του Cadotte, παρουσιάζει μια σχετική ανοχή στο χλώριο, καλή σταθερότητα για ένα μεγάλο εύρος pH (2 - 10) και επιδεικνύει εξαιρετική και μακροπρόθεσμη λειτουργική σταθερότητα για την κυριότητα των τύπων των υδάτων τροφοδοσίας. Αυτός ο τύπος υλικού μεμβρανών χρησιμοποιείται σήμερα σχεδόν αποκλειστικά για την παραγωγή των στοιχείων RO του εμπορίου. Οι σύνθετες μεμβράνες πλέον, χρησιμοποιούνται για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπως η αφαλάτωση θαλάσσιων και υφάλμυρων υδάτων, η μετεπεξεργασία του πόσιμου νερού, η ανάκτηση των υγρών αποβλήτων, η επεξεργασία τροφίμων και άλλες βιομηχανικές εφαρμογές.

**Δίκτυο μεμβρανών ως εναλλακτική των μεμβρανών διάχυσης - διήθησης:**

Οι σημερινές μεμβράνες βασίζονται στον μηχανισμό διάχυσης για τον διαχωρισμό των διαλυμένων ουσιών από το νερό. Σε αυτόν τον μηχανισμό, κατά την μεταφορά, τα συστατικά του διαλύματος διασπώνται πρώτα στην μήτρα της μεμβράνης και μετά διαχέονται διαμέσου αυτής με το να αναπηδούν ανάμεσα σε προσωρινά συνδεδεμένους πόρους. Σε αντίθεση οι μεμβράνες των βιολογικών συστημάτων πραγματοποιούν αποδοτική και εκλεκτική μεταφορά νερού και επιλεγμένων συστατικών μέσω δικτύων, τα οποία λέγονται πρωτεϊνικά δίκτυα μεμβρανών. Τα πρωτεϊνικά δίκτυα μεμβρανών έχουν μήκος 4 nm σε σύγκριση με

τους ελικοειδείς ασύνδετους πόρους στα ενεργά στρώματα μεμβρανών RO πάχους 20-200 nm. Πρόσφατα, έχει εστιαστεί η προσοχή στα πρωτεϊνικά υδατικά δίκτυα (AQPs, aquaporins) και στα αντίστοιχα συνθετικά τους, τους νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs, carbon nanotubes). Τα πρωτεϊνικά υδατικά δίκτυα μεταφέρουν εκλεκτικά νερό μέσω κυτταρικών μεμβρανών σε πολλές μορφές ζωής συμπεριλαμβανομένων και των ανθρώπων. Τα δίκτυα αυτά, μαζί με τους νανοσωλήνες άνθρακα μεταφέρουν νερό με ρυθμό αρκετών δισεκατομμυρίων μορίων ανά δευτερόλεπτο. Επίσης, αποτελούνται από στενούς πόρους επενδυμένους με υδρόφοβες επιφάνειες, με αποτέλεσμα την μεταφορά μεμονωμένων «τεμαχίων» νερού. Ωστόσο, ενώ οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν διαστάσεις ουσιαστικά μικρότερες από 10 angstrom σε διάμετρο και συνεπώς δεν μπορούν να απορρίψουν τα διάφορα άλατα (τα ενυδατωμένα ιόντα νατρίου και χλωρίου είναι περίπου 7,2 και 6,6 angstrom σε διάμετρο αντίστοιχα), τα πρωτεϊνικά υδατικά δίκτυα είναι εξαιρετικά υδατο-εκλεκτικά λόγω των μικρού μεγέθους πόρων τους (~ 3 angstrom) και της παρουσίας καταλοίπων αμινοξέων που απορρίπτουν τα φορτισμένα ιόντα.

Η εξαιρετική διαπερατότητα και εκλεκτικότητα των πρωτεϊνικών υδατικών δικτύων, έχει οδηγήσει στην έρευνα για την ενσωμάτωσή τους στις μεμβράνες καθαρισμού υδάτων. Σε διάφορα διπλώματα ευρεσιτεχνίας έχει προταθεί η χρήση μεμβρανών, που μιμούνται αυτές των βιολογικών συστημάτων και είναι βασισμένες στα πρωτεϊνικά υδατικά δίκτυα. Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι, για την ενσωμάτωση των πρωτεϊνικών υδατικών δικτύων σε σταθερά λιπίδια και σε τμήματα συμπολυμερών με δομή παρόμοια αυτής των λιπιδίων, για την τοποθέτησή τους με υψηλή «πληθυσμιακή» πυκνότητα σε μεμβράνες, για την ενσωμάτωση τέτοιων στρωμάτων σε ποικίλες δομές μεμβρανών και τέλος, για την ανάπτυξη κλιμακωτής μεμβράνης, όπου τα πρωτεϊνικά υδατικά δίκτυα θα εισέρχονται στο ενεργό στρώμα των μεμβρανών RO. Η τελευταία μέθοδος είχε ως αποτέλεσμα την εμπορική διάθεση σε μικρή κλίμακα, αλλά υπάρχουν ανησυχίες όσον αφορά την σταθερότητα και το κόστος. Άλλη μια εξέλιξη εμπνευσμένη από βιολογικές δομές είναι η ανάπτυξη τεχνητών υδατικών δικτύων με μεμβράνες γύρω τους. Αυτά τα δίκτυα κατασκευάζονται με οργανική σύνθεση, αλλά τέτοιες δομές δεν έχουν μελετηθεί αρκετά. Ένα τέτοιο πειραματικό δίκτυο είναι το τεχνητό δίκτυο ιμιδαζόλης. Οι τεχνητές δομές παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα πρωτεϊνικά υδατικά δίκτυα και τους νανοσωλήνες άνθρακα, όπως η συμβατότητα με οργανικούς διαλύτες, η χημική και βιολογική σταθερότητα (κατάλληλες για εκλεκτικές μεμβράνες υψηλής διαπερατότητας) και η απλή σύνθεση (Εικ. 1.22).

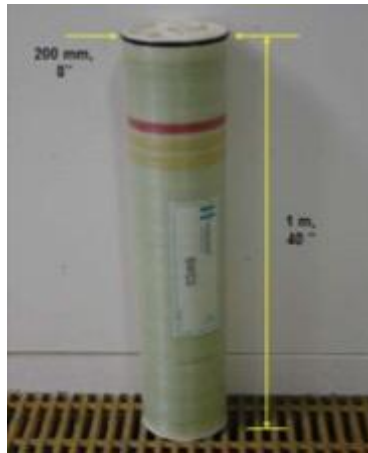


**Εικόνα 1.22:** (Από αριστερά στα δεξιά) Πρωτεϊνικά υδατικά δίκτυα (AQP, aquaporins), νανοσωλήνες άνθρακα (CNT, carbon nanotubes), τεχνητή δομή τύπου προσαρτημένου πεπτιδίου (PAP, peptide appended).

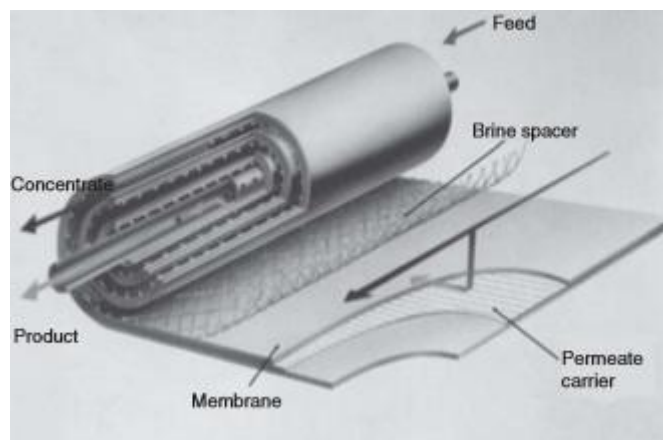
Διαμορφώσεις στοιχείων RO:

Η τεχνολογία RO ξεκίνησε με σωληνοειδείς διαμορφώσεις και διαμορφώσεις πλακετών και πλαισίων. Λόγω της μειωμένης όμως πυκνότητας συσκευασίας, αυτές οι πρώιμες διαμορφώσεις καταργήθηκαν σταδιακά από τις εφαρμογές παραγωγής πόσιμου νερού και πλέον χρησιμοποιούνται σπάνια και μόνο σε συμβατικά συστήματα RO για την επεξεργασία τροφίμων και λυμάτων. Ουσιαστικά όμως, στο παρελθόν, οι δύο κυριότερες διαμορφώσεις στοιχείων RO ήταν τα στοιχεία κοίλης ίνας και τα σπειροειδή (κυλινδρικά) στοιχεία. Σήμερα, η πλειονότητα των κατασκευαστών παράγει μόνο σπειροειδή στοιχεία (τα οποία και αναπτύχθηκαν λίγο αργότερα από τα στοιχεία κοίλης ίνας). Σε ένα σπειροειδές ή ελικοειδές στοιχείο (Εικ. 1.23, 1.24, 1.25) υπάρχουν δύο στρώματα μεμβράνης που διαχωρίζονται από ένα υλικό, το οποίο δρα ως διάυλος συλλογής του διηθήματος, σχηματίζοντας ένα φύλλο. Το φύλλο σφραγίζεται σε τρεις πλευρές, με την τέταρτη να παραμένει ανοικτή για την έξοδο του διηθήματος. Επίσης, στο φύλλο προστίθεται και ένας αποστατήρας - διαχωριστής του νερού τροφοδοσίας και της άλμης. Τα φύλλα τυλίγονται σπειροειδώς γύρω από έναν κεντρικό πλαστικό σωλήνα. Ο πλαστικός σωλήνας είναι διάτρητος, ώστε να συλλέγει το διήθημα από τα φύλλα. Τα φύλλα των μεμβρανών διατηρούνται υπό αυτόν τον σχηματισμό με μια ταινία που τυλίγεται γύρω από το στοιχείο και το εξωτερικό κέλυφος, το οποίο συνήθως κατασκευάζεται από ενισχυμένο υαλοβάμβακα. Η ροή εντός του στοιχείου είναι ευθεία, αξονική και γίνεται παράλληλα με τις επιφάνειες των μεμβρανών. Ένα τμήμα της τροφοδοσίας διαπερνά την μεμβράνη, διέρχεται μέσα από τις δομές μεταφοράς (διάυλοι συλλογής) του διηθήματος και καταλήγει στον κεντρικό πλαστικό αγωγό. Το υπόλοιπο τμήμα της τροφοδοσίας ρέει μέσα από το στοιχείο και εξέρχεται ως συμπύκνωμα. Ο διαχωριστής τώρα, είναι υπό την μορφή ενός δικτυωτού πλέγματος, που διαχωρίζει τις μεμβράνες από τα γειτονικά φύλλα και προκαλεί στροβιλισμό και αναταράξεις στο ρεύμα της τροφοδοσίας, για να μειωθεί η πόλωση συγκέντρωσης (καθαλάτωση). Το πάχος των καναλιών (ανάμεσα από τα φύλλα) από τα οποία διέρχεται η ροή τροφοδοσίας και γίνεται συμπύκνωμα είναι περίπου 0.7 - 0.9 mm, με την διατομή όμως των καναλιών να είναι πολύ μικρότερη λόγω της παρουσίας του διαχωριστή. Ένα τυπικό κυλινδρικό και σπειροειδές στοιχείο έχει μήκος περίπου 100 - 150 cm μήκος και διάμετρο 10 - 20 cm (Εικ. 1.23).

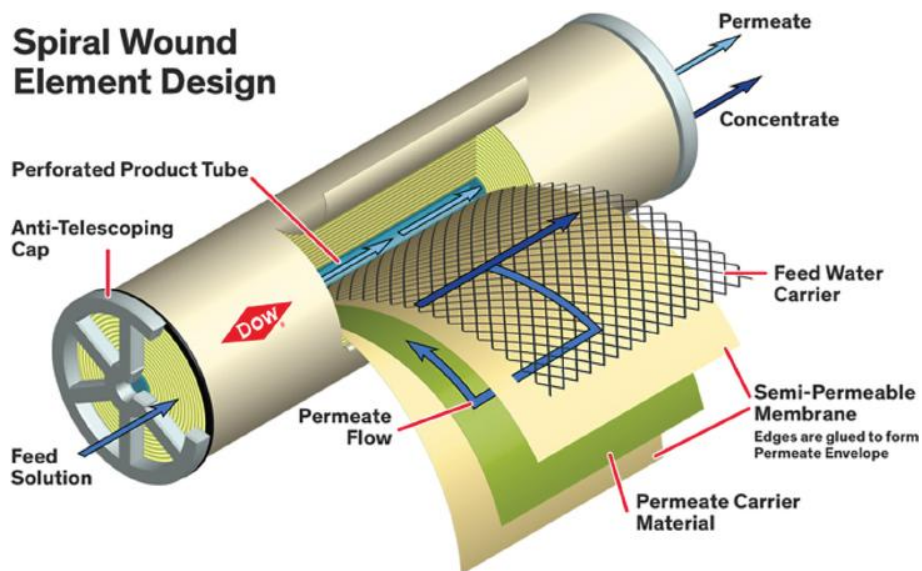




Εικόνα 1.23: Σπειροειδές στοιχείο αντίστροφης ώσμωσης



Εικόνα 1.24: Διατομή σπειροειδούς στοιχείου αντίστροφης ώσμωσης



Εικόνα 1.25: Σπειροειδές στοιχείο αντίστροφης ώσμωσης της εταιρείας Dow Chemical

Οι κατασκευαστές μεμβρανών προσδιορίζουν τις απαιτήσεις του ρυθμού ροής του συμπυκνώματος (για τον έλεγχο της πόλωσης συγκέντρωσης) μέσω του περιορισμού του ρυθμού ανάκτησης (ή μετατροπής) ανά στοιχείο κατά 10 - 20%, με τον ίδιο τον ρυθμό ανάκτησης να αποτελεί συνάρτηση του μήκους. Για την λειτουργία υπό αποδεκτούς ρυθμούς ανάκτησης, τα στοιχεία (συνήθως 3 - 8) συνδέονται και τοποθετούνται σε σειρά εντός ενός αγωγού ή δοχείου πίεσης (Εικ. 1.26), με την ροή του συμπυκνώματος να γίνεται η ροή τροφοδοσίας του επόμενου και ούτω καθεξής. Το κάθε στοιχείο περιέχει ένα παρέμβυσμα (φλάντζα) υπό μορφή δακτυλίων, τοποθετημένο συνήθως στο εμπρόσθιο άκρο του στοιχείου. Το παρέμβυσμα σφραγίζει τον χώρο ανάμεσα στο εξωτερικό τοίχωμα του στοιχείου και το εσωτερικό τοίχωμα του δοχείου πίεσης και αποτρέπει την παράκαμψη του στοιχείου από το νερό τροφοδοσίας, που διαφορετικά θα οδηγούσε σε μειωμένη ροή διαμέσου του στοιχείου και σε υψηλό ρυθμό ανάκτησης. Το συμπύκνωμα από το τελευταίο στοιχείο εξέρχεται του δοχείου πίεσης και είτε προωθείται στο ακόλουθο στάδιο επεξεργασίας ή απορρίπτεται. Οι πλαστικοί αγωγοί διήθηματος του κάθε στοιχείου συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας έναν κοινό αγωγό και το διήθημα, από όλα τα στοιχεία, εξέρχεται του δοχείου πίεσης υπό την μορφή ενιαίας ροής. Το πρώτο και το τελευταίο στοιχείο συνδέεται με το άκρο του δοχείου πίεσης μέσω ενός προσαρμογέα (αντάπτορα). Ένας αγωγός πίεσης αποτελούμενος από έξι έως οκτώ συνδεδεμένα σε σειρά στοιχεία μπορεί να λειτουργήσει για ρυθμό ανάκτησης μέχρι και 50 - 70% σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, υπό κανονικές συνθήκες πάντα.



**Εικόνα 1.26:** Συστοιχίες αγωγών πίεσης της μονάδας αφαλάτωσης του Ashkelon (Ισραήλ)

Οι διαστάσεις και η γεωμετρία των σπειροειδών κυλινδρικών στοιχείων είναι σε μεγάλο βαθμό τυποποιημένες, με πολλά από τα στοιχεία διάφορων κατασκευαστών να έχουν παρόμοια διαμόρφωση, να είναι εύκολα ανταλλάξιμα και να μπορούν να τοποθετηθούν σε κοινά δοχεία πίεσης. Επίσης, επειδή κάποιοι

κατασκευαστές έχουν ξεκινήσει την παραγωγή και διάθεση στοιχείων μεγαλύτερης διαμέτρου (> 200 mm) και διαστάσεων, έχει εισαχθεί και μια καινούργια βιομηχανική τυποποίηση για αυτά τα στοιχεία με διάμετρο 406 mm και μήκος 1016 mm. Τα στοιχεία αυτού του είδους έχουν τέσσερις φορές μεγαλύτερη και υψηλότερη μεμβρανική επιφάνεια και ροή διηθήματος από τα υπάρχοντα στοιχεία, μειώνοντας παράλληλα και το κεφαλαιακό κόστος. Μια από τις εταιρείες που παράγουν και τα στοιχεία με τις μεγαλύτερες διαμέτρους είναι και η Koch Membrane Systems, η οποία διαθέτει περιορισμένο αριθμό στοιχείων διαμέτρου 457 mm για μονάδες RO μικρού έως μεσαίου μεγέθους.

Καθαλάτωση - μόλυνση και αναστολές καθαλάτωσης - μόλυνσης:

Οι συσκευές RO, όπως και κάθε άλλη συσκευή, είναι φθαρτές και η συντήρησή τους επιτακτική για την μέγιστη παραγωγική τους λειτουργία. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν και ενίοτε παρεμποδίζουν την αποτελεσματικότητα των συστημάτων αυτών. Τέτοιοι παράγοντες είναι η ιοντική μόλυνση (ασβέστιο, μαγνήσιο κλπ.), διάφορα βακτήρια, ο ρευστοποιημένος και υγροποιημένος οργανικός άνθρακας (Dissolved Organic Carbon, D.O.C.), διάφοροι ιοί, κολλοειδή και αδιάλυτα σωματίδια, η βιοσυσσώρευση και η καθαλάτωση. Για να περιοριστούν οι βλάβες, έχουν εισαχθεί διάφορα στάδια επεξεργασίας με αναστολές καθαλάτωσης και μόλυνσης. Οι αναστολές καθαλάτωσης περιλαμβάνουν οξέα και άλλους παράγοντες, όπως το πολυακρυλαμίδιο, τα φωσφορικά οξέα και τα πολυφωσφορικά άλατα. Σκοπός των παραπάνω αναστολέων είναι η αποτροπή του φαινομένου της καθαλάτωσης, δηλαδή του φαινομένου της εναπόθεσης υπό μορφή σκληρού φλοιού (κρούστας) στερεών αλάτων και αλατούχων ουσιών και κυρίως ανθρακικών αλάτων (π.χ. ανθρακικού ασβεστίου, ανθρακικού μαγνησίου, χλωριούχου νατρίου κ.ά.). Η καθαλάτωση μπορεί να συμβεί και στα συστήματα απόσταξης και στα συστήματα μεμβρανών. Στα συστήματα απόσταξης, η κρούστα αλάτων που σχηματίζεται καλείται λεβητόλιθος και η ονομασία προέρχεται από το γεγονός ότι η καθαλάτωση πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο στα τοιχώματα δοχείων εντός των οποίων γίνεται βρασμός νερού, δηλαδή στους λέβητες. Η αφαίρεση του λεβητόλιθου αποτελεί μια εξαιρετικά δυσχερή διαδικασία για δύο λόγους. Πρώτον, διότι έχει μεταβλητή μορφή άλλοτε σκληρή και άλλοτε πολτώδη και δεύτερον, επειδή είναι ένα δυσθερμαγωγό σώμα, δηλαδή κακός αγωγός της θερμότητας. Στα συστήματα μεμβρανών, η καθαλάτωση εμφανίζεται στις μεμβράνες και μειώνει την εκλεκτικότητά τους και την διαπερατότητα του νερού. Ο συνήθης τρόπος αντιμετώπισης είναι η ελεγχόμενη καθαλάτωση (controlled scaling), που αποτελεί ένα τρίτο ή τέταρτο επιπρόσθετο στάδιο επεξεργασίας του συμπυκνώματος ενός συστήματος RO. Η τεχνολογία λειτουργεί κατά το τελευταίο στάδιο της RO, πάνω από το θεωρητικό σημείο κορεσμού και χρησιμοποιεί χημικά καθαριστικά μέσα για την αφαίρεση της επιζήμιας κρούστας της καθαλάτωσης από τις μεμβράνες και την επαναφορά της αρχικής κατάστασης του συστήματος.

Το σύστημα λειτουργεί πάνω από το σημείο κορεσμού για ορισμένα συστατικά όπως το ανθρακικό ασβέστιο, το θειικό ασβέστιο, το διοξείδιο του πυριτίου κ.α. Το σύστημα λειτουργεί κανονικά και αντίστροφα, ώστε να καθαριστεί καλύτερα και ο καθαρισμός γίνεται σε συχνή βάση με διάφορα καθαριστικά μέσα, οξέα και βάσεις για την καλή λειτουργία των μεμβρανών. Αυτός ο τύπος συστήματος χρησιμοποιείται από τον Οργανισμό Διαχείρισης Υπογείων Υδάτων (Water Replenishment District) της Καλιφόρνια. Οι αναστολές μόλυνσης είναι τα βιοκτόνα, τα οποία λειτουργούν ως οξειδωτικοί παράγοντες κατά των βακτηρίων και των ιών. Βιοκτόνα, συνήθως, είναι το χλώριο, το όζον, το υποχλωριώδες νάτριο ή το υποχλωριώδες ασβέστιο. Σε τακτά

χρονικά διαστήματα, ανάλογα με την μόλυνση της μεμβράνης, τις κυμαινόμενες συνθήκες των θαλασσίων υδάτων ή την έγκαιρη προειδοποίηση των συστημάτων ελέγχου και παρακολούθησης, οι μεμβράνες πρέπει να καθαρίζονται με την διαδικασία της μαζικής ρίψης νερού έκτακτης ανάγκης ή νερού δόνησης - κραδασμών. Η έκπλυση γίνεται με αναστολές σε διάλυμα γλυκού νερού. Για να γίνει εφικτή η διαδικασία καθαρισμού, το σύστημα πρέπει να βγει εκτός σύνδεσης. Η διαδικασία καθαρισμού τέτοιου είδους, είναι περιβαλλοντικά επικίνδυνη αφού το μολυσμένο νερό απορρίπτεται στον ωκεανό χωρίς κάποια επεξεργασία βιολογικού καθαρισμού. Αποτέλεσμα αυτής της ενέργειας, είναι ο κίνδυνος ανεπανόρθωτης καταστροφής των ευαίσθητων υποθαλάσσιων βιότοπων και οικοσυστημάτων.

Ανίχνευση και έλεγχος της μόλυνσης:

Η μόλυνση των μεμβρανών επηρεάζει την αποδοτικότητά τους και μπορεί να εμφανιστεί σε κάθε τύπο μεμβρανών και υδάτων τροφοδοσίας, ακόμα και στις δευτερεύουσες μονάδες επεξεργασίας του διηθήματος της RO. Η επίδραση της μόλυνσης είναι μέτρια αρχικά, αλλά εάν δεν αντιμετωπιστεί εγκαίρως αυξάνεται ραγδαία και προκαλεί σημαντική επιδείνωση στην λειτουργία των μεμβρανών. Οι κυριότεροι μολυντές είναι το χλώριο, η κολλοειδής ύλη, η διαλυμένη φυσική οργανική ύλη, η βιολογική ύλη, η ανόργανη ύλη, τα προϊόντα και υποπροϊόντα του πετρελαίου (σε περίπτωση διύλισης) και οι διάφορες συνθέσεις οργανικών και κολλοειδών παραγόντων. Η αντιμετώπιση των συνθηκών μόλυνσης περιλαμβάνει την πρόωρη ανίχνευση και ταυτοποίηση των μολυντών και την διόρθωση της λειτουργίας των μεμβρανών. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος ανίχνευσης των μολυντών είναι η περιοδική εκτίμηση και αξιολόγηση των δεικτών ομαλοποιημένης λειτουργίας όπως η ροή παραγωγής ή η διαπερατότητα του νερού, η διέλευση ή η μεταφορά των αλάτων και η μείωση της πίεσης. Τυχόν αλλαγές στις τιμές της ομαλοποιημένης και κανονικής λειτουργίας των μεμβρανών, είναι ενδεικτικές της παρουσίας μολυντών. Οι εκτιμήσεις βάσει σχεδιασμού δείχνουν ότι λόγω της μόλυνσης η διαπερατότητα του νερού μειώνεται και η διέλευση των αλάτων αυξάνεται κατά 5 - 10%, ετησίως.

Η ταυτοποίηση των μολυντών ξεκινάει με την διερεύνηση της σύνθεσης και της ποιότητας του νερού τροφοδοσίας. Το νερό τροφοδοσίας μελετάται ως προς την συγκέντρωση και εμφάνιση παραγόντων καθαλάτωσης (κυρίως στην περίπτωση υφάλμυρων υδάτων) και ποιοτικών παραγόντων, όπως η θολότητα. Μέσα από τον ποιοτικό έλεγχο του νερού τροφοδοσίας αντλούνται χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την φύση και το είδος των μολυντών καθώς επίσης και για την αποτελεσματικότητα της προεπεξεργασίας. Κατά τον ποιοτικό έλεγχο εξετάζονται επίσης και τα κυλινδρικά στοιχεία της RO (κυρίως αυτά που βρίσκονται στην αρχή και το τέλος της εγκατάστασης). Πρώτα απ' όλα, εξετάζεται το βάρος και η εξωτερική εμφάνιση των στοιχείων, με την παρουσία λάσπης (γλίτσας) στην εξωτερική επιφάνεια, να υποδεικνύει την ύπαρξη βιολογικών μολυντών. Στην συνέχεια, εξετάζεται το εσωτερικό τμήμα του κάθε στοιχείου, με την συσσώρευση σωματιδίων να υποδεικνύει ανεπαρκή λειτουργία του συστήματος διήθησης. Το κοκκινωπό και καστανό χρώμα υποδεικνύει επίσης την μεταφορά και εναπόθεση σωματιδίων σιδήρου από το σύστημα προεπεξεργασίας. Το επόμενο βήμα είναι ο έλεγχος των στοιχείων υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα ήδη υπάρχοντα. Τέλος, μελετάται η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας καθαρισμού, που περιλαμβάνει ουσιαστικά τον έλεγχο της λειτουργίας των στοιχείων (που έχουν επηρεαστεί σε μεγαλύτερο βαθμό από την μόλυνση), πριν και μετά την διαδικασία καθαρισμού.

Διαδικασία καθαρισμού των στοιχείων RO:

Ο καθαρισμός των στοιχείων RO γίνεται μέσω της μονάδας καθαρισμού που αποτελείται από την δεξαμενή καθαρισμού, τον θερμαντήρα, την αντλία επανακυκλοφορίας, το φίλτρο και τις σωληνώσεις διασύνδεσης. Οι μεγαλύτερες μονάδες καθαρισμού περιλαμβάνουν επίσης και μια ξεχωριστή δεξαμενή για την διάλυση και ανάμειξη των καθαριστικών μέσων. Τα υλικά κατασκευής της μονάδας καθαρισμού πρέπει να παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε καθαριστικά διαλύματα χαμηλού και υψηλού pH (περίπου 2 - 11) και για θερμοκρασίες μέχρι και 50 °C. Το μέγεθος της δεξαμενής καθαρισμού και η χωρητικότητα της αντλίας καθορίζονται από τον αριθμό των δοχείων πίεσης που θα καθαριστούν την φορά. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας καθαρισμού, ο ρυθμός ροής του καθαριστικού διαλύματος ανά δοχείο πίεσης πρέπει να είναι περίπου 7 - 9 m<sup>3</sup>/h. Η δεξαμενή καθαρισμού πρέπει να περιέχει αρκετό όγκο καθαριστικού διαλύματος για την παροχή αντλητικής ικανότητας τουλάχιστον πέντε λεπτών. Στις μεγάλες μονάδες RO, οι σωλήνες διασύνδεσης της μονάδας καθαρισμού είναι μόνιμα προσκολλημένοι σε όλες τις σειρές των στοιχείων. Για την σύνδεση και αποσύνδεση μιας σειράς ή ενός τμήματος με την μονάδα καθαρισμού χρησιμοποιούνται βαλβίδες ή αφαιρούμενα τμήματα σωληνώσεων. Η διαδικασία καθαρισμού λοιπόν περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Έκπλυση των στοιχείων με νερό διήθησης
- Σύνδεση των στοιχείων με την μονάδα καθαρισμού
- Προετοιμασία του καθαριστικού διαλύματος στην μονάδα καθαρισμού
- Επανακυκλοφορία του καθαριστικού διαλύματος για 1 - 4 ώρες μέσα από τα στοιχεία
- Έκπλυση του καθαριστικού διαλύματος
- Επανάληψη των παραπάνω σταδίων με την επόμενη καθαριστική σύνθεση ή επανασύνδεση των καθαρισμένων στοιχείων με την αντλία υψηλής πίεσης για την επαναφορά της κανονικής λειτουργίας

Επιπλέον, επειδή ο καθαρισμός των μεμβρανών είναι πιο αποτελεσματικός υπό αυξημένες θερμοκρασίες, συνιστάται το καθαριστικό διάλυμα να είναι υπό ένα εύρος θερμοκρασίας της τάξης των 35 - 40 °C. Τα διαλύματα καθαρισμού πωλούνται από ειδικούς προμηθευτές ή αντί αυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν γενικές συνθέσεις καθαρισμού, η σύσταση των οποίων δίνεται από τον κατασκευαστή των μεμβρανών. Μια τέτοια γενική σύνθεση χαμηλού pH που χρησιμοποιείται συχνά είναι το διάλυμα 2% κιτρικού οξέος. Το καθαριστικό διάλυμα κιτρικού οξέος (pH = 2.5) είναι πολύ αποτελεσματικό όσον αφορά την αφαίρεση μεταλλικών υδροξειδίων και την διάλυση της κρούστας των ανθρακικών αλάτων. Σε περίπτωση που η κρούστα αλάτων (καθαλάτωση) περιέχει κυρίως ανθρακικό ασβέστιο ή υδροξειδία μετάλλων, η προσωρινή λειτουργία με όξινο νερό τροφοδοσίας χαμηλού pH με κάποιο μεταλλικό οξύ (θειικό ή υδροχλωρικό οξύ) μπορεί να είναι αρκετή για την επαναφορά της κανονικής λειτουργίας του συστήματος. Ωστόσο, ο καθαρισμός με όξινο νερό τροφοδοσίας χαμηλού pH είναι πιθανός, μόνο εάν είναι επιτρεπτή νομικά (και σε συγκεκριμένη περιοχή) η απόρριψη της άλμης χαμηλού pH. Οι γενικές συνθέσεις υψηλού pH τώρα, αποτελούνται από διαλύματα υδροξειδίου του νατρίου σε συνδυασμό με επιφανειοδραστικές ή τασιενεργές ουσίες όπως το αιθυλενοδιαμινοτετραοξικό οξύ (EDTA). Τέτοιου είδους καθαριστικά διαλύματα (pH = 10 - 11) είναι αποτελεσματικά ως προς την αφαίρεση της οργανικής ύλης από την επιφάνεια των μεμβρανών. Έχει βρεθεί ότι το EDTA και οι επιφανειοδραστικές ουσίες

γενικότερα, είναι απαραίτητα συστατικά των καθαριστικών διαλυμάτων υψηλού pH με την παρουσία τους να συνεισφέρει στην αφαίρεση των ιόντων ασβεστίου, που εμπεριέχονται στο επιζήμιο στρώμα της οργανικής ύλης. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων τα ρυπαρά στρώματα των μολυντών είναι μεικτής φύσης, καθώς περιέχουν μείγματα ανόργανης και οργανικής ύλης. Ο αποτελεσματικός καθαρισμός λοιπόν, γίνεται με την εφαρμογή ενός καθαριστικού διαλύματος χαμηλού pH ακολουθούμενο από ένα αντίστοιχο υψηλού pH.

Τα συστήματα RO που λειτουργούν με υπόγεια ύδατα τροφοδοσίας από πηγάδια χρειάζονται σπάνια καθαρισμό. Τα συστήματα RO πάλι, που λειτουργούν με επιφανειακά ύδατα τροφοδοσίας χρειάζονται συχνότερα καθαρισμό. Σε γενικές γραμμές, η συχνότητα καθαρισμού περιλαμβάνει έναν καθαρισμό ανά 2 - 3 έτη λειτουργίας με υφάλμυρα ύδατα και ανά 1 - 2 έτη λειτουργίας με θαλάσσια ύδατα. Στην περίπτωση του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας ανεπαρκούς ποιότητας, η συχνότητα καθαρισμού είναι αυξημένη και δείχνει ότι υπάρχει ανεπάρκεια προεπεξεργασίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η διαδικασία καθαρισμού δύναται να επαναφέρει μερικώς την χαμένη διαπερατότητα και να ελαττώσει την μείωση της πίεσης. Η απόρριψη των αλάτων βελτιώνεται πολύ σπάνια και μάλιστα, συνήθως παραμένει σταθερή ή μειώνεται μετά τον καθαρισμό. Αυτό γίνεται επειδή τα στρώματα της μόλυνσης φράζουν και βουλώνουν τις ατέλειες και τις κατεστραμμένες περιοχές της μεμβράνης, με τον καθαρισμό να τις ξανανοίγει και να επιτρέπει την διέλευση των αλάτων. Εάν ο καθαρισμός δεν βελτιώσει την απόδοση του συστήματος, η λύση είναι η αντικατάσταση των στοιχείων με την χειρότερη απόδοση.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί και μια άλλη διαδικασία καθαρισμού που δεν περιλαμβάνει χημικά μέσα, αλλά χρησιμοποιεί την ώσμωση και μια ροή υψηλής αλατότητας. Στα συστήματα RO όταν διακοπεί η λειτουργία, παρατηρείται μια αντιστροφή της ροής του διηθήματος διαμέσου της μεμβράνης προς το μέρος της τροφοδοσίας λόγω της ωσμωτικής πίεσης (ώσμωση). Η αρχή της ώσμωσης χρησιμοποιείται λοιπόν σε αυτήν την διαδικασία, που καλείται άμεση ώσμωση υψηλής αλατότητας (high salinity direct osmosis). Κατά την διαδικασία αυτή, γίνεται η έγχυση ενός διαλύματος υψηλής αλατότητας στην αναρρόφηση της αντλίας υψηλής πίεσης διάρκειας μερικών δευτερολέπτων, ενώ η μονάδα RO είναι σε λειτουργία. Η ροή υψηλής αλατότητας μεταφέρεται από την τροφοδοσία στο διάλυμα του συμπυκνώματος, με αποτέλεσμα την αύξηση της ωσμωτικής πίεσης (που υπερνικά εκείνη την στιγμή την εξωτερική πίεση) και την συνεπαγόμενη αντιστροφή της ροής του νερού. Το καθαρό νερό του τμήματος της διήθησης διαπερνά την μεμβράνη και απομακρύνει σαρωτικά τους μολυντές από την επιφάνεια της μεμβράνης. Αυτός ο τύπος καθαρισμού είναι εξαιρετικά αποτελεσματικός όσον αφορά την απομάκρυνση των βιολογικών και κολλοειδών μολυντών.

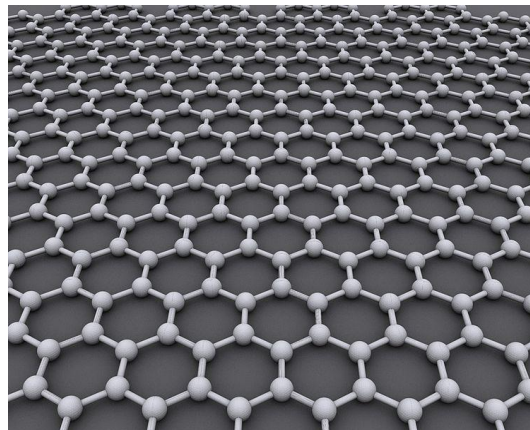
Μεμβράνες ανθεκτικές στην μόλυνση:

Κατά την λειτουργία των μεμβρανών RO λαμβάνει χώρα η εναπόθεση κολλοειδών υλικών, οργανικών μακρομορίων καθώς και η ανάπτυξη μικροβίων στην επιφάνεια της μεμβράνης. Αυτό οδηγεί σε μια μη αναστρέψιμη και συνεχή επίζηση (προσκόλληση) και ανάπτυξη βλαβερών βιοφίλμ, που μολύνουν την μεμβράνη. Η μόλυνση αυτή μπορεί να προκαλέσει σημαντική αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας λόγω επιπλέον αντίστασης στην ροή, μαζί με συσσώρευση αλάτων. Η ενισχυμένη πόλωση συγκέντρωσης (καθαλάτωση) μαζί με την ενισχυμένη από τα βιοφίλμ ωσμωτική πίεση, αυξάνουν το ποσό της ασκούμενης εξωτερικής πίεσης που χρειάζεται ώστε να υπερνικηθεί η υπάρχουσα ωσμωτική πίεση. Έτσι, μειώνεται η δυνατότητα διήθησης των μεμβρανών και αυξάνεται η κατανάλωση ενέργειας.

Αρκετές τροποποιήσεις μεμβρανών μελετώνται για την αποφυγή μόλυνσης των συστημάτων αντίστροφης ώσμωσης όπως η εναπόθεση υπερυδροφιλικών μορίων για την αποτροπή προσκόλλησης μακρομορίων και βιολογικών στοιχείων, η χρήση νανοσωματιδίων, η χρήση υλικών με βάση τον άνθρακα ή υβρίδια αυτού π.χ. οι νανοσωληνές άνθρακα (CNT), η χρήση οξειδίων γραφενίου για την μετάδοση βιοκτόνων ιδιοτήτων στην επιφάνεια των μεμβρανών και η χρήση ηλεκτρικά ενεργών ή ωθούμενων μαγνητικά επιφανειών για την αποφυγή παραμονής μικροβίων ή ακόμα και εξουδετέρωση αυτών. Επίσης, γίνεται η διερεύνηση μεθόδων με σκοπό την διακοπή ή τον έλεγχο της επικοινωνίας των βλαβερών βιολογικών στοιχείων για περιορισμό της μόλυνσης.

Νέες μεμβράνες αφαλάτωσης κατασκευασμένες από δισδιάστατα νανοϋλικά:

Οι μεμβράνες κατασκευασμένες από συμβατικά υλικά π.χ. πολυαμίδιο έχουν έμφυτους περιορισμούς όσον αφορά την διαπερατότητα, εκλεκτικότητα, χημική σταθερότητα και τις αντιρρυπαντικές ιδιότητες που επηρεάζουν σοβαρά την διαδικασία διαχωρισμού στην αφαλάτωση. Οι πρόσφατες εξελίξεις στα δισδιάστατα νανοϋλικά, προσφέρουν την ευκαιρία να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί μέσω της κατασκευής μεμβρανών φιλτραρίσματος νέας γενιάς. Οι μεμβράνες από γραφένιο (υβριδικός άνθρακας δισδιάστατης δομής) είναι πιθανόν να είναι οι μεμβράνες RO επόμενης γενιάς. Τα αναδυόμενα νανοϋλικά με βάση το γραφένιο, κατέχουν μια μοναδική δισδιάστατη δομή, καλές φυσικοχημικές και θερμικές ιδιότητες και εξαιρετικά μηχανικά, ηλεκτρικά και βιολογικά χαρακτηριστικά που μπορούν να συνεισφέρουν και να βελτιώσουν σημαντικά την απόδοση των μεμβρανών αφαλάτωσης. Οι μεμβράνες νανοϋλικών αναμένεται να είναι ισοδύναμες με τις μεμβράνες νανοσωληνών άνθρακα και τις βιομιμητικές μεμβράνες τύπου aquaporin ως προς την δυνατότητα διαχωρισμού, επειδή οι μεμβράνες βάσει γραφενίου (Εικ. 1.27) αναπτύσσονται πιο εύκολα χάρη στην χρήση του γραφίτη ως ακατέργαστο υλικό χαμηλού κόστους.



**Εικόνα 1.27:** Δομή γραφενίου από άτομα άνθρακα.

Υπάρχουν δύο γενικοί τύποι μεμβρανών με βάση το γραφένιο, που κατασκευάζονται εντελώς διαφορετικά και έχουν θεμελιώδεις διαφορετικούς μηχανισμούς διαχωρισμού. Η πρώτη είναι μια πορώδης μεμβράνη γραφενίου που κατασκευάζεται με διάτρηση πόρων τάξης νανομέτρου σε ένα λεπτό, πολύ δυνατό και αδιαπέραστο μονό στρώμα γραφενίου. Με το ακριβώς ελεγχόμενο μέγεθος και τις χειραγωγούμενες λειτουργικές ομάδες, που υπαγορεύουν τις κρίσιμες ιδιότητες

εισόδου των διάτρητων πόρων, οι μεμβράνες νανοπόρων επιτρέπουν μόνο στα μικρότερα από τους πόρους μόρια να εισχωρήσουν, ενώ τα μεγαλύτερα μόρια απορρίπτονται. Το πάχος ενός ατόμου άνθρακα (~ 0.3 nm) αυτής της πολύ δυνατής μεμβράνης είναι σχεδόν τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερο από το πάχος (μερικές εκατοντάδες νανόμετρα) των συνηθισμένων μεμβρανών αφαλάτωσης βελτιώνοντας σημαντικά την διαπερατότητα του νερού η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη με το πάχος της μεμβράνης. Οι προκλήσεις που παρουσιάζονται κατά την κατασκευή ενός τέτοιου μονού στρώματος μεμβράνης γραφενίου, περιλαμβάνουν τις τεράστιες δυσκολίες προετοιμασίας ενός μεγάλου χωρίς ελαττώματα τμήματος γραφενίου και τις δυσκολίες δημιουργίας πόρων υψηλής πυκνότητας ελεγχόμενων και σχετικά ομοιόμορφων μεγεθών.

Ο δεύτερος τύπος μεμβράνης βάσει γραφενίου παρασκευάζεται μέσω μαζικής παραγωγής νανοφύλλων από οξειδίο γραφενίου (graphene oxide, GO). Η μοναδική δισδιάστατη δομή των νανοφύλλων GO καθιστά δυνατή την σύνθεση μεμβράνης διαμέσου μιας απλής κλιμακωτής τεχνικής προσθήκης στρώσεων. Τα νανοδίκτυα που σχηματίζονται ανάμεσα στις στρώσεις των νανοφύλλων GO, που είναι λειτουργικά ισοδύναμα των νανοπόρων στο μονό στρώμα της μεμβράνης γραφενίου, απορρίπτουν αχρείαστα ιόντα και μόρια που είναι μεγαλύτερα από τα εσωτερικά διαστήματα των στρωμάτων GO. Ουσιαστικά, επειδή οι διαθέσιμοι πόροι του γραφενίου δεν έχουν αρκετά μικρή διάμετρο ώστε να απορρίπτουν τα διάφορα άλατα χρησιμοποιείται η δομή GO σε μορφή ενωμένων νανοφύλλων που μειώνουν την απόσταση ανάμεσα στα στρώματα, απορρίπτοντας έτσι τα αλατώδη στοιχεία. Οι προσομοιώσεις και οι πειραματικές αποδείξεις δείχνουν ότι, λόγω του πολύ μεγάλου μήκους ολίσθησης (δηλαδή χαμηλής τριβής) των μορίων νερού στην επιφάνεια γραφενίου, η ροή του νερού μπορεί να γίνει με υπερβολικά υψηλό ρυθμό στα επίπεδα νανοδίκτυα γραφενίου, μια ιδιότητα που μπορεί να οδηγήσει στον σχηματισμό μεμβρανών υψηλής διαπερατότητας.

Η τεχνική σύνθεσης μέσω προσθήκης στρώσεων στρωμάτων ενισχύει την προσαρμοστικότητα των διαστημάτων και λειτουργιών των νανοφύλλων GO για βελτιστοποίηση της διαπερατότητας και εκλεκτικότητας των μεμβρανών. Επιπλέον, η επιφάνεια του δισδιάστατου νανοδικτύου άνθρακα αποφέρει δυνατότερες ανθρακικές και οργανικές αλληλεπιδράσεις και έτσι εμποδίζει την εξάπλωση οργανικών μορίων στην μεμβράνη. Ως αποτέλεσμα, η μεμβράνη GO μπορεί αποτελεσματικά να αφαιρέσει ουδέτερους οργανικούς μολυντές, ένα μοναδικό χαρακτηριστικό σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεμβράνες RO, οι οποίες έχουν έναν σχετικά αδύναμο ρυθμό αφαίρεσης ουδέτερων μορίων.

Τα νανοϋλικά βάσει γραφενίου μπορούν πάλι να χρησιμοποιηθούν στην μετατροπή υπαρχουσών μεμβρανών για βελτιωμένη απόδοση ή πολυλειτουργικότητα. Για παράδειγμα, η ιδιότητα ημιαγωγής των νανοφύλλων GO και των συνθετικών τους (π.χ. διοξειδίο τιτανίου GO), κάνει το GO «φωτο-ενεργό» υπό το υπεριώδες αλλά και ορατό φως, μια χρήσιμη ιδιότητα για την ανάπτυξη φωτοκαταλυτικών μεμβρανών. Η σύνδεση νανοφύλλων GO είναι ένας άνετος τρόπος σχηματισμού ενός πυκνού στρώματος - εμποδίου στην πορώδη πλευρά μιας συνηθισμένης ασύμμετρης μεμβράνης για έλεγχο μολύνσεων στην ώσμωση με επιβράδυνση πίεσης, μια διαδικασία παραγωγής ενέργειας σχετική με την αφαλάτωση, της οποίας η εξέλιξη παρεμποδίστηκε από την συσσώρευση μολυσματικών ουσιών στην πορώδη υποστήριξη της μεμβράνης.



Σημαντικές προκλήσεις στην ανάπτυξη μεμβρανών GO:

Η υψηλή υδατική διαπερατότητα μιας μεμβράνης GO βασίζεται στην υποθετική ύπαρξη μιας συνεχούς, σχεδόν χωρίς τριβή, διόδου για υδατική ροή στις υπερβολικά λείες γραφιτικές (δηλαδή μη οξειδωμένες) περιοχές των νανοδικτύων GO. Ωστόσο, οι βαριά οξειδωμένες περιοχές, που αντιπροσωπεύουν ένα ευρύ μέρος του βασικού επιπέδου GO, δεν παρέχουν καμία δίοδο χωρίς τριβή και θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρκετά την ροή του νερού. Ένα νανοφύλλο GO αποτελείται από τρεις ξεχωριστές περιοχές την γραφιτική, την οξειδωμένη και την ελαττωματική. Η γραφιτική περιοχή τυπικά κατέχει το λιγότερο από το μισό όλου του χώρου ενός νανοφύλλου GO και δημιουργείται με την μέθοδο του Hummer. Επειδή οι γραφιτικές περιοχές ακόμα και αυτές με τον ίδιο λόγο συνολικής επέκτασης μπορούν να διανεμηθούν αρκετά διαφορετικά στα νανόφυλλα GO, οι προκύπτουσες δίοδοι μεταφοράς νερού, οι οριακές επιδράσεις και η ικανότητα διαχωρισμού των μεμβρανών μπορούν να αλλάξουν δραματικά.

Η μικροδομή των νανοδικτύων GO όπως επίσης και οι συνεργαζόμενοι μηχανισμοί μεταφοράς μορίων και νερού δεν είναι σαφώς κατανοητοί. Απαιτούνται προσπάθειες για τον ακριβή έλεγχο του μεγέθους των νανοδικτύων GO, τον χαρακτηρισμό του μήκους μεταφοράς και του πλάτους του δικτύου και για την κατασκευή μηχανικών μοντέλων που να συσχετίζουν αυτά τα χαρακτηριστικά με την απόδοση της μεμβράνης. Ο έλεγχος των εσωτερικών διαστρωματικών διαστημάτων μιας μεμβράνης GO, είναι άλλη μια κρίσιμη πρόκληση για την παραγωγή αποτελεσματικών μεμβρανών. Μελέτες έχουν δείξει ότι είναι σχετικά εφικτή η κατασκευή μεμβράνης με εσωτερικό διάστημα περισσότερο του 1 nm. Παρόλα αυτά, η μείωση του διαστήματος σε λιγότερο από 0.8 nm είναι ριψοκίνδυνη ( μια κρίσιμη δυνατότητα για τις μεμβράνες με στόχο την επίτευξη υψηλής αφαίρεσης χλωριούχου νατρίου μέσω του αποκλεισμού μεγέθους), διότι η οξειδωμένη περιοχή αρχίζει να δημιουργεί ισχυρές δυνάμεις ενυδάτωσης και απόρριψης φορτίου προκαλώντας διόγκωση των μεμβρανών και αυξάνοντας έτσι τα εσωτερικά διαστρωματικά διαστήματα. Για να προσδιοριστεί ποσοτικά με ακρίβεια ο βαθμός του οιδήματος των διαστημάτων, έχει καθιερωθεί ένα πρωτόκολλο ταυτόχρονης μέτρησης της μάζας των λεπτών φιλμ GO μέσω της μικρο-ευστάθειας ενός κρυστάλλου χαλαζία με διασκορπισμό και του πάχους των φιλμ με ελλεψόμετρο. Ένα φιλμ GO μπορεί να διογκωθεί περίπου όσο τρεις φορές το αρχικό του μέγεθος, όταν αλλάζει από την ξηρή σε υγρή κατάσταση. Οι δυναμικές στρατηγικές αντιμετώπισης της διόγκωσης περιλαμβάνουν την δημιουργία βραχέων ομοιοπολικών δεσμών, την διασύνδεση από υδατικά διαλύματα και την εισαγωγή αποστατών κατάλληλου μεγέθους ανάμεσα στα στρώματα GO.

Παρά τις προκλήσεις τα δισδιάστατα νανοϋλικά με βάση το γραφένιο μπορούν να φέρουν την επανάσταση στην τεχνολογία αφαλάτωσης βάσει μεμβρανών, χάρη στα πλεονεκτήματά τους έναντι των συνηθισμένων υλικών με την δυνατότητα σύνθεσης μιας μεμβράνης αφαλάτωσης μέσω απλών και κλιμακωτών τεχνικών προσθήκης στρώσεων και στην ευέλικτη χειραγώγηση της διαπερατότητας και εκλεκτικότητας των μεμβρανών για τους στοχευόμενους μολυντές. Άλλα δισδιάστατα υλικά (π.χ. ζεόλιθος, διθειούχο μολυβδαίνιο) με μοναδικές διαμορφώσεις που θα μπορούσαν να βοηθήσουν στον έλεγχο των εσωτερικών διαστρωματικών διαστημάτων, προσελκύουν επίσης το ερευνητικό ενδιαφέρον για την κατασκευή μεμβρανών υψηλής απόδοσης.

Τα δισδιάστατα νανοϋλικά μπορούν να αναβαθμιστούν και να μετασχηματιστούν σε τρισδιάστατη δομή, λειτουργώντας έτσι ως νανοαντιδραστήρες

για την περαιτέρω βελτίωση της εκλεκτικότητας και την ελαχιστοποίηση της ρύπανσης των μεμβρανών. Τελικά, αξίζει να αναφερθεί ότι τα διασδιάστατα νανοϋλικά βρίσκουν δυνητικές εφαρμογές σε τεχνολογίες αφαλάτωσης που δεν βασίζονται σε μεμβράνες. Για παράδειγμα, διασδιάστατα λεπτά φιλμ με υλικό από γραφένιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ενισχύσουν την ηλιακή εξάτμιση και έτσι να βοηθήσουν στην αφαλάτωση νερού με την χρήση ηλιακής ενέργειας.

Παράδειγμα εγκαταστάσεων παράκτιας μονάδας αφαλάτωσης RO:

Μια τυπική μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού RO απαρτίζεται από:

- Την μονάδα παροχής των υδάτων τροφοδοσίας
- Το σύστημα προεπεξεργασίας
- Την αντλητική μονάδα υψηλής πίεσης (αντλιοστάσιο)
- Τις συστοιχίες των δοχείων πίεσης (εντός των οποίων βρίσκονται τα στοιχεία RO)
- Το σύστημα ελέγχου των οργάνων
- Την μονάδα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας
- Την μονάδα επεξεργασίας και αποθήκευσης του διηθήματος
- Την μονάδα καθαρισμού
- Την μονάδα επεξεργασίας και διαχείρισης της άλμης (σε περίπτωση που υπάρχει και υποστηρίζεται ένα τέτοιο τμήμα) ή την μονάδα απόρριψης

Το νερό αντλείται από απόσταση 300 - 1000 m από την ακτή (η απόσταση εξαρτάται από το μέγεθος της μονάδας και τις ιδιαιτερότητες της περιοχής) και μέσω υποθαλάσσιων αγωγών, καταλήγει στο αντλιοστάσιο που βρίσκεται στην παραλία. Στη συνέχεια, αφού αφαιρεθούν οι στερεές ουσίες (μέσω πυκνών πλεγμάτων - κόσκινων), το νερό διοχετεύεται στην μονάδα αφαλάτωσης που βρίσκεται μερικές εκατοντάδες μέτρα από την ακτή. Εκεί πραγματοποιείται η αφαλάτωση που περιλαμβάνει ουσιαστικά τρία στάδια, την προεπεξεργασία, την κύρια επεξεργασία με RO και την μετεπεξεργασία. Αρχικά, κατά την προεπεξεργασία, αφαιρούνται τα αιωρούμενα σωματίδια και καταστρέφονται οι μικροοργανισμοί, ώστε να αποφευχθεί η εναπόθεσή τους στις μεμβράνες. Στην συνέχεια, κατά την κύρια επεξεργασία με RO, οι αντλίες υψηλής πίεσης τροφοδοτούν τις μεμβράνες RO με νερό υπό πίεση 65 - 80 atm, ώστε να επιτευχθεί η διέλευσή του και να απορριφθούν τα άλατα. Η ανάκτηση του αφαλατωμένου νερού είναι περίπου 45 - 50% (1 m<sup>3</sup> αφαλατωμένου νερού για κάθε 2 m<sup>3</sup> θαλασσινού νερού), με το διάλυμα του συμπυκνώματος που προκύπτει να διέρχεται από τις αντλίες, όπου λόγω της υψηλής πίεσης καθίσταται εφικτή η ανάκτηση του 25 - 30% της αρχικής του ενέργειας. Ύστερα, μέσω των αγωγών εκροής απορρίπτεται στη θάλασσα, σε σημείο όμως στο οποίο υπάρχουν ρεύματα ώστε να μην γίνεται συγκέντρωση αλάτων και ρυπαντών. Τέλος, κατά την μετεπεξεργασία, πραγματοποιείται η βελτίωση των χαρακτηριστικών του νερού (ρύθμιση pH και σκληρότητας) με τη χρήση χημικών μέσων (π.χ. επεξεργασμένου ασβέστη, διοξειδίου του άνθρακα ή θειικού οξέως) σε δεξαμενή και στην συνέχεια, το παραγόμενο νερό αποστέλλεται στο δίκτυο ύδρευσης ή αποθηκεύεται. Η απόρριψη της άλμης στη θάλασσα, γίνεται συνήθως με τους ακόλουθους δύο τρόπους:

- Απευθείας απόρριψη με ξεχωριστό υποθαλάσσιο αγωγό απόρριψης (ή σπανιότερα επιφανειακά στην ακτογραμμή)

- Απόρριψη μαζί με την εκροή μιας μονάδας επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων. Η ανάμειξη (και αραίωση) της άλμης με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα από κάποια (παρακείμενη συνήθως) εγκατάσταση επεξεργασίας αστικών λυμάτων και η από κοινού απόρριψή τους σε παράκτια ύδατα, αποτελεί συνηθισμένη πρακτική.

#### 1.2.2.2 *Νανοδιήθηση (Nanofiltration, NF)*

Η NF είναι μια σχετικά πρόσφατη μέθοδος μεμβρανών με τα χαρακτηριστικά της να είναι ανάμεσα σε αυτά της υπερδιήθησης (Ultrafiltration, UF) και σε αυτά της RO. Η NF αρχικά δημιουργήθηκε με σκοπό τον εκλεκτικό διαχωρισμό των διαλυμένων και οργανικών ουσιών από το νερό, αλλά πλέον συμπεριλαμβάνει μια ποικιλία διαμορφώσεων και υλικών μεμβρανών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορες εφαρμογές όπως η επεξεργασία των βιομηχανικών υδάτων και υγρών αποβλήτων. Οι πρώτες μεμβράνες που δημιουργήθηκαν είχαν στόχο την αφαλάτωση, αλλά στην πορεία αναπτύχθηκαν μεμβράνες με ποικίλα χαρακτηριστικά διήθησης για διάφορα είδη ροής και ειδικές εφαρμογές όπως η αφαίρεση χλωριούχου νατρίου από υδατικά διαλύματα σε ποσοστό μικρότερο του 99% και η λειτουργία υπό χαμηλή πίεση. Για αυτό το επιθυμητό εύρος διήθησης χρησιμοποιούνταν υλικά μεμβρανών, που επέτρεπαν την υψηλή απόρριψη δισθενών ιόντων, την υψηλή διέλευση μονοσθενών αλάτων και την υψηλή απόρριψη οργανικών ενώσεων χαμηλού μοριακού βάρους. Επιπροσθέτως, παρατηρήθηκε ότι πολλές από αυτές τις μεμβράνες μπορούσαν να λειτουργήσουν σε πολύ χαμηλότερες πιέσεις από αυτές των μεμβρανών RO. Ο όρος «νανοδιήθηση» χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά εμπορικά από την εταιρεία FilmTec, κατά τα μέσα της δεκαετίας του 1980, για να περιγράψει ένα νέο είδος διαθέσιμων μεμβρανών με χαρακτηριστικά μεταξύ της UF και της RO. Επειδή όμως οι φυσικές και λειτουργικές διαφορές μεταξύ της RO και της UF είναι αρκετά μεγάλες, μια σαφής και ευρέως αποδεκτή ερμηνεία έχει αποδειχθεί αδύνατη. Η νέα γενιά μεμβρανών RO χαμηλής πίεσης (Low Pressure Reverse Osmosis, LPRO) περιπλέκει περισσότερο την κατάσταση, καθώς έχει τις ίδιες απαιτήσεις σε πίεση με τις εμπορικά διαθέσιμες μεμβράνες NF. Ως εκ τούτου, η άποψη ότι η NF αποτελεί μια ανεξάρτητη μέθοδος διαχωρισμού και διήθησης, είναι αμφιλεγόμενη για κάποιους επιστήμονες.

Επειδή οι εμπορικά διαθέσιμες μεμβράνες παρουσιάζουν ποικιλία χαρακτηριστικών, οι επιστήμονες έχουν ξεχωρίσει δύο κύριους τύπους πολυμερικών σταυρωτά συνδεδεμένων μεμβρανών NF. Ο πρώτος τύπος μεμβρανών είναι δομικά παρόμοιος των μεμβρανών LPRO. Σε αυτόν τον τύπο μεμβρανών γίνεται μη εκλεκτική αφαίρεση των διαλυμένων ουσιών λόγω της παρεμποδισμένης διάχυσης και σε λιγότερο βαθμό λόγω του αποκλεισμού φορτίου, που προκύπτει από τις αλληλεπιδράσεις των ιόντων. Ο δεύτερος τύπος μεμβρανών, βασίζεται περισσότερο στον αποκλεισμό φορτίου για την παρεμπόδιση της μεταφοράς των ιόντων και φαίνεται ότι επιτρέπει την επιλεκτική διέλευση ιόντων χαμηλής σθεναρότητας. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι αρχικά υπήρχε μια αντιπαράθεση σχετικά με το αν οι δύο τύποι έχουν καθορισμένες δομές πόρων, αλλά τώρα είναι ευρέως γνωστό ότι η μεταφορά μάζας στην NF γίνεται μέσω διακριτών πόρων. Σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των συστημάτων NF, διαδραμάτισαν οι έρευνες ως προς την μεταφορά μάζας των Linder και Kedem. Ουσιαστικά όμως η NF πλέον ως μια ανεξάρτητη μέθοδος, τείνει να περιορίζεται και να ταυτίζεται με τον δεύτερο τύπο μεμβρανών που παρέχει επιλεκτική διέλευση ιόντων και μη φορτισμένων διαλυμένων ουσιών βάσει

φορτίου και μεγέθους. Αυτός ο τύπος μεμβρανών NF θα μελετηθεί κατά κύριο λόγο παρακάτω.

Μηχανισμοί αφαίρεσης διαλυμένων ουσιών:

Σε αντίθεση με τις μεμβράνες RO, οι μεμβράνες NF έχουν γενικά πορώδεις δομές με διαμέτρους πολύ μεγαλύτερες από αυτές των περισσοτέρων διαλυμένων αλάτων. Επειδή οι μεμβράνες NF φέρουν ένα επιφανειακό φορτίο, συνήθως αρνητικό σε ουδέτερο pH, η απόρριψη των διαλυμένων ουσιών οφείλεται σε τρεις μηχανισμούς. Οι τρεις αυτοί μηχανισμοί είναι ο αποκλεισμός μεγέθους, ο ηλεκτροστατικός αποκλεισμός και ο διηλεκτρικός αποκλεισμός. Ο αποκλεισμός μεγέθους αναφέρεται στον ολικό αποκλεισμό μιας διαλυμένης ουσίας από το πολυμερές στρώμα της μεμβράνης ή από την δομή των πόρων. Ο ηλεκτροστατικός αποκλεισμός αναφέρεται στις φορτισμένες διαλυμένες ουσίες και συμβαίνει λόγω της έλξης, που ασκεί η φορτισμένη επιφάνεια της μεμβράνης στα ιόντα αντίθετου φορτίου. Τέλος, ο διηλεκτρικός αποκλεισμός αναφέρεται στο φαινόμενο κατά το οποίο, το υδατικό διάλυμα και η μήτρα της πολυμερικής μεμβράνης έχουν διαφορετικές διηλεκτρικές σταθερές, που εμποδίζουν τις φορτισμένες διαλυμένες ουσίες από το να διαπεράσουν την μεμβράνη.

Απόρριψη ιόντων:

Η απόρριψη των ιόντων μέσω της NF, είναι μια περίπλοκη διαδικασία και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των ιόντων (μέγεθος, σθένος), τα χαρακτηριστικά της μεμβράνης (μέγεθος πόρων, πάχος, πορωδικότητα, πυκνότητα του φορτίου), σύσταση του νερού τροφοδοσίας (σύνθεση και συγκέντρωση των ιόντων, pH), θερμοκρασία και συνθήκες λειτουργίας (ροή, ανάκτηση). Σε σύγκριση με τον αποκλεισμό μεγέθους, ο οποίος μπορεί να εκτιμηθεί από το μέγεθος ενός ιόντος σε σχέση με το μέγεθος των πόρων της μεμβράνης, ο ηλεκτροστατικός αποκλεισμός είναι πολύ πιο περίπλοκος. Αυτή η πολυπλοκότητα προκύπτει από το γεγονός ότι το φορτίο της επιφάνειας της μεμβράνης, είναι μια συνάρτηση του pH και επηρεάζεται από τους τύπους και τις συγκεντρώσεις των ιόντων στο διάλυμα. Επιπλέον, η διαίρεση και διχοτόμηση των ιόντων μεταξύ του νερού τροφοδοσίας και της μεμβράνης μπορεί να επηρεαστεί και από τα άλλα ιόντα στο διάλυμα.

Για δυαδικά διαλύματα αλάτων (π.χ. NaCl) υπό σταθερό pH, η απόρριψη εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος των πόρων της μεμβράνης, τον λόγο της πυκνότητας του φορτίου της μεμβράνης προς την συγκέντρωση των αλάτων και την ροή της διήθησης. Σε γενικές γραμμές, η απόρριψη των ιόντων αυξάνεται, όταν αυξάνεται το μέγεθός τους και μειώνεται η διάμετρος των πόρων της μεμβράνης, όταν αυξάνεται η σθεναρότητα των αλάτων, όταν μειώνεται η συγκέντρωση των αλάτων για ένα σταθερό μεμβρανικό επιφανειακό φορτίο και όταν αυξάνεται η ροή της διήθησης. Το pH του διαλύματος επηρεάζει το επιφανειακό φορτίο των μεμβρανών, λόγω του ιονισμού των λειτουργικών τμημάτων του ενεργού στρώματος. Για τις περισσότερες μεμβράνες NF, μια αύξηση του pH, οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση του επιφανειακού αρνητικού φορτίου και συνεπώς σε αύξηση της απόρριψης των ιόντων. Εντούτοις, πολλοί επιστήμονες έχουν δείξει ότι συγκεκριμένα ζεύγη ιόντων (π.χ. CaCl<sub>2</sub>), ίσως να μην ακολουθήσουν αυτήν την αναμενόμενη τάση, γιατί υπάρχουν σημαντικές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα άλατα και την επιφάνεια της μεμβράνης.

Για τα διαλύματα αλάτων με πολλά συστατικά, που είναι συνηθισμένα σε πολλές εφαρμογές, η απόρριψη μεμονωμένων ιόντων είναι εξαιρετικά πολύπλοκη. Παρά το γεγονός ότι οι τρεις παραπάνω μηχανισμοί παραμένουν έγκυροι, η διχοτόμηση του όγκου του διαλύματος από την μεμβράνη, εξαρτάται και από τα

υπόλοιπα ιόντα αλλά και από την ανάγκη για διατήρηση της ηλεκτρικής ουδετερότητας πέραν της μεμβράνης. Επειδή συγκεκριμένα ιόντα έχουν μεγαλύτερη ικανότητα διαπερατότητας από κάποια άλλα, η μεταφορά τους διαμέσου της μεμβράνης πρέπει να εξισορροπηθεί κατά κάποιο τρόπο με την μεταφορά ιόντων αντίθετου φορτίου. Αυτό το μοντέλο μεταφοράς μεταξύ ορισμένων ζευγών ιόντων μπορεί να έχει σημαντική συνολική επίδραση στην απόρριψη, αλλά είναι δύσκολο να περιγραφθεί ποσοτικά. Τέτοια φαινόμενα καθιστούν δυνατή την περίπτωση της «αρνητικής» απόρριψης, όπως π.χ. στην περίπτωση του χλωρίου για τα διαλύματα NaCl (χλωριούχου νατρίου) και Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (θεικού νατρίου), στα οποία η συγκέντρωση του χλωρίου είναι πολύ χαμηλότερη σε σχέση με τις συγκεντρώσεις του νατρίου και του θείου.

Ως συμπέρασμα από τα παραπάνω καταλαβαίνει κανείς, ότι οι μηχανισμοί απόρριψης ιόντων στις μεμβράνες NF με μέγεθος πόρων περίπου 1 nm και σχετικά χαμηλή πυκνότητα φορτίου, παρουσιάζουν περιορισμένη μόνο απόρριψη των μικρών μονοσθενών ιόντων (π.χ. του καλίου, του νατρίου και του χλωρίου) σε σχέση με τα πολυσθενή ιόντα (π.χ. του ασβεστίου, του μαγνησίου και του θείου). Επίσης, παρόλο που αυτό περιορίζει μεν την χρήση της NF σε συγκεκριμένες εφαρμογές επεξεργασίας, της προσάπτει δε τα εξής χαρακτηριστικά:

- μειωμένες απαιτήσεις σε πίεση και χαμηλότερες συγκεντρώσεις μονοσθενών αλάτων στο διάλυμα της συμπύκνωσης σε σχέση με την RO και
- την πιθανότητα του διαχωρισμού κατά προτίμηση των ιόντων με βάση το μέγεθος και το σθένος.

Οι ερευνητές έχουν συνδυάσει τις ιδιότητες των μεμβρανών NF, την ροή, το pH και την σθεναρότητα των ιόντων στην απόρριψη για την ανάπτυξη διεργασιών καθαρισμού και κλασματοποίησης ποικίλων ροών στην βιομηχανία.

Απόρριψη οργανικών διαλυμένων ουσιών:

Η NF έχει χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές όπου απαιτείται αφαίρεση της οργανικής ύλης και των οργανικών μολυντών. Όπως και η απόρριψη των ιόντων, έτσι και η απόρριψη των οργανικών διαλυμένων ουσιών είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο που εξαρτάται από την μεμβράνη, τις ιδιότητες των διαλυμένων ουσιών, την χημική σύνθεση του διαλύματος της τροφοδοσίας, την θερμοκρασία και τις συνθήκες λειτουργίας. Μέσα από τις έρευνες που έχουν γίνει για την δυνατότητα απόρριψης των οργανικών διαλυμένων ουσιών από τις μεμβράνες NF, έχει προκύψει το συμπέρασμα ότι η απόρριψη οφείλεται στον αποκλεισμό μεγέθους, στις ηλεκτροστατικές επιδράσεις και στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ της μεμβράνης και των διαλυμένων ουσιών.

Για μη ιοντικές και μη φορτισμένες οργανικές διαλυμένες ουσίες χωρίς σημαντική αλληλεπίδραση με την μεμβράνη, η απόρριψη είναι κυρίως μια συνάρτηση του λόγου του μεγέθους των διαλυμένων ουσιών προς το ενεργό - δραστικό μέγεθος των πόρων της μεμβράνης ή του λόγου του μοριακού βάρους των διαλυμένων ουσιών προς το μοριακό βάρος που «φιλτράρεται» και κατακρατείται από την μεμβράνη. Ωστόσο, αρκετοί ερευνητές έχουν αποδείξει ότι το μέγεθος των διαλυμένων ουσιών μπορεί να είναι δύσκολο να χαρακτηριστεί και ότι το μοριακό βάρος είναι συχνά μια ανεπαρκής παράμετρος για τον χαρακτηρισμό της απόδοσης της απόρριψης. Για τον χαρακτηρισμό του μοριακού βάρους χρησιμοποιείται ευρέως η ακτίνα του Stokes, που δίνεται από την εξ. 1.84.

$$r_s = \frac{k \cdot T}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot D_s} \quad (1.84)$$

Όπου  $k$  είναι η σταθερά Boltzmann,  $T$  είναι η θερμοκρασία,  $\eta$  είναι το δυναμικό ιξώδες του νερού και  $D_s$  είναι ο συντελεστής διάχυσης των διαλυμένων ουσιών σε υγρή φάση. Ο συντελεστής  $D_s$  δίνεται από την εξ. 1.85 (εξίσωση Wilke - Chang).

$$D_s = \frac{7.4 \cdot 10^{-8} \cdot (\phi \cdot M)^{0.5} \cdot T}{\eta \cdot V_s^{0.6}} \quad (1.85)$$

Όπου  $\phi$  είναι ο παράγοντας συσχέτισης (συνήθως 2.26 για υδατικά διαλύματα),  $M$  είναι η μοριακή μάζα του διαλύτη και  $V_s$  είναι ο μοριακός όγκος των διαλυμένων ουσιών, που δίνεται από την εξ. 1.86 (εξίσωση LaBas).

$$V_s = \sum n_i \cdot V_{B,i} \quad (1.86)$$

Όπου  $n_i$  είναι ο αριθμός των ατόμων του μορίου και  $V_{B,i}$  είναι ο όγκος του κάθε ατόμου.

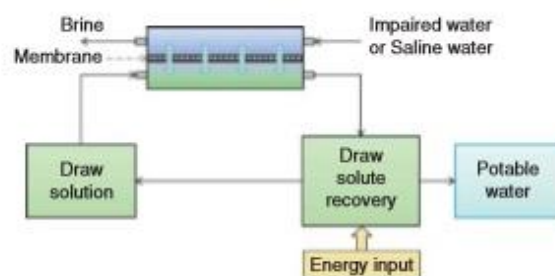
Για συγκεκριμένες μη ιοντικές διαλυμένες ουσίες, η απόρριψη είναι συχνά χαμηλότερη από την αναμενόμενη βάσει μοριακού μεγέθους λόγω των αλληλεπιδράσεων διαλυμένων ουσιών - μεμβράνης. Έχει προταθεί ότι οι διαλυμένες ουσίες προσροφώνται μέσω δύο κύριων μηχανισμών. Ο πρώτος μηχανισμός είναι η ειδική προσρόφηση, κατά την οποία οι διαλυμένες ουσίες σχηματίζουν δεσμούς υδρογόνου με το πολυμερές στρώμα της μεμβράνης και ο δεύτερος είναι η μη ειδική προσρόφηση, κατά την οποία οι υδρόφοβες ή οι μη πολικές διαλυμένες ουσίες επιδεικνύουν μεγαλύτερη έλξη για το πολυμερές στρώμα της μεμβράνης παρά για το νερό. Τέτοιες χημικές ενώσεις συχνά επιδεικνύουν αρχικά υψηλή απόρριψη, κατά την διάρκεια του σταδίου της προσρόφησης, που με την πάροδο του χρόνου διήθησης μειώνεται σημαντικά. Επίσης, αυτό το φαινόμενο είναι πολύ πιο σημαντικό για τις μεμβράνες NF παρά για τις μεμβράνες RO, με την πρόβλεψη εμφάνισής του βάσει των ιδιοτήτων των διαλυμένων ουσιών να είναι αρκετά δύσκολη. Οι ερευνητές έχουν προσπαθήσει να προβλέψουν ποιες χημικές ενώσεις είναι πιθανόν να εμφανίσουν τέτοια συμπεριφορά με την χρήση διαφόρων σταθερών, όπως οι σταθερές διαχωρισμού των οξέων και οι σταθερές Taft και Hammett, αλλά με περιορισμένη όμως επιτυχία. Τέτοια φαινόμενα έχουν αναφερθεί για τις φαινόλες, τις στεροειδείς ορμόνες, τις χημικές ενώσεις τριαλογονομεθανίου, τις φθοριωμένες χημικές ενώσεις κ.ά. Οι περισσότερες ιοντικές οργανικές διαλυμένες ουσίες είναι σχετικά μεγαλύτερες σε σύγκριση με τα άλατα και συνεπώς, η αφαίρεση τους από τις περισσότερες μεμβράνες NF γίνεται σε πολύ καλό επίπεδο ανεξάρτητα από το μέγεθος. Υπάρχουν όμως και εξαιρέσεις, ανάμεσα στις οποίες συμπεριλαμβάνονται ορισμένα μικρά οργανικά οξέα (π.χ. το οξικό οξύ και κάποια αμινοξέα) και αλειφατικές αμίνες (π.χ. τριαιθυλαμίνη).

### 1.2.2.3 Εμπρόσθια ώσμωση (Forward Osmosis, FO)

Η FO είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιεί την ωσμωτική πίεση για να οδηγήσει το νερό από ένα αλατούχο διάλυμα ή από υγρά απόβλητα και λύματα, μέσα από μια ημιπερατή μεμβράνη που κατακρατεί τις διαλυμένες ουσίες. Αυτή η ροή προκαλείται από την ωσμωτική πίεση που δημιουργείται από ένα ειδικό ξεχωριστό διάλυμα που περιέχει κάποιον ωσμωτικό παράγοντα και άλλες ειδικές διαλυμένες ουσίες. Ουσιαστικά, ο σκοπός του ωσμωτικού παράγοντα και των διαλυμένων

ουσιών είναι να αυξήσουν την αλατοπεριεκτικότητα του διαλύματος στο οποίο προστίθενται και να προκαλέσουν κατά κάποιο τρόπο ένα είδος ελεγχόμενης και κατευθυνόμενης ώσμωσης. Με άλλα λόγια, η FO χρησιμοποιεί ένα κύριο διάλυμα υψηλής αλατότητας ως «πόλο έλξης» υδάτων τροφοδοσίας μικρότερης αλατότητας, με τα ίδια τα ύδατα τροφοδοσίας να προέρχονται από ποικίλες πηγές όπως τα υγρά απόβλητα και λύματα, τα υφάλμυρα και θαλάσσια ύδατα ή ακόμα και από απορριφθέντα ύδατα υψηλής αλατότητας διαφόρων μονάδων αφαλάτωσης. Το κλειδί της επιτυχίας αυτής της μεθόδου, είναι η προϋπόθεση ότι το νερό τροφοδοσίας θα έχει πάντα μικρότερη αλατότητα από το κύριο διάλυμα για να διενεργηθεί το φαινόμενο της ώσμωσης. Ένα παράδειγμα, είναι η χρήση υφάλμυρου νερού ως νερό τροφοδοσίας και η χρήση θαλασσινού νερού ως το κύριο ειδικό διάλυμα. Το υφάλμυρο νερό θα περάσει μέσα από την ημιπερατή μεμβράνη, οι διαλυμένες ουσίες του θα δεσμευθούν από αυτή και αυτό θα εισέλθει, ως καθαρό νερό πλέον, στο θαλασσινό. Το θαλασσινό νερό κατά αυτόν τον τρόπο θα αραιωθεί και θα υποστεί μείωση της αλατότητάς του, με την μετέπειτα επεξεργασία του να γίνεται ευκολότερη.

Κατά την διεξαγωγή της FO, ο διαχωρισμός που γίνεται μέσω αυτής της ελεγχόμενης και κατευθυνόμενης ώσμωσης έχει μικρές απαιτήσεις σε ενέργεια (η ενέργεια που χρειάζεται είναι μόνο για την άντληση των υδάτων), επειδή υπάρχει η τάση για την απόκτηση θερμοδυναμικού ισοζυγίου. Επίσης, η ημιπερατή μεμβράνη εμποδίζει την διέλευση των διαλυμένων ουσιών, που εμπεριέχονται στο ειδικό κύριο διάλυμα, μέσα από αυτή και συνεπώς την είσοδό τους στο διάλυμα τροφοδοσίας. Μετά την ώσμωση, το αραιωμένο πλέον κύριο διάλυμα υπόκειται σε μια δεύτερη διαδικασία επεξεργασίας κατά την οποία γίνεται ανάκτηση και ανακύκλωση του ωσμωτικού παράγοντα και των διαλυμένων ουσιών (που είχαν αυξήσει την αλατότητα του κύριου διαλύματος ώστε να προκύψει ώσμωση), με αποτέλεσμα την παραγωγή καθαρού και πόσιμου νερού. Για αυτήν την δεύτερη διαδικασία διαχωρισμού απαιτείται κάποιο ποσό ενέργειας, το οποίο εξαρτάται από τον τύπο του ωσμωτικού παράγοντα και των διαλυμένων ουσιών που χρησιμοποιούνται και από την ευκολία ή δυσκολία ανάκτησης αυτών (Εικ. 1.28).



**Εικόνα 1.28:** Διάταξη εμπρόσθιας ώσμωσης

Επίσης, δύο σημαντικά πλεονεκτήματα της εμπρόσθιας ώσμωσης είναι το χαμηλό ενεργειακό κόστος και τα χαμηλά επίπεδα ρύπανσης. Το χαμηλό ενεργειακό κόστος προκύπτει από το γεγονός ότι η FO μπορεί να χρησιμοποιήσει λιγότερο «ακριβές» μορφές ενέργειας. Για παράδειγμα, η RO χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια που εγγενώς έχει υψηλή αξία. Η FO όμως, έχει την δυνατότητα χρήσης εξαιρετικά χαμηλής θερμικής ενέργειας που δεν έχει καμία άλλη ωφέλιμη χρήση. Τα χαμηλά επίπεδα ρύπανσης προκύπτουν από το γεγονός ότι υπάρχει μια γενικότερη τάση και ροπή για λιγότερη μόλυνση στην FO, σε σχέση με τις μεθόδους που χρησιμοποιούν

υδραυλική πίεση. Αυτό γίνεται λόγω της απουσίας «συνωστισμού» των ρυπαντών στα στρώματα των μεμβρανών της FO, σε αντίθεση με τις μεθόδους υδραυλικής πίεσης. Η συμπύκνωση αυτή των ρυπαντών, μειώνει την πορωδικότητα της μεμβράνης και την κάνει πιο σκληρή και ανθεκτική στα καθαριστικά μέσα.

Ωσμωτικοί παράγοντες και διαλυμένες ουσίες:

Οι ωσμωτικοί παράγοντες και οι διαλυμένες ουσίες που προορίζονται για το ειδικό κύριο διάλυμα πρέπει να ικανοποιούν τα παρακάτω κριτήρια:

- Υψηλή ωσμωτική απόδοση, δηλαδή υψηλή διαλυτότητα και μικρό μοριακό βάρος
- Ελάχιστη αντίστροφη διάχυση για να μην μειωθεί η ωσμωτική πίεση, να μην «μολυνθεί» το διάλυμα τροφοδοσίας και για να περιοριστεί η ανάγκη για αναπλήρωση του ειδικού διαλύματος
- Χημική συμβατότητα με τα υλικά της μεμβράνης FO
- Μηδενική τοξικότητα
- Οικονομική ανακτησιμότητα
- Χαμηλό κόστος

Ανόργανες διαλυμένες ουσίες:

Τα ανόργανα άλατα έχουν ένα ξεχωριστό πλεονέκτημα έναντι πολλών άλλων διαλυμένων ουσιών λόγω της ικανότητάς τους να διαλύονται σε περισσότερα από ένα ιόντα. Οι πρώτες πρώιμες ανόργανες διαλυμένες ουσίες που χρησιμοποιήθηκαν στην FO ήταν τα διαλυτά αέρια π.χ. το διοξείδιο του θείου, τα καθιζήσιμα άλατα π.χ. το θειικό αργίλιο, το θαλασσινό νερό και τα σάκχαρα π.χ. η φρουκτόζη, η σακχαρόζη και η γλυκόζη. Αυτές οι διαλυμένες ουσίες αφαιρούνταν μετά την ώσμωση μέσω θέρμανσης ή μέσω κατακρήμνισης - καθίζησης. Μερικές φορές βέβαια το κύριο διάλυμα προωθούνταν κατευθείαν μαζί με τις διαλυμένες ουσίες και ως κάποιο είδος ποτού (π.χ. αναψυκτικό). Επίσης, αρκετές φορές έχει χρησιμοποιηθεί και το χλωριούχο νάτριο ( $\text{NaCl}$ ) ως διαλυμένη ουσία λόγω του χαμηλού κόστους, της υψηλής διαλυτότητας, της χαμηλής τοξικότητας, της αφθονίας και της ευκολίας ανάκτησής του μέσω άλλων μεθόδων αφαλάτωσης όπως η απόσταξη. Το μειονέκτημα που υπάρχει εδώ, κατά την ανάκτηση, είναι η απόσταξη καθώς απαιτεί σημαντικά ποσά ενέργειας. Μετά από αρκετές μελέτες και έρευνες που έγιναν οι επιστήμονες κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι πιο κατάλληλες ανόργανες διαλυμένες ουσίες για την FO ήταν το χλωριούχο ασβέστιο ( $\text{CaCl}_2$ ), το διττανθρακικό κάλιο ( $\text{KHCO}_3$ ), το χλωριούχο μαγνήσιο ( $\text{MgCl}_2$ ), το θειικό μαγνήσιο ( $\text{MgSO}_4$ ), το διττανθρακικό νάτριο ( $\text{NaHCO}_3$ ), το χλωριούχο νάτριο ( $\text{NaCl}$ ) και το θειικό νάτριο ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

Νανοϋλικά:

Τα νανοϋλικά αναπτύχθηκαν σχετικά πρόσφατα ως ωσμωτικοί παράγοντες. Το μεγάλο μέγεθός τους, σε σχέση με τα υπόλοιπα στοιχεία που μπορεί να βρίσκονται σε ένα διάλυμα, καθιστά την ανάκτησή τους λιγότερο κοστοβόρα και μειώνει την πιθανότητα διέλευσής τους διαμέσου της μεμβράνης στο μέρος της τροφοδοσίας. Ένα πολύ ενδιαφέρον νανοσωματίδιο που έχει αναπτυχθεί ως ωσμωτικός παράγοντας βασίζεται στην μαγνητοφερρίνη. Μετά την FO, αυτά τα μαγνητικά νανοϋλικά αφαιρούνται από το υδατικό κύριο διάλυμα μέσω ενός μαγνητικού πεδίου. Σε αυτό το στάδιο όμως, είναι πιθανή και η εμφάνιση ορισμένων επιπλοκών όπως η αδυναμία συλλογής όλων των νανοσωματιδίων (κυρίως των



μικρότερων σε μέγεθος) του διαλύματος από το μαγνητικό πεδίο και η μη αναστρέψιμη συσσώρευση που θα προκύψει από την μαζική συλλογή των νανοσωματιδίων. Ο τρόπος αντιμετώπισης αυτών των δύο παραπάνω επιπλοκών, είναι η χρήση θερμικά ευαίσθητων μαγνητικών νανοσωματιδίων που θα διαχωρίζονται από το διάλυμα μέσω ενός μαγνητικού πεδίου χαμηλής και κατάλληλης έντασης και σε θερμοκρασία ανώτερη της χαμηλότερης κρίσιμης θερμοκρασίας του διαλύματος.

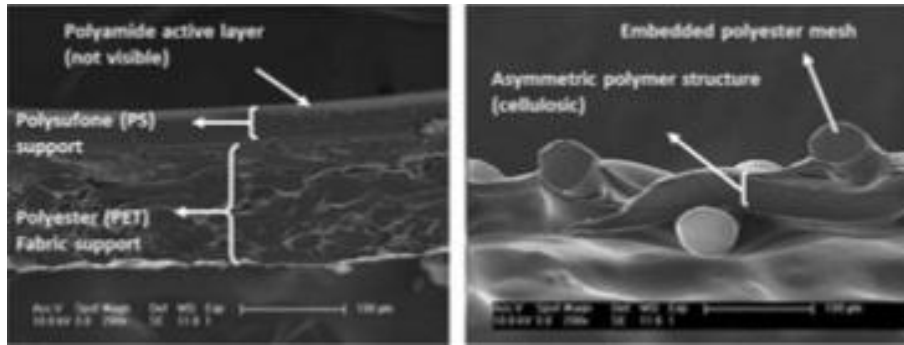
Οργανικές διαλυμένες ουσίες:

Οι οργανικές διαλυμένες ουσίες αποτελούν μια επιλογή υψηλής διαλυτότητας, παρά το γεγονός ότι δεν διασπώνται. Παραδείγματα τέτοιων οργανικών διαλυμένων ουσιών, που μπορούν να εφαρμοστούν στην FO, είναι η μεθανόλη, η αιθανόλη, η 2-βουτανόλη, η 2-προπανόλη και το οξικό μεθύλιο. Επίσης, για εφαρμογή στην FO έχουν προταθεί και οι διαλύτες εναλλασσόμενης πολικότητας (switchable polarity solvents, SPS). Οι SPS έχουν την δυνατότητα να εναλλάσσονται σε αναμειγμένες και μη φάσεις με το νερό, που εξαρτώνται από την παρουσία διοξειδίου του άνθρακα σε πιέσεις περιβάλλοντος. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι αυτοί οι διαλύτες παράγουν αξιοσημείωτες ωσμωτικές πιέσεις, απαιτούνται επιπλέον και μεμβράνες ανθεκτικές σε αυτούς. Πειράματα έχουν δείξει ότι οι SPS μπορεί να προκαλέσουν αλλοιώσεις στις μεμβράνες οξικής κυτταρίνης. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να χρησιμοποιηθούν άλλες μεμβράνες ή να αλλάξει η χημική δομή των SPS.

Εκτός από τα παραπάνω, υπάρχει και ο υβριδικός συνδυασμός οργανικών - ανόργανων πολυσθενών αλάτων από φωσφαζένιο. Το πλεονέκτημα αυτών των αλάτων ως ωσμωτικοί παράγοντες είναι η υδρολυτική σταθερότητα, η πολύχρηστη χημεία τους, η υψηλή διαλυτότητα και η ωσμωτική δυνατότητα. Το μόνο μειονέκτημα τους είναι η υδρόλυση που προκαλούν στις μεμβράνες οξικής κυτταρίνης. Επίσης, ως ωσμωτικοί παράγοντες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι πολυηλεκτρολύτες από άλατα νατρίου πολυακρυλικού οξέος. Τα πλεονεκτήματα των πολυηλεκτρολυτών είναι τα χαμηλά επίπεδα διαρροής, η ευκολία ανακύκλωσης και η προσαρμοστικότητα της δομής τους. Τα μειονεκτήματα είναι το υψηλό ιξώδες και η επακόλουθη αύξηση της πόλωσης συγκέντρωσης (καθαλάτωση στις μεμβράνες).

Μεμβράνες FO και «εσωτερική» πόλωση συγκέντρωσης:

Στην FO χρησιμοποιούνται ασύμμετρες μεμβράνες τριοξικής κυτταρίνης ενώ στην RO μεμβράνες σύνθετου λεπτού φιλμ με ένα στρώμα αρωματικού πολυαμιδίου (Εικ. 1.29). Οι ασύμμετρες μεμβράνες τριοξικής κυτταρίνης παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση ως προς την ωσμωτική ροή, ενώ οι μεμβράνες σύνθετου λεπτού φιλμ παρουσιάζουν υψηλότερη εκλεκτικότητα και διαπερατότητα. Ωστόσο, λόγω της υδραυλικής πίεσης που συνεπάγεται η RO, οι μεμβράνες σύνθετου λεπτού φιλμ εμφανίζουν μια εγγενή ευθραυστότητα και ευπάθεια, ειδικά στο στρώμα πολυαμιδίου. Για να καταπολεμηθεί αυτή η ευθραυστότητα, που προκύπτει από την υδραυλική πίεση, χρησιμοποιούνται διάφορα υποστηρικτικά στρώματα που παρέχουν μηχανική υποστήριξη και αντοχή. Στις ασύμμετρες μεμβράνες τριοξικής κυτταρίνης όμως, λόγω και της απουσίας υδραυλικής πίεσης, δεν υπάρχουν υποστηρικτικά στρώματα, αλλά ενσωματωμένα πλέγματα πολυεστέρα που επιτρέπουν στις ασύμμετρες μεμβράνες τριοξικής κυτταρίνης να γίνουν πολύ λεπτότερες αυτών της RO.



**Εικόνα 1.29:** (Από αριστερά στα δεξιά) Διατομή μεμβράνης πολυαμιδίου αντίστροφης ώσμωσης και μεμβράνης τριοξικής κυτταρίνης εμπρόσθιας ώσμωσης σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο

Στις μεμβράνες FO, από την μεριά της τροφοδοσίας, υπάρχει μια πορώδης και μη εκλεκτική δομή, διαμέσου της οποίας οι διαλυμένες ουσίες του διαλύματος της τροφοδοσίας διαχέονται για να φτάσουν στην εκλεκτική δομή της μεμβράνης. Καθώς το νερό διαπερνά την μη εκλεκτική δομή, οι διαλυμένες ουσίες που μεταφέρει διαλύονται εντός αυτής της δομής προκαλώντας την εμφάνιση του φαινομένου της «εσωτερικής» πόλωσης συγκέντρωσης (σε αυτήν την περίπτωση πόλωσης συγκέντρωσης, οι διαλυμένες ουσίες δεν κατακάθονται στην επιφάνεια της μεμβράνης αλλά συνωστίζονται στην εσωτερική της δομή). Το παραπάνω φαινόμενο προκαλείται από τον παρεμπόδισμό ανάμειξης και αναπλήρωσης μέσω διάχυσης λόγω των στρεβλώσεων του υλικού, της ελικοειδούς δομής και της χαμηλής πορωδικότητας. Το φαινόμενο αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό για την FO, καθώς προκαλεί μείωση της ωσμωτική πίεσης και συνεπώς της ροής. Ο τρόπος αντιμετώπισης του φαινομένου είναι η αύξηση της διάχυσης μέσω ωσμωτικών παραγόντων που θα αυξήσουν την ωσμωτική πίεση ή η αλλαγή των ιδιοτήτων της μη εκλεκτικής δομής, δηλαδή μείωση του πάχους. Εδώ, σημαντικό ρόλο παίζει η δομική παράμετρος  $S$  που εκφράζει την ειδική δομική αντίσταση της μεμβράνης στην διάχυση. Η δομική παράμετρος ουσιαστικά, εκφράζει την μέση απόσταση διάχυσης ενός μορίου διαλυμένης ουσίας, πριν φτάσει την εκλεκτική δομή και δίνεται από την εξ. 1.87.

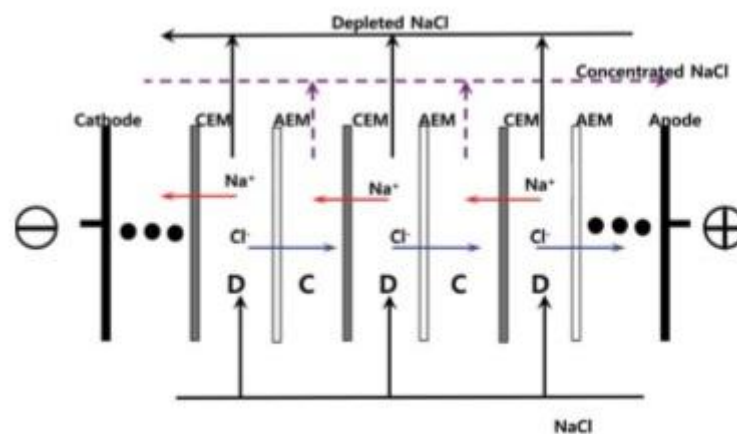
$$S = \frac{t \cdot \tau}{\varepsilon} \quad (1.87)$$

Όπου  $\varepsilon$  είναι η πορωδικότητα,  $\tau$  είναι ο βαθμός στρέβλωσης και  $t$  είναι το πάχος. Το κλειδί για την μείωση της εσωτερικής πόλωσης συγκέντρωσης και την μεγιστοποίηση της ροής είναι η μείωση της δομικής παραμέτρου, μέσω της μείωσης του πάχους και του βαθμού στρέβλωσης και μέσω της αύξησης της πορωδικότητας.

#### 1.2.2.4 Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis, ED)

Η ED είναι μια ιοντοανταλλακτική μέθοδος μεμβρανών που χρησιμοποιεί την ηλεκτρική ενέργεια ως κινητήρια δύναμη της διαδικασίας. Το σύστημα αποτελείται από μια διάταξη κυψελών σε μια σειρά από ιοντοανταλλακτικές μεμβράνες εναλλασσόμενων ανιόντων και κατιόντων, ανάμεσα σε μια άνοδο και μια κάθοδο, που σχηματίζουν ξεχωριστές κυψέλες ανά δύο γειτονικές μεμβράνες. Μια συσκευή ED αποτελείται από ζεύγη ξεχωριστών κυψελών, σε εναλλασσόμενες σειρές με ηλεκτρόδια και στα δύο άκρα. Όταν ένα αλατώδες υδατικό διάλυμα κυκλοφορεί σε μια

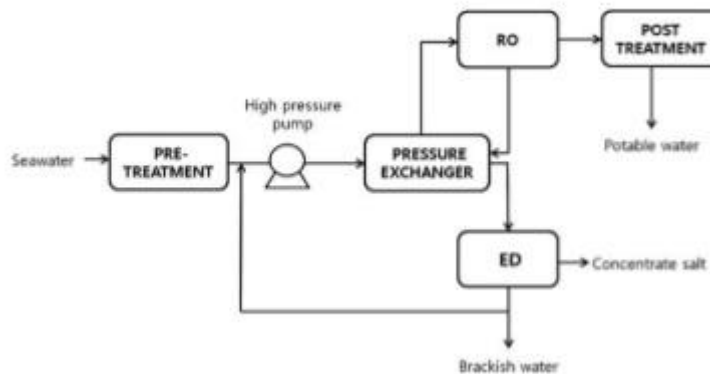
κυψέλη υπό ηλεκτρικό δυναμικό, τα κατιόντα (θετικά φορτισμένα ιόντα) μεταναστεύουν μέσω μιας ιοντοανταλλακτικής μεμβράνης κατιόντων προς την κάθοδο και τα ανιόντα (αρνητικά φορτισμένα ιόντα) μέσω μιας ιοντοανταλλακτικής μεμβράνης ανιόντων προς την άνοδο. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι μια πτώση δυναμικού στα ζεύγη κυψελών καθώς επίσης και μια μεταβολή στην συγκέντρωση των ιόντων στα εναλλασσόμενα τμήματα. Η ED έχει επιμέρους τμήματα για το «απεμπλουτισμένο» αραιωμένο διάλυμα και για το συμπυκνωμένο «εμπλουτισμένο» διάλυμα. Το κάθε «τεμάχιο» ED αποτελείται από ένα τμήμα για το αραιωμένο διάλυμα, ένα τμήμα για το συμπυκνωμένο, μια ιοντοανταλλακτική μεμβράνη κατιόντων και μια ιοντοανταλλακτική μεμβράνη ανιόντων (Εικ. 1.30).



**Εικόνα 1.30:** Διάταξη Ηλεκτροδιάλυσης (CEM: Ιοντοανταλλακτική μεμβράνη κατιόντων, AEM: Ιοντοανταλλακτική μεμβράνη ανιόντων, D: Τμήμα αραιωμένου διαλύματος, C: Τμήμα συμπυκνωμένου διαλύματος).

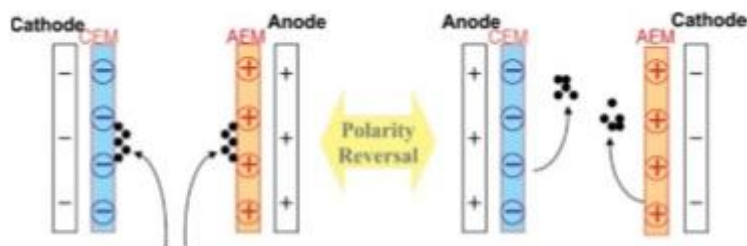
Η ED αναπτύχθηκε αρχικά για την αφαλάτωση υφάλμυρων υδάτων, με σκοπό την παραγωγή πόσιμου νερού και την λειτουργία σε εφαρμογές ευρείας κλίμακας. Μια τέτοια εφαρμογή ευρείας κλίμακας είναι η συγκέντρωση θαλασσινού νερού για την παραγωγή μαγειρικού άλατος. Η ED αποτελεί μια ώριμη μέθοδο αφαλάτωσης, λόγω της τεχνολογικής ανάπτυξης και εξέλιξης της διαδικασίας και των ιοντοανταλλακτικών μεμβρανών. Η εγκατάσταση της μεθόδου γίνεται σε μονάδες μικρού έως μεσαίου μεγέθους με παραγωγική ικανότητα που ποικίλλει από 100 m<sup>3</sup>/ημ. μέχρι και άνω των 20,000 m<sup>3</sup>/ημ. και με αλατότητα από 1,000 - 5,000 mg/lit TDS (υφάλμυρα ύδατα). Ανάμεσα στις μεθόδους μεμβρανών, η RO έχει κυρίαρχη θέση και θεωρείται ότι παρουσιάζει ένα οικονομικό πλεονέκτημα στην αφαλάτωση υδάτων με TDS > 10,000 mg/lit. Στην αφαλάτωση υφάλμυρων υδάτων όμως, η ED «ανταγωνίζεται» την RO και αποδεικνύεται εφάμιλλη της. Για ένα συγκεκριμένο εύρος συγκέντρωσης αλάτων των υδάτων τροφοδοσίας, η ED παρουσιάζει και αυτή οικονομικά πλεονεκτήματα έναντι της RO και των υπολοίπων μεθόδων. Αυτά τα πλεονεκτήματα είναι ο υψηλός ρυθμός ανάκτησης νερού, η μεγάλη διάρκεια ζωής των μεμβρανών λόγω της υψηλής χημικής και μηχανικής σταθερότητας, τα μειωμένα επίπεδα ρύπανσης και καθαλάτωσης των μεμβρανών, οι μειωμένες απαιτήσεις προεπεξεργασίας του νερού τροφοδοσίας, η λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες και η ευελιξία και προσαρμοστικότητα της μεθόδου ως προς την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις γίνεται και ο συνδυασμός της

μεθόδου της ED με άλλες μεθόδους, όπως στην Εικ. 1.31, όπου φαίνεται η σύζευξη των μεθόδων της ED και της RO για την παραγωγή πόσιμου νερού αλλά και μαγειρικού άλατος.



**Εικόνα 1.31:** Διάταξη σύζευξης ηλεκτροδιάλυσης - αντίστροφης ώσμωσης

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί και η αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση (electrodialysis reversal, EDR), η οποία όχι μόνο δεν αποτελεί ξεχωριστή μέθοδο, αλλά ουσιαστικά πρόκειται και για την πιο γνωστή, μάλλον, διαδικασία καθαρισμού των συστημάτων ED (Εικ. 1.32). Κατά την EDR, γίνεται αντίστροφη της πολικότητας (και της ροής μερικές φορές), έχοντας ως άμεση συνέπεια την απώθηση και απομάκρυνση των φορτισμένων ιόντων του διαλύματος της τροφοδοσίας από τις επιφάνειες των ιοντοανταλλακτικών μεμβρανών, λόγω του νέου εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Η EDR λαμβάνει χώρα περιοδικά και αυτόματα 3 - 4 φορές ανά ώρα λειτουργίας και για 15 - 20 λεπτά, με την εναλλαγή των ροών του αραιωμένου και του συμπυκνωμένου διαλύματος και χωρίς απαραίτητα την προσθήκη χημικών.



**Εικόνα 1.32:** Διαδικασία καθαρισμού με αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση

Ιοντοανταλλακτικές μεμβράνες:

Η ανάπτυξη της ED διευκολύνθηκε από την ανάπτυξη ιοντοανταλλακτικών μεμβρανών με καλύτερη εκλεκτικότητα, χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση και βελτιωμένες θερμικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητες. Η τεχνική εφαρμοσιμότητα της ED ως διαδικασία διαχωρισμού, καθορίζεται πρωτίστως από τις ιοντοανταλλακτικές μεμβράνες που χρησιμοποιούνται στο σύστημα. Οι πιο επιθυμητές ιδιότητες των ιοντοανταλλακτικών μεμβρανών είναι η υψηλή διαπερατοεκλεκτικότητα, η χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση, η καλή μηχανική σταθερότητα και η υψηλή χημική και θερμική σταθερότητα. Οι ιοντοανταλλακτικές μεμβράνες κατηγοριοποιούνται σε αυτές των

ανιόντων και αυτές των κατιόντων, ανάλογα με τους τύπους των ιοντικών και φορτισμένων ομάδων που είναι προσκολλημένες στην μήτρα της μεμβράνης. Οι προσκολλημένες και φορτισμένες ιοντικές ομάδες, αποκλείουν τμηματικά ή ολοκληρωτικά την προσκόλληση των ιόντων ίδιου φορτίου (συν-ιόντα) στην μεμβράνη. Μια ιοντοανταλλακτική μεμβράνη ανιόντων με προσκολλημένες θετικά φορτισμένες ιοντικές ομάδες ( $-\text{NH}_3^+$ ,  $-\text{NRH}_2^+$ ,  $-\text{NR}_2\text{H}^+$ ,  $-\text{NR}_3^+$ ,  $-\text{PR}_3^+$ ,  $-\text{SR}_2^+$ ), αποκλείουν τα θετικά φορτισμένα ιόντα αλλά επιτρέπουν την ελεύθερη διέλευση των αρνητικά φορτισμένων ιόντων (αντι-ιόντα). Μια ιοντοανταλλακτική μεμβράνη κατιόντων με προσκολλημένες αρνητικά φορτισμένες ιοντικές ομάδες ( $-\text{SO}_3^-$ ,  $-\text{COO}^-$ ,  $-\text{PO}_3^{2-}$ ,  $-\text{PO}_3\text{H}^-$ ,  $-\text{C}_6\text{H}_4\text{O}^-$ ), αποκλείουν τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα αλλά επιτρέπουν την ελεύθερη διέλευση των θετικά φορτισμένων ιόντων.

Οι ιοντοανταλλακτικές μεμβράνες χωρίζονται σε ομοιογενείς και ετερογενείς. Οι ομοιογενείς μεμβράνες είναι αυτές που προκύπτουν, είτε από τον πολυμερισμό μονομερών που έχουν λειτουργικές ομάδες είτε από την επιπρόσθετη λειτουργικότητα ενός πολυμερούς φιλμ που εμπεριέχει δομές ενδοπολυμερών και συμπολυμερών. Υπάρχουν ποικίλοι διαθέσιμοι τρόποι παρασκευής ομοιογενών μεμβρανών μέσω της εισαγωγής ιοντικών ομάδων. Αυτοί οι τρόποι παρασκευής υπάγονται σε τρεις κατηγορίες βάσει της πρώτης ύλης. Στην πρώτη κατηγορία είναι η παρασκευή ομοιογενών μεμβρανών μέσω μονομερών που εμπεριέχουν ιοντικές ανταλλακτικές ομάδες, στην δεύτερη κατηγορία είναι η παρασκευή μέσω ενός πολυμερούς φιλμ που τροποποιείται από την εισαγωγή ιοντικών στοιχείων είτε άμεσα με την τοποθέτηση ενός λειτουργικού μονομερούς είτε έμμεσα με την τοποθέτηση ενός μη λειτουργικού μονομερούς ακολουθούμενο από την αντίδραση λειτουργικοποίησης και στην τρίτη κατηγορία είναι η παρασκευή μέσω πολυμερών μειγμάτων που δημιουργούνται από την εισαγωγή ιοντικών ομάδων και ακολουθούνται από την διάσπαση και τοποθέτηση των πολυμερών σε φιλμ. Πολλές ιοντοανταλλακτικές (ομοιογενείς) μεμβράνες έχουν παρασκευαστεί με συγκεκριμένες ιδιότητες για συγκεκριμένες εφαρμογές. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι η παρασκευή εκλεκτικών μεμβρανών για την παραγωγή μαγειρικού άλατος από θαλασσινό νερό μέσω της συγκέντρωσης μονοσθενών ιόντων (π.χ.  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$ ), η παρασκευή μιας μεμβράνης φθοράνθρακα με εξαιρετική χημική και θερμική σταθερότητα για την εφαρμογή σε περιβάλλον οξειδωτικών παραγόντων και αυξημένης θερμοκρασίας, η παρασκευή ιοντοανταλλακτικών μεμβρανών ανιόντων με υψηλή κατακράτηση και χαμηλή διαπερατότητα πρωτονίων και ειδικά η παρασκευή ιοντοανταλλακτικών μεμβρανών ανιόντων με χαμηλή ροπή και τάση για ρύπανση (όντας πιο ευαίσθητες στην ρύπανση).

Οι ετερογενείς μεμβράνες γενικά αποτελούνται από λεπτές κολλοειδείς ιοντοανταλλακτικές ρητίνες που είναι ενσωματωμένες σε ένα αδρανές συνδετικό υλικό όπως το πολυαιθυλένιο, οι ρητίνες φαινόλης και το πολυβινυλοχλωρίδιο. Οι ετερογενείς μεμβράνες παράγονται με την συμπίεση ιοντοανταλλακτικών ρητινών σε ένα αδρανές πλαστικό φιλμ. Ένας άλλος τρόπος παραγωγής είναι η ανάμειξη αδρανών πολυμερών (με δομές φιλμ) και ιοντοανταλλακτικών ρητινών. Οι ιοντοανταλλακτικές ρητίνες διασκορπίζονται σε ένα διάλυμα που περιέχει ένα συνδετικό υλικό με δομή τύπου φιλμ και τότε, ο διαλύτης εξατμίζεται για τον σχηματισμό ιοντοανταλλακτικών μεμβρανών. Επίσης, η παραγωγή ετερογενών μεμβρανών μπορεί να γίνει και με την διάλυση ιοντοανταλλακτικών μεμβρανών σε ένα διάλυμα που περιέχει μερικώς πολυμερισμένα συνδετικά πολυμερή. Εκτός όμως από τις ομοιογενείς και τις ετερογενείς μεμβράνες, υπάρχουν και αυτές που προκύπτουν από ανόργανα υλικά όπως ο ζεόλιθος, ο μπεντονίτης και τα φωσφορικά

άλατα. Επιπλέον, ο συνδυασμός ανόργανων - οργανικών υλικών σε σύνθετα υλικά, π.χ. οι υβριδικές ανόργανες - οργανικές ιοντοανταλλακτικές μεμβράνες, προσφέρει εξαιρετικές ιδιότητες για ειδικές εφαρμογές.

#### 1.2.2.5 Συνεχής ηλεκτρικός απιονισμός (*Continuous Electrodeionization, CEDI*)

Ο ηλεκτρικός απιονισμός (EDI) είναι μια διαδικασία που αφαιρεί τα ιονιζόμενα είδη από υγρά χρησιμοποιώντας ενεργά ηλεκτρικά μέσα και ένα ηλεκτρικό δυναμικό για την απόδοση της μεταφοράς των ιόντων. Τα ενεργά ηλεκτρικά μέσα στις συσκευές του EDI μπορεί να λειτουργήσουν εναλλακτικά για την συλλογή και απόρριψη των ιονιζομένων ειδών ή για την διευκόλυνση της μεταφοράς των ιόντων συνεχόμενα μέσω ιοντικών ή ηλεκτρικών μηχανισμών αντικατάστασης. Οι συσκευές EDI μπορεί να περιλαμβάνουν μέσα μόνιμης ή προσωρινής φόρτισης και μπορούν να λειτουργούν κατά παρτίδες, διακεκομμένα ή συνεχόμενα.

Ο CEDI, που είναι υποσύνολο του EDI, διαχωρίζεται από τις διαδικασίες συλλογής/απόρριψης του EDI (όπως η ηλεκτροχημική ιοντοανταλλαγή (electrochemical ion exchange) ή ο χωρητικός απιονισμός (capacitive deionization)), στις οποίες η απόδοση του CEDI καθορίζεται από τις ιδιότητες ιοντικής μεταφοράς των ενεργών μέσων και όχι από την ιοντική χωρητικότητα των μέσων. Οι συσκευές CEDI τυπικά περιέχουν ημιπερατές ιοντοανταλλακτικές μεμβράνες και μόνιμα φορτισμένα μέσα, όπως οι ιοντοανταλλακτικές ρητίνες. Η μέθοδος CEDI είναι ουσιαστικά η υβριδική ένωση δύο ήδη πολύ γνωστών μεθόδων διαχωρισμού, του ιοντοανταλλακτικού απιονισμού και της ηλεκτροδιάλυσης και μερικές φορές αναφέρεται και ως ηλεκτροδιάλυση πληρωμένων κυψελών. Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή του CEDI είναι κατά το μετέπειτα στάδιο απομετάλλωσης της RO για την παραγωγή νερού υψηλής καθαρότητας, ως εναλλακτική λύση του συμβατικού και χημικού απιονισμού βάσει ρητινών. Τα συστήματα CEDI εξαλείφουν την ανάγκη χρήσης επιζήμιων οξέων και καυστικών χημικών και αντί αυτών, χρησιμοποιούν μικρές ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα τυπικό σύστημα CEDI χρησιμοποιεί περίπου 0.3 kWh για τον απιονισμό 1 m<sup>3</sup> νερού και επιπλέον, το διάλυμα του συμπυκνώματος που θα προκύψει μπορεί να απορριφθεί χωρίς επεξεργασία ή να χρησιμοποιηθεί σε κάποια άλλη διαδικασία. Κατά κύριο λόγο, η απαλοιφή της ανάγκης χρήσης χημικών θεωρείται επωφελής, αλλά τα χημικά προσφέρουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα. Στην συμβατική απομετάλλωση, τα οξέα και οι καυστικές ουσίες τυπικά εφαρμόζονται στις ιοντοανταλλακτικές ρητίνες σε συγκεντρώσεις 2% - 8% κατά βάρος. Σε αυτές τις συγκεντρώσεις τα χημικά προκαλούν, όχι μόνο την αναγέννηση των ρητινών αλλά και τον καθαρισμό τους. Η ηλεκτροχημική αναγέννηση που συμβαίνει σε μια συσκευή CEDI, δεν παρέχει το ίδιο επίπεδο καθαρισμού των ρητινών και για αυτόν τον λόγο, είναι ακόμα πιο αναγκαία η κατάλληλη προεπεξεργασία για την αποφυγή της ρύπανσης. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους που η RO εφαρμόζεται συνήθως πριν από το σύστημα CEDI.

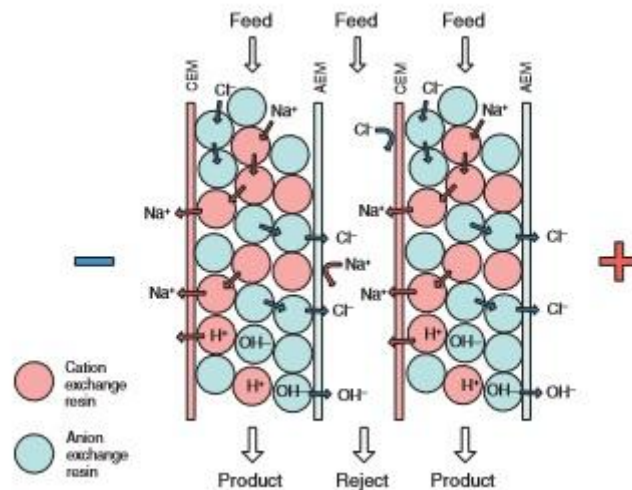
Επισκόπηση της μεθόδου:

Μια τυπική συσκευή CEDI περιέχει εναλλασσόμενες ιοντοανταλλακτικές μεμβράνες ανιόντων (anion exchange membranes, AEM) και κατιόντων (cation exchange membranes, CEM), εκλεκτικής διαπερατότητας. Τα χωρικά διαστήματα ανάμεσα στις μεμβράνες διαμορφώνονται κατάλληλα, ώστε να δημιουργούνται τμήματα ροής του υγρού με εισόδους και εξόδους. Ένα εγκάρσιο ηλεκτρικό πεδίο συνεχούς ρεύματος εφαρμόζεται από μια εξωτερική πηγή ισχύος, χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια στα άκρα των μεμβρανών και των τμημάτων, όπως φαίνεται και στην Εικόνα. Όταν τα τμήματα υπόκεινται σε ηλεκτρικό πεδίο, τα ιόντα του υγρού έλκονται από το αντίθετα φορτισμένο ηλεκτρόδιο. Το αποτέλεσμα είναι ότι τα τμήματα, που

δεσμεύονται από την μεμβράνη ανιόντων και στρέφονται προς την άνοδο και εκείνα της μεμβράνης κατιόντων που στρέφονται προς την κάθοδο, στερεύουν από ιόντα και καλούνται έτσι τμήματα αραίωσης ή εξασθένισης. Στην συνέχεια, τα τμήματα που δεσμεύονται από την μεμβράνη ανιόντων που στρέφεται προς την κάθοδο και εκείνα της μεμβράνης κατιόντων που στρέφεται προς την άνοδο, θα παγιδεύσουν τα ιόντα που έχουν μεταφερθεί από τα τμήματα αραίωσης. Επειδή η συγκέντρωση των ιόντων σε αυτά τα τμήματα αυξάνεται ανάλογα με την τροφοδοσία, η ροή του νερού διαμέσου αυτών αναφέρεται ως ροή συμπυκνώματος ή απόρριψης και τα ίδια τα τμήματα καλούνται τμήματα συγκέντρωσης ή συμπύκνωσης. Σε μια συσκευή CEDI, ο χώρος εντός των τμημάτων αραίωσης (και μερικές φορές και των τμημάτων συγκέντρωσης), καλύπτεται από ηλεκτρικά ενεργά μέσα όπως οι ιοντοανταλλακτικές ρητίνες. Οι ιοντοανταλλακτικές ρητίνες ενισχύουν την μεταφορά ιόντων και μπορούν επίσης να συμμετέχουν ως υποστρώματα για ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, όπως η διάσπαση του νερού σε κατιόντα υδρογόνου και ανιόντα υδροξυλίου.

Μηχανισμοί αφαίρεσης ιόντων:

Υπάρχουν δύο ξεχωριστές λειτουργίες για τις συσκευές CEDI, η επαυξημένη μεταφορά και η ηλεκτρική αναζωογόνηση. Κατά την επαυξημένη μεταφορά, οι ρητίνες εντός της συσκευής παραμένουν υπό την μορφή αλάτων. Στα διαλύματα χαμηλής αγωγιμότητας, οι ιοντοανταλλακτικές ρητίνες σε τάξεις μεγέθους, είναι πιο αγωγίμες από τα διαλύματα και δρουν ως μέσα για την μεταφορά ιόντων μέσα από τα τμήματα, προς την επιφάνεια των ιοντοανταλλακτικών μεμβρανών. Αυτή η λειτουργία απόρριψης ιόντων εφαρμόζεται μόνο στις συσκευές που επιτρέπουν ταυτόχρονα την απόρριψη ανιόντων και κατιόντων, με σκοπό την διατήρηση της ηλεκτρικής ουδετερότητας. Η δεύτερη λειτουργία της ηλεκτρικής αναζωογόνησης, χαρακτηρίζεται από την συνεχή αναγέννηση των ρητινών από τα ηλεκτρικά παραγόμενα ιόντα υδρογόνου και υδροξειδίου. Η διάσπαση του νερού συμβαίνει κατά προτίμηση στις διπολικές διεπαφές των τμημάτων αραίωσης όπου είναι πιο πιθανό να εμφανιστούν τοπικά συνθήκες χαμηλής συγκέντρωσης διαλυμένων ουσιών. Οι δύο κύριοι τύποι διεπαφών στις συσκευές CEDI είναι ρητίνης - ρητίνης και ρητίνης - μεμβράνης. Η βέλτιστη τοποθεσία για την διάσπαση του νερού εξαρτάται από την διαμόρφωση της ρητίνης πλήρωσης. Η ανάπλαση των ρητινών στις μορφές των κατιόντων υδρογόνου και των ανιόντων υδροξειδίου επιτρέπει στις συσκευές CEDI, την απομάκρυνση των ασθενώς ιονισμένων χημικών ενώσεων (όπως τα ανθρακικά και τα πυριτικά οξέα) και την απομάκρυνση των ασθενώς ιονισμένων οργανικών χημικών ενώσεων. Αυτή η λειτουργία απομάκρυνσης ιόντων συμβαίνει σε όλες τις συσκευές CEDI που παράγουν υπερ-καθαρό νερό. Η Εικ. 1.33 δείχνει μια αναπαράσταση της διαδικασίας, με δύο τμήματα αραίωσης μαζί με την μεταφορά των ιόντων και την ηλεκτρική αναζωογόνηση των ιοντοανταλλακτικών ρητινών σε μια κυψέλη CEDI.



Εικόνα 1.33: Μεταφορά ιόντων και ηλεκτρική αναζωογόνηση των ρητινών μιας κυψέλης CEDI.

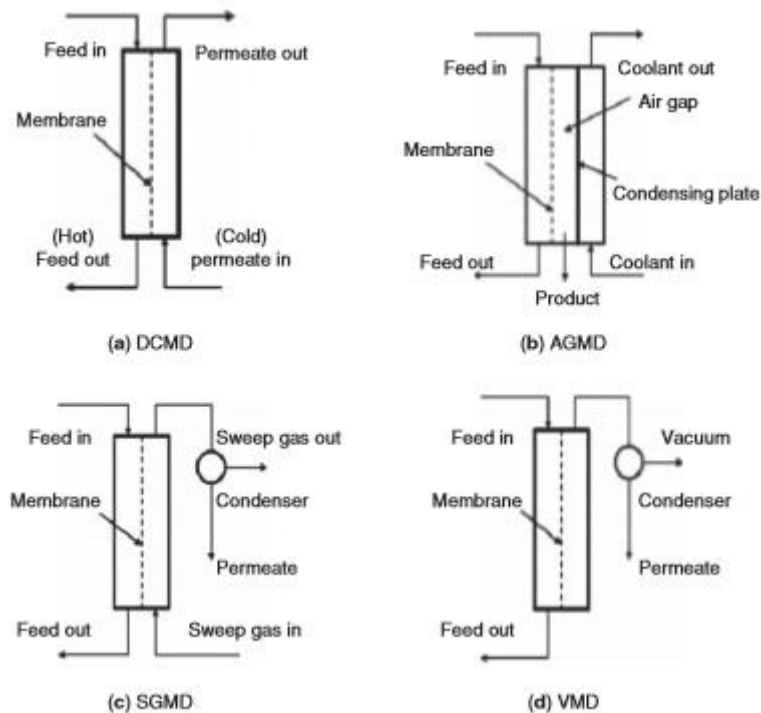
#### 1.2.2.6 Απόσταξη μεμβρανών (membrane distillation, MD)

Η MD είναι μια μέθοδος επεξεργασίας νερού, που οδηγείται από μια θερμοκρασιακή διαβάθμιση διαμέσου μιας μικροπορώδους και υδρόφοβης μεμβράνης, ανάμεσα σε ένα ζεστό διάλυμα τροφοδοσίας και ένα κρύο διάλυμα διήθησης. Περιλαμβάνει μια ταυτόχρονη μεταφορά μάζας και θερμότητας όπως η εξάτμιση των μορίων του νερού στην διεπαφή υψηλής θερμοκρασίας, η μεταφορά των υδρατμών μέσα από την πορώδη μεμβράνη και η συμπύκνωση των υδρατμών στην ψυχρή διεπιφάνεια. Η MD είναι μια ευοίωνη μέθοδος αφαλάτωσης νερού λόγω αρκετών πλεονεκτημάτων όπως η χαμηλή ευαισθησία στην συγκέντρωση αλάτων και η θεωρητική απόρριψη 100% αυτών, η εφικτότητα και η δυνατότητα χρήσης χαμηλής ποιότητας θερμότητας και ανανεώσιμης ενέργειας (π.χ. η βιομηχανική απόβλητη θερμότητα, η ηλιακή και γεωθερμική ενέργεια), η χαμηλή ευπάθεια των μεμβρανών ως προς την ρύπανση, το χαμηλό κόστος εξοπλισμού και η καλή απόδοση υπό ήπιες συνθήκες λειτουργίας σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους απόσταξης όπως η MSF ή τις μεθόδους που χρησιμοποιούν πίεση αντί για θερμότητα ως κινητήρια δύναμη όπως η RO και τέλος, η ευελιξία και η προσαρμοστικότητα όσον αφορά την εφαρμογή διαφορετικών διαμορφώσεων MD για ειδικές περιπτώσεις με συγκεκριμένες απαιτήσεις.

Οι τέσσερις κύριες διαμορφώσεις MD (Εικ. 1.34) είναι η απόσταξη μεμβρανών άμεσης επαφής (direct contact membrane distillation, DCMD), η απόσταξη μεμβρανών κενού (vacuum membrane distillation, VMD), η απόσταξη μεμβρανών κενού αέρος (air gap membrane distillation, AGMD) και η απόσταξη μεμβρανών αερίου σάρωσης (sweeping gas membrane distillation, SGMD). Ωστόσο, παρόλα τα πλεονεκτήματα της μεθόδου, η MD έχει κερδίσει λίγη αποδοχή και δεν έχει εφαρμοστεί ακόμα πλήρως σε βιομηχανικό επίπεδο. Οι πιθανές προκλήσεις που παρεμποδίζουν την εφαρμογή της περιλαμβάνουν την ανάπτυξη κατάλληλων μεμβρανών για την αποφυγή της ύγρανσης των πόρων, την αύξηση του ρυθμού διαπερατότητας, την άμβλυση της κακής και άνιση κατανομής, την μείωση των ανεπαρκών υδροδυναμικών διατάξεων και την αξιολόγηση και εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας και του κόστους παραγωγής του νερού βάσει αξιόπιστων προτύπων. Επίσης, έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για την σταδιακή υπερνίκηση



των παραπάνω προκλήσεων και την ευρεία χρησιμοποίηση αυτής της εναλλακτικής μεθόδου. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί, ότι έχουν διερευνηθεί και καινούργιοι τύποι διαμορφώσεων π.χ. η MD που τροφοδοτείται με ηλιακή ενέργεια (solar powered membrane distillation, SPMD) και η MD με ενσωματωμένα συστήματα RO (integrated reverse osmosis membrane distillation, ROMD), που ενισχύουν την θερμική απόδοση μέσω της ανάκτησης θερμότητας και επιτυγχάνουν μεγαλύτερους βαθμούς διαχωρισμού μέσω της ενσωμάτωσης διαφόρων συστημάτων.



**Εικόνα 1.34:** Διαμορφώσεις απόσταξης μεμβρανών

Σχεδιασμοί και διαμορφώσεις απόσταξης μεμβρανών:

Οι μέθοδοι διαχωρισμού βάσει μεμβρανών έχουν βρει πληθώρα εφαρμογών σε ποικίλα πεδία. Αυτή η ανάπτυξη οφείλεται κυρίως σε δύο παράγοντες, στην ικανότητα παραγωγής μεμβρανών υψηλής διαπερατότητας χωρίς ελαττώματα σε μεγάλη κλίμακα και στην ικανότητα διασύνδεσης - συναρμολόγησης αυτών των μεμβρανών σε συμπαγείς, αποτελεσματικές και οικονομικές διαμορφώσεις με μεγάλες επιφάνειες επαφής. Κατά την MD, από την μια πλευρά υπάρχει ένα υδατικό διάλυμα τροφοδοσίας που θερμαίνεται και μεταφέρεται στην επιφάνεια μιας υδρόφοβης και πορώδους μεμβράνης, η οποία δρα ως φυσική διεπαφή ανάμεσα στις ροές υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας. Η υδροφοβική ιδιότητα της μεμβράνης βοηθάει στην αποτροπή της διείσδυσης του νερού στους πόρους της μεμβράνης, ενώ παράλληλα επιτρέπει μόνο στους υδρατμούς να διέλθουν μέσα από αυτήν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την δημιουργία ενός ισοζυγίου ύδατος - ατμού στην είσοδο του κάθε πόρου. Για την άλλη πλευρά τώρα, υπάρχει ποικιλία προσεγγίσεων όσον αφορά τον ατμό ή την συλλογή του αποστάγματος, υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την επιβολή μιας κινητήριας δύναμης (όπως η διαφορά πίεσης) σε όλη την έκταση της μήτρας της μεμβράνης για την δημιουργία ροής.

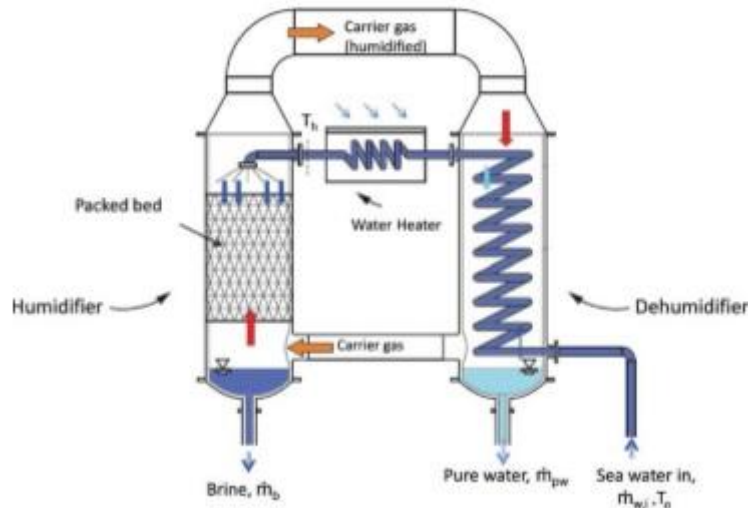
Η εισαγωγή της MD ξεκίνησε με την απόσταση μεμβρανών άμεσης επαφής DCMD, όπου οι υδατικές ροές υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας είναι σε άμεση επαφή με την επιφάνεια της μεμβράνης. Η διαδικασία επιπλέον είναι απλή και έχει τις λιγότερες απαιτήσεις σε εξοπλισμό. Η διαβάθμιση της πίεσης ατμών που προκαλείται από την διαφορά θερμοκρασίας στην μεμβράνη, οδηγεί τους υδρατμούς από την πλευρά της τροφοδοσίας υψηλής θερμοκρασίας μέσα από τους πόρους στην πλευρά χαμηλής θερμοκρασίας, όπου γίνεται η συμπύκνωση τους. Στην απόσταση μεμβρανών κενού αέρος AGMD, οι υδρατμοί διέρχονται μέσα από τους πόρους της μεμβράνης στην άλλη πλευρά και διαχέονται μέσω ενός κενού στρώματος αέρα σε μια κρύα επιφάνεια, όπου και συμπυκνώνονται. Η διαστρωμάτωση κενού αέρος ανάμεσα στην μεμβράνη και το αποσταγμένο νερό παρέχει υψηλή θερμομονωτική προστασία, έτσι ώστε οι απώλειες θερμότητας λόγω αγωγιμότητας να είναι μειωμένες σε μεγάλο βαθμό. Ωστόσο, η παρουσία του κενού στρώματος αέρα αυξάνει την αντίσταση ως προς την μεταφορά μάζας και θερμότητας και συνεπώς καταλήγει σε ελάττωση των ροών διαπερατότητας. Στην απόσταση μεμβρανών αερίου σάρωσης SGMD, το αέριο σάρωσης μεταφέρει τον ατμό έξω από τον θάλαμο, όπου και ψύχεται. Η ιδέα πίσω από την απόσταση μεμβρανών κενού VMD είναι η μείωση της απόλυτης πίεσης στα χαμηλότερα επίπεδα της μεμβράνης μέσω της επιβολής κενού που εγκαθιστά την διαφορά πίεσης. Η VMD επίσης ξεπερνά το πρόβλημα της αντίστασης του αέρα ως προς την μεταφορά.

Γενικά, η DCMD είναι η πιο απλή διαμόρφωση, αυτή που έχει μελετηθεί σε μεγαλύτερο βαθμό και επιπλέον για την λειτουργία της δεν απαιτείται η χρήση εξωτερικού συμπυκνωτή όπως π.χ. στην VMD και την SGMD, που είναι οι λιγότερο μελετημένες διαμορφώσεις λόγω του κόστους του εξοπλισμού και της πολυπλοκότητας του συστήματος. Ωστόσο, παρά τις ελάχιστες διαφορές των ροών συλλογής των διαφόρων διαμορφώσεων, η ίδια η μεμβράνη παίζει έναν αμελητέο ρόλο ως προς την εκλεκτικότητα διαφόρων ειδών, όταν δεν υπάρχουν βέβαια ακραίες συνθήκες κατά τις οποίες οι πόροι της μεμβράνης έχουν μικρότερο μέγεθος από την μέση ελεύθερη διαδρομή των διαχεόντων μορίων. Στην τελευταία περίπτωση, η μεμβράνη λειτουργεί ως κόσκινο. Ευτυχώς, τα περισσότερα σταθερά και μη πτητικά σωματίδια όπως τα ιόντα, τα μακρομόρια, τα κολλοειδή σωματίδια κ.ά. απορρίπτονται θεωρητικά σε ποσοστό 100% κατά την MD.

### 1.2.3 Υπόλοιπες μέθοδοι

#### 1.2.3.1 Υγροποίηση - αφυγροποίηση (*Humidification - Dehumidification, HDH*)

Η φύση χρησιμοποιεί τον ατμοσφαιρικό αέρα ως αέριο μεταφοράς για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού μέσω του κύκλου του νερού (βροχή). Στον κύκλο του νερού, το θαλασσινό νερό θερμαίνεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας και εξατμίζεται στον αέρα. Στην συνέχεια, αυτή η αέρια μάζα υδρατμών σχηματίζει σύννεφα που αργότερα υγροποιούνται μέσω της βροχής. Η ανθρώπινη εκδοχή του κύκλου του νερού είναι η αφαλάτωση με HDH. Μια απλή διάταξη HDH φαίνεται στην Εικ. 1.35. Ο κύκλος αποτελείται από τρία υποσυστήματα. Το πρώτο είναι ο θερμαντήρας θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού (και κάποιες φορές του αερίου μεταφοράς), που μπορεί να χρησιμοποιήσει ενέργεια διαφόρων μορφών όπως η ηλιακή, η θερμική, η γεωθερμική κ.α. Το δεύτερο είναι ο υγραντήρας ή εξατμιστήρας και το τρίτο είναι ο αφυγραντήρας ή συμπυκνωτής.



**Εικόνα 1.35:** Διάταξη Υγροποίησης - Αφυγροποίησης (χωρίς θερμαντήρα του αερίου μεταφοράς)

Ο προκάτοχος του κύκλου HDH είναι η ηλιακή απόσταξη. Αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει την ηλιακή απόσταξη με σκοπό την κατανόηση της πολυπλοκότητας και των ελαττωμάτων της τεχνολογίας αυτής. Το πιο απαγορευτικό μειονέκτημα ενός ηλιακού αποστακτήρα είναι η χαμηλή αποδοτικότητα, η οποία προκύπτει από την άμεση απώλεια της λανθάνουσας θερμότητας συμπύκνωσης μέσω του γυάλινου καλύμματος του αποστακτήρα. Μερικοί σχεδιασμοί μέσω της ανάκτησης και ανακύκλωσης της θερμότητας συμπύκνωσης, αυξάνουν την απόδοση του αποστακτήρα. Τέτοιοι σχεδιασμοί όπως π.χ. οι αποστακτήρες πολλαπλών αποτελεσμάτων επιτυγχάνουν μερική αύξηση της αποτελεσματικότητας του αποστακτήρα, αλλά η συνολική απόδοση παραμένει σχετικά χαμηλή. Το κύριο μειονέκτημα της ηλιακής απόσταξης είναι ότι οι διάφορες λειτουργικές διαδικασίες (η ηλιακή απορρόφηση, η εξάτμιση, η συμπύκνωση και η ανάκτηση θερμότητας) λαμβάνουν χώρα σε ένα μόνο τμήμα. Ο διαχωρισμός αυτών των λειτουργικών διαδικασιών σε ξεχωριστά τμήματα, μπορεί να μειώσει την θερμική ανεπάρκεια και να βελτιώσει την συνολική απόδοση. Αυτός ο διαχωρισμός των λειτουργιών είναι ένα απαραίτητο και ουσιώδες χαρακτηριστικό των συστημάτων HDH. Για παράδειγμα, κατά την HDH, η ανάκτηση της λανθάνουσας θερμότητας συμπύκνωσης γίνεται σε έναν ξεχωριστό εναλλάκτη θερμότητας (αφυγραντήρας) με το θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό τροφοδοσίας να προθερμαίνεται. Το τμήμα εισαγωγής θερμότητας (π.χ. ένας ηλιακός συλλέκτης) μπορεί να βελτιστοποιηθεί σχεδόν ανεξάρτητα από τα τμήματα υγροποίησης και αφυγροποίησης. Κατά συνέπεια, η μέθοδος HDH υπόσχεται υψηλότερη παραγωγικότητα λόγω του διαχωρισμού των επιμέρους βασικών διαδικασιών.

Τα συστήματα HDH είναι ιδανικά για εφαρμογές μικρής κλίμακας, καθώς δεν αποτελούνται από εξαρτήματα και στοιχεία που χρειάζονται εκτεταμένο κεφαλαιακό κόστος και συντήρηση όπως οι μεμβράνες ή οι αγωγοί υψηλής θερμοκρασίας. Επίσης, δεν υπάρχει κανένα εμπόδιο ως προς την εφαρμογή της HDH για ύδατα τροφοδοσίας ποικίλης ποιότητας. Τα συστήματα HDH ταξινομούνται σε τρεις γενικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία βασίζεται στην μορφή ενέργειας που χρησιμοποιείται όπως η ηλιακή, η θερμική, η γεωθερμική και τα υβριδικά συστήματα. Αυτή η

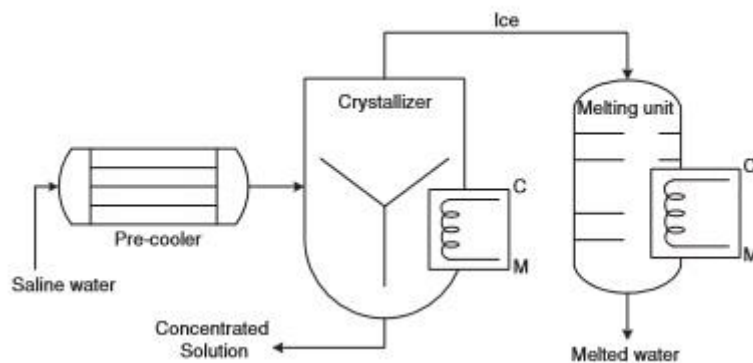
ταξινόμηση αναδεικνύει ένα πολλά υποσχόμενο προτέρημα της HDH, την παραγωγή νερού μέσω της χρήσης ενέργειας χαμηλής ποιότητας ειδικά από βιομηχανικές πηγές όπως η απορριπτόμενη θερμότητα ή από ανανεώσιμες πηγές όπως η ηλιακή ενέργεια ή η βιομάζα. Η δεύτερη κατηγορία βασίζεται στον τύπο του κυκλώματος που χρησιμοποιείται, δηλαδή αν είναι κύκλωμα «κλειστού νερού» και «ανοικτού αέρα» (closed water open air, CWOA) ή αν είναι «κλειστού αέρα» και «ανοικτού νερού» (closed air open water, CAOW). Στο κύκλωμα CWOA, ο ατμοσφαιρικός αέρας του περιβάλλοντος εισέρχεται στον υγραντήρα όπου θερμαίνεται και υγραίνεται. Στην συνέχεια, περνάει από τον αφυγραντήρα όπου αφυγραίνεται και ξηραίνεται μερικώς και απελευθερώνεται στο περιβάλλον. Στο κύκλωμα CAOW (Εικ. 1.35), ο αέρας επανακυκλοφορεί σε ένα κλειστό βρόχο ανάμεσα στον υγραντήρα και τον αφυγραντήρα με το νερό τροφοδοσίας να εισέρχεται και να επανακυκλοφορεί και αυτό για συγκεκριμένο αριθμό κύκλων ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ανάκτηση. Ο αέρας σε αυτά τα συστήματα κυκλοφορεί είτε μέσω φυσικής μεταφοράς ή μέσω μηχανικών φυστηρίων και το νερό τροφοδοσίας κυκλοφορεί με την βοήθεια συνήθως κάποιας αντλίας. Είναι ζωτικής σημασίας η κατανόηση των σχετικών τεχνικών πλεονεκτημάτων του κάθε κύκλου και η επιλογή της καταλληλότερης διάταξης ως προς την αποτελεσματικότητα και το κόστος παραγωγής. Η τρίτη και τελευταία κατηγορία βασίζεται στον τύπο του συστήματος θέρμανσης του νερού ή του αέρα (αέριο μεταφοράς). Η απόδοση του συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ποιο ρευστό υφίσταται θέρμανση (σε θερμαντήρα).

#### 1.2.3.2 Ψύξη - απόψυξη (Freezing - Melting, FM)

Η FM, ως μέθοδος αφαλάτωσης, έχει την δυνατότητα αφαίρεσης νερού από αλατούχα διαλύματα μέσω των κρυστάλλων πάγου που σχηματίζονται. Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι οι χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις και η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας σε σύγκριση με τις θερμικές μεθόδους. Το μειωμένο ενεργειακό κόστος προκύπτει από το γεγονός ότι η λανθάνουσα θερμότητα της τήξης του πάγου είναι το ένα έβδομο της λανθάνουσας θερμότητας της εξάτμισης. Άλλα πλεονεκτήματα είναι η εμφάνιση προβλημάτων όπως η καθαλάτωση, η ρύπανση και η διάβρωση σε μικρότερο βαθμό, η ικανότητα χρησιμοποίησης φτηνών πλαστικών ή γενικότερα υλικών χαμηλού κόστους και η απουσία προεπεξεργασίας. Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματα αυτά η μέθοδος παρουσιάζει μια καθυστέρηση ως προς την εμπορική διάθεση ειδικά στον τομέα της αφαλάτωσης. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου αφαλάτωσης βασίζεται κυρίως στην επιθυμητή ποιότητα του προϊόντος, στο ενεργειακό κόστος, στην αρχική επένδυση και στην πολυπλοκότητα της διαδικασίας. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την χρήση της FM είναι το κεφαλαιακό κόστος και η πολυπλοκότητα της διαδικασίας. Η μέθοδος FM αποδείχθηκε επιτυχής μόνο όταν οι δύο παραπάνω παράγοντες αντισταθμίστηκαν και εξισορροπήθηκαν από άλλα πλεονεκτήματα. Διάφορες μελέτες έχουν δείξει ότι τα υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν την μέθοδο της FM με άλλες μεθόδους αφαλάτωσης παρουσιάζουν δυνητική προοπτική για μελλοντική ανάπτυξη, π.χ. τα ηλιακά υποβοηθούμενα συστήματα.

Η FM είναι ακριβής αντιγραφή της φυσικής διαδικασίας του νερού της θάλασσας που παγώνει, σχηματίζει παγόβουνα και απορρίπτει τα άλατα στο περιβάλλον. Η συνδυασμένη μεταφορά θερμότητας που σχετίζεται με την απομάκρυνση θερμότητας από το περιβάλλον και την απελευθέρωση λανθάνουσας θερμότητας στην διεπαφή νερού - πάγου έχει ως αποτέλεσμα τις φυσικές ροές συναγωγής του νερού. Κατά την ψύξη του θαλασσινού νερού, το υγρό που απελευθερώνεται στην διεπαφή νερού - πάγου είναι πυκνότερο από το νερό του

περιβάλλοντος. Η προκύπτουσα δύναμη πλευστότητας (δηλαδή η ικανότητα επίπλευσης) των διαλυμένων ουσιών δρα επομένως καθοδικά, μαζί με την θερμική δύναμη πλευστότητας. Η απεικόνιση της ροής έδειξε ότι η ροή ήταν καθοδική (κάτω από την επιφάνεια της ψύξης) και ότι η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή επηρεάστηκε έντονα από την απόρριψη διαλυμένων ουσιών κατά την ψύξη. Σε μια διαδικασία FM, το διάλυμα πρώτα ψύχεται μερικώς και μετά, αφού ψυχθεί εντελώς, γίνεται ένας φυσικός διαχωρισμός των κρυστάλλων πάγου που σχηματίζονται από το συμπυκνωμένο πλέον διάλυμα των διαλυμένων ουσιών. Στην συνέχεια, οι κρύσταλλοι πάγου υφίστανται απόψυξη και επακόλουθη τήξη για να προκύψει καθαρό νερό. Η διαδικασία της FM επιτυγχάνεται σε δύο στάδια, το πρώτο στάδιο είναι αυτό της κρυσταλλοποίησης του πάγου και το δεύτερο στάδιο είναι αυτό του διαχωρισμού και της απόψυξης - τήξης (Εικ. 1.36). Στο πρώτο στάδιο, η πυρηνοποίηση συμβαίνει σε κατάλληλη θερμοκρασία ψύξης με τους πυρήνες του διαλύματος να αναπτύσσονται και να σχηματίζουν μεγάλους κρυστάλλους πάγου στην μονάδα κρυστάλλωσης. Στο δεύτερο στάδιο, οι κρύσταλλοι διαχωρίζονται από το συμπύκνωμα μέσω ενός μηχανικού διαχωριστή και τήκονται για να παραχθεί καθαρό νερό. Σε μερικές περιπτώσεις, υπάρχει και ένα στάδιο πρόψυξης στην τροφοδοσία, που χρησιμοποιείται συνήθως κάποιος προψυκτήρας, ώστε να μειωθεί το ποσό θερμότητας που θα περάσει στην κύρια μονάδα ψύξης - κρυσταλλοποίησης.



**Εικόνα 1.36:** Διάταξη ψύξης - απόψυξης

Τα πλεονεκτήματα της FM είναι οι χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις σε σύγκριση με τις μεθόδους απόσταξης, οι χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας που μειώνουν τα προβλήματα καθαλάτωσης και διάβρωσης, η δυνατότητα χρησιμοποίησης φτηνών υλικών χαμηλού κόστους, η πρόκληση λιγότερων θερμικών βλαβών στα συστατικά του διαλύματος, η ικανότητα να έχει μεγάλη επιφάνεια και συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μέσω της άμεσης επαφής άλμης - ψυκτικού μέσου, η απαίτηση λιγότερης ή καθόλου προεπεξεργασίας και η αντοχή στην ρύπανση καθώς η FM δεν επηρεάζεται από αυτή όπως επηρεάζονται οι μέθοδοι μεμβρανών και οι θερμικές μέθοδοι. Το κύριο μειονέκτημα της FM σε σύγκριση με την εξάτμιση και την RO είναι το υψηλότερο κεφαλαιακό και λειτουργικό κόστος κατά την διάρκεια του διαχωρισμού των κρυστάλλων πάγου. Άλλα μειονεκτήματα είναι η διατήρηση ανεπιθύμητων γεύσεων και αρωμάτων που ενδέχεται να υπάρχουν στο αλατώδες διάλυμα της τροφοδοσίας και πιθανόν να περάσουν στο καθαρό νερό της παραγωγής, η πλύση που είναι απαραίτητη για τους κρυστάλλους πάγου και που χρησιμοποιεί αρκετή ποσότητα καθαρού νερού, η χρήση συμπιεστή που

αντιπροσωπεύει έναν δαπανηρό τρόπο εφοδιασμού της απαιτούμενης ενέργειας του συστήματος παρά το γεγονός ότι η απαιτούμενη ενέργεια για την ψύξη είναι πολύ λιγότερη αυτής του βρασμού, η πολυπλοκότητα των λειτουργιών των μονάδων της ψύξης - κρυσταλλοποίησης και της απόψυξης - τήξης, η περιορισμένη διαθεσιμότητα γνώσεων για τον σχεδιασμό της διαδικασίας και τον καθορισμό της απόδοσης της, η παγίδευση αλάτων και διαλυμένων ουσιών του διαλύματος κατά την κρυστάλλωση και η ανάγκη για χρήση ενέργειας υψηλής ποιότητας για την κρυσταλλοποίηση σε σύγκριση με την ενέργεια χαμηλής ποιότητας που χρησιμοποιείται σε αρκετές μεθόδους εξάτμισης.

#### 1.2.3.3 Ιοντοανταλλαγή (Ion Exchange)

Η ιοντοανταλλαγή είναι η μέθοδος, κατά την οποία γίνεται ανταλλαγή ιόντων μεταξύ ενός διαλύματος ηλεκτρολυτών και ενός άλλου συμπλέγματος ή πιο απλά μεταξύ δύο ηλεκτρολυτών. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για την περιγραφή διαδικασιών όπως ο καθαρισμός, ο διαχωρισμός και η απολύμανση υδατικών και άλλων ιοντικών διαλυμάτων, με στερεούς πολυμερικούς ή μεταλλικούς ιοντοανταλλακτικές. Τυπικοί τέτοιοι ιοντοανταλλακτικές είναι οι ιοντοανταλλακτικές ρητίνες (Εικ. 1.37), οι ζεόλιθοι, ο μοντμοριλλονίτης, ο άργιλος κ.ά. Οι ιοντοανταλλακτικές είναι είτε ιοντοανταλλακτικές κατιόντων, που ανταλλάσσουν τα θετικά φορτισμένα ιόντα (κατιόντα) ή ιοντοανταλλακτικές ανιόντων, που ανταλλάσσουν τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα (ανιόντα). Υπάρχουν όμως και ιοντοανταλλακτικές που απομακρύνουν αμφότερα τα κατιόντα και τα ανιόντα, ταυτόχρονα. Η ιοντοανταλλαγή μπορεί να είναι μη εκλεκτική ή να έχει δεσμευτικές προτιμήσεις για ορισμένα ιόντα ή κατηγορίες ιόντων ανάλογα με την χημική τους δομή, το μέγεθος και το φορτίο. Παραδείγματα ιόντων και ιοντικών ομάδων που μπορούν να δεσμευθούν από τους ιοντοανταλλακτικές είναι τα κατιόντα υδρογόνου ( $H^+$ ) και τα ανιόντα υδροξειδίου ( $OH^-$ ), τα μονοσθενή ιόντα όπως τα κατιόντα νατρίου ( $Na^+$ ) και καλίου ( $K^+$ ) και τα ανιόντα χλωρίου ( $Cl^-$ ), τα δισθενή ιόντα όπως τα κατιόντα ασβεστίου ( $Ca^{2+}$ ) και μαγνησίου ( $Mg^{2+}$ ), τα πολυατομικά ανόργανα ιόντα όπως το τετροξειδίο του θείου ( $SO_4^{2-}$ ) και το τετροξειδίο του φωσφόρου ( $PO_4^{3-}$ ), οι οργανικές βάσεις και ειδικά τα μόρια που περιέχουν την λειτουργική ομάδα (αμίνης)  $-NR_2H^+$ , τα οργανικά οξέα και ειδικά τα μόρια που περιέχουν τις λειτουργικές ομάδες (καρβοξυλικού οξέος)  $-COO^-$ , τα βιομόρια που μπορούν να ιονιστούν όπως τα αμινοξέα, τα πεπτίδια, οι πρωτεΐνες κ.ά.



**Εικόνα 1.37:** Ιοντοανταλλακτικές ρητίνες

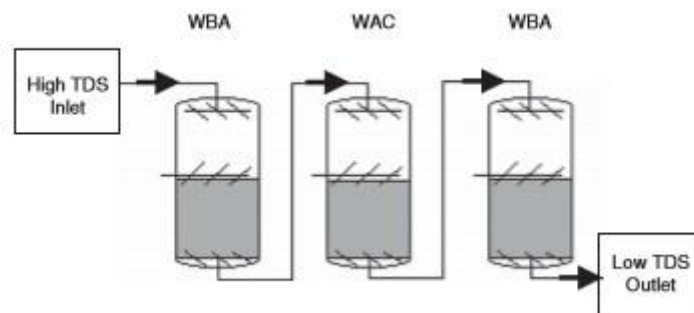
Η ιοντοανταλλαγή προηγείται της εμπορικά διαθέσιμης RO κατά δύο δεκαετίες τουλάχιστον, αλλά καθώς η RO άρχισε να διατίθεται εμπορικά προέκυψαν τρία

πλεονεκτήματα έναντι της ιοντοανταλλαγής. Πρώτον, κατά τα πρώτα χρόνια λειτουργίας της RO, ήταν πάντα απαραίτητος ο υπολογισμός του συνόλου των διαλυμένων στερεών (TDS) που έδειχνε πότε η ιοντοανταλλαγή γινόταν μη οικονομική σε σύγκριση με τις καινούργιες μεθόδους μεμβρανών. Αρχικά, η ιοντοανταλλαγή επικράτησε για έναν πολύ υψηλό αριθμό TDS (> 1,500 ppm) λόγω του υψηλού κόστους των πρώιμων στοιχείων μεμβρανών, αλλά καθώς το κόστος των μεμβρανών μειωνόταν, η RO κέρδιζε έδαφος έναντι της ιοντοανταλλαγής. Δεύτερον, η σχεδόν συνεχής λειτουργία των συστημάτων μεμβρανών αναγνωρίστηκε ως ένα δυνατό πλεονέκτημα, έναντι του κυκλικού μοντέλου λειτουργίας με συνεχή αναζωογόνηση των ρητινών ανά παρτίδα, των συστημάτων ιοντοανταλλαγής. Τρίτον, η διαφήμιση των συστημάτων μεμβρανών την εποχή εκείνη είχε ως επίκεντρο το γεγονός, ότι αυτού του είδους τα συστήματα ήταν απαλλαγμένα από χημικά, σε αντίθεση με τα συστήματα ιοντοανταλλαγής, παρόλο που στην ιοντοανταλλαγή τηρούνταν όλοι οι κανονισμοί ασφαλείας. Ωστόσο, είναι γνωστό ότι τα συστήματα μεμβρανών, όντως χρειάζονται περιοδικό καθαρισμό (που συνήθως γίνεται με χημικά μέσα) κάτι το οποίο αναιρεί το τρίτο παραπάνω πλεονέκτημα. Η ιοντοανταλλαγή λοιπόν, για ύδατα με αυξημένα επίπεδα διαλυμένων στερεών, είναι απλά μη αποδοτική ως προς το κόστος σε αντίθεση με την RO και τις μεθόδους μεμβρανών, γενικότερα.

Διαδικασία αφαλάτωσης με ιοντοανταλλαγή:

Από ιστορικής άποψης, η διαδικασία που επινόησε ο Robert Kunin το 1962 (Εικ. 1.38) αποτέλεσε το αποκορύφωμα της ιοντοανταλλαγής, καθώς μπορούσε να επεξεργαστεί (υφάλμυρα) ύδατα με επίπεδα TDS της τάξης των 500 - 5,000 ppm. Η διαδικασία περιγράφεται παρακάτω ως εξής:

- Το υφάλμυρο νερό τροφοδοσίας προς επεξεργασία εισέρχεται στο πρώτο δοχείο, που περιέχει μια ασθενή βάση ανιόντων (weak base anion, WBA) υπό μορφή διττανθρακικού άλατος (όξινου ανθρακικού άλατος).
- Όλα τα μη διττανθρακικά ανιόντα της εισόδου ανταλλάσσονται για διττανθρακικά, με την έξοδο του πρώτου δοχείου να περιέχει ένα μείγμα από διττανθρακικά άλατα νατρίου, ασβεστίου και μαγνησίου.
- Το δεύτερο δοχείο περιέχει ένα ασθενές οξύ κατιόντων (weak acid cation, WAC) υπό την μορφή ιόντων υδρογόνου, που αντιδρά με το μείγμα διττανθρακικών αλάτων, έχοντας ως στόχο την ιοντοανταλλαγή όλων των κατιόντων με το υδρογόνο. Η έξοδος είναι ένα δυνατό διάλυμα ανθρακικού οξέος, νερού και διοξειδίου του άνθρακα.
- Το τρίτο δοχείο περιέχει πάλι μια ασθενή βάση ανιόντων, που είναι υπό ελεύθερη μορφή και αντιδρά ποσοτικά με το διάλυμα ανθρακικού οξέος μεταφέροντάς το σε διττανθρακική μορφή. Σε αυτό το σημείο, γίνεται η παραγωγή νερού με χαμηλά επίπεδα TDS και τελειώνει ο πρώτος κύκλος.
- Μετά το πέρας του πρώτου κύκλου, γίνεται η αναζωογόνηση της πρώτης ασθενούς βάσης ανιόντων με αμμωνία ή άσβεστο και του ασθενούς οξέος κατιόντων με υδροχλωρικό (HCl) ή θειικό οξύ (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).
- Ο δεύτερος κύκλος ξεκινάει με μια αντιστροφή της ροής, κατά την οποία το τρίτο δοχείο γίνεται πρώτο και το πρώτο τρίτο.



**Εικόνα 1.38:** Διαδικασία αφαλάτωσης με ιοντοανταλλαγή (1962)

Η διαδικασία προοριζόταν για υφάλμυρα ύδατα με TDS μέχρι 5,000 ppm, αλλά όχι για θαλάσσια ύδατα και παρουσίαζε πλεονεκτήματα όπως η χρήση αναγεννητικών παραγόντων χαμηλού κόστους και η μέγιστη χημική απόδοση κατά την αναζωογόνηση. Παρόλο που η παραπάνω διαδικασία ήταν αρκετά έξυπνη, οι κεφαλαιακές απαιτήσεις για τα δοχεία ρητίνης αποδείχθηκαν σημαντικό εμπόδιο για την προώθηση της διαδικασίας, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν τέτοιες μονάδες οποιοδήποτε μεγέθους ανά τον κόσμο.

Η ιοντοανταλλαγή μπορεί να μην χρησιμοποιείται πλέον μεμονωμένα ως μια αυτόνομη διαδικασία, αλλά αυτό δεν σημαίνει απαραίτητα ότι η μέθοδος έχει εξαλειφθεί. Η ιοντοανταλλαγή σήμερα βρίσκει κυρίως εφαρμογή στην προεπεξεργασία των ροών τροφοδοσίας άλλων μεθόδων (Εικ. 1.39), με σκοπό την αποσκλήρυνση του νερού. Συγκεκριμένα, στην RO, η μέθοδος χρησιμοποιείται για την μείωση της πιθανότητας εμφάνισης του φαινομένου της καθαλάτωσης (πόλωση συγκέντρωσης) στις μεμβράνες και για την απομάκρυνση ενοχλητικών και αναπάντεχων ρυπαντών της θάλασσας, όπως π.χ. το βόριο. Η αποσκλήρυνση με ιοντοανταλλαγή αποτελεί επίσης επιλογή καθαρισμού των εισερχόμενων υδάτων και του βιομηχανικού κλάδου. Γενικά, πριν την δημιουργία των πρώτων ιοντοανταλλακτικών ρητινών κατιόντων (λίγο πριν τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο), η αποσκλήρυνση του νερού γινόταν με ζεόλιθους. Τώρα πλέον, με την χρήση των ρητινών, η αποσκλήρυνση με ιοντοανταλλαγή γίνεται μέσω μιας ιοντοανταλλακτικής ρητίνης κατιόντων ενός ισχυρού οξέος υπό μορφή νατρίου, που ανταλλάσσει το νάτριο με ιόντα σκληρότητας όπως π.χ. του ασβεστίου (Ca), του μαγνησίου (Mg), του βαρίου (Ba) και του στροντίου (Sr). Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας, γίνεται η αναζωογόνηση των ρητινών μέσω ενός διαλύματος άλμης και ειδικά στην περίπτωση που υπάρχει σύζευξη συστημάτων ιοντοανταλλαγής και RO θαλασσινού νερού, η παραγόμενη άλμη από το θαλασσινό νερό χρησιμοποιείται για την αναγέννηση των ρητινών.





**Εικόνα 1.39:** Διάταξη ιοντοανταλλαγής κατιόντων - ανιόντων για τον καθαρισμό νερού τροφοδοσίας λέβητα.

### 1.3 ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Τα αποθέματα γλυκού νερού και οι ενεργειακοί πόροι εξαντλούνται ολοένα και περισσότερο. Ως εκ τούτου, η αφαλάτωση θαλασσινού νερού με την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ένα αρκετά ελκυστικό πεδίο έρευνας. Η αφαλάτωση είναι μια εξαιρετικά δαπανηρή ενεργειακά διαδικασία, η οποία καθιστά τις συμβατικές μεθόδους, των οποίων η ενεργειοδότηση προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, αρκετά μη δημοφιλείς και ειδικά τώρα λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου και της παγκόσμιας υπερθέρμανσης του πλανήτη. Η παγκόσμια παραγωγική ικανότητα της αφαλάτωσης με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι λιγότερη από 1% της αντίστοιχης συμβατικής αφαλάτωσης λόγω του υψηλού κεφαλαιακού κόστους και του υψηλού κόστους συντήρησης. Έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί αρκετές μονάδες αφαλάτωσης που χρησιμοποιούν ανανεώσιμη ενέργεια, παρόλα αυτά όμως οι περισσότερες προσαρμόστηκαν γεωγραφικά και κατασκευάστηκαν πειραματικά σε πιλοτική - δοκιμαστική κλίμακα.

Η αιολική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω διάφορων στροβίλων που θα τροφοδοτήσει ενεργειακά τις μονάδες αφαλάτωσης μεμβρανών. Η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμικής ενέργειας μέσω υπογείων εναλλακτών θερμότητας που θα τροφοδοτήσει ενεργειακά τις θερμικές μονάδες αφαλάτωσης. Από όλες όμως τις παραπάνω ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, η ηλιακή είναι αυτή με την μεγαλύτερη προοπτική λόγω της δυνατότητας της για άμεση παροχή θερμικής ενέργειας στις μονάδες απόσταξης μέσω ηλιακών συλλεκτών και λόγω της δυνατότητας της για έμμεση παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στις μονάδες μεμβρανών μέσω φωτοβολταϊκών κυττάρων. Ένα σύστημα ηλιακής αφαλάτωσης συνδυάζει δύο υποσυστήματα, ένα υποσύστημα συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας και ενέργειας και ένα υποσύστημα αφαλάτωσης. Το υποσύστημα συλλογής της ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιείται είτε για την συλλογή θερμότητας χρησιμοποιώντας ηλιακούς συλλέκτες και για την τροφοδοσία μιας θερμικής μονάδας αφαλάτωσης ή για την μετατροπή της θερμικής

ενέργειας σε ηλεκτρική χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκές κυψέλες για την ενεργειοδότηση μιας μονάδας αφαλάτωσης μεμβρανών. Στο υποσύστημα αφαλάτωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε μέθοδος αφαλάτωσης.

### 1.3.1 Χρήση της ηλιακής ενέργειας για αφαλάτωση

#### 1.3.1.1 Άμεση χρήση της ηλιακής ενέργειας

Ηλιακές λίμνες:

Οι ηλιακές λίμνες είναι πισίνες νερού με ένα σκοτεινό και σκουρόχρωμο πυθμένα για την μεγιστοποίηση της απορρόφησης του φωτός. Σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν αυξανόμενη αλατότητα με το βάθος, δημιουργώντας διαβαθμίσεις πυκνότητας που εμποδίζουν τα φυσικά ρεύματα μεταφοράς. Το νερό απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του. Όσο πιο μικρό είναι το μήκος κύματος του ηλιακού φωτός, τόσο πιο βαθιά μπορεί να διεισδύσει στο νερό. Η ποσότητα της ενέργειας που έχει απορροφηθεί αυξάνεται με το βάθος, δημιουργώντας μια κάθετη κλίση της θερμοκρασίας που προκαλεί μείωση της πυκνότητας με το βάθος. Αντίθετα, η αλατότητα αυξάνεται με το βάθος δημιουργώντας μια κάθετη κλίση της αλατότητας που προκαλεί αύξηση της πυκνότητας με το βάθος. Το τελικό αποτέλεσμα αυτών των ασύμφωνων συμβάντων είναι μια διαστρωματοποιημένη λίμνη με αυξανόμενη θερμοκρασία και αλατότητα με το βάθος. Οι ηλιακές λίμνες λειτουργούν ως ηλιακοί συλλέκτες, αλλά και ως μέσα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

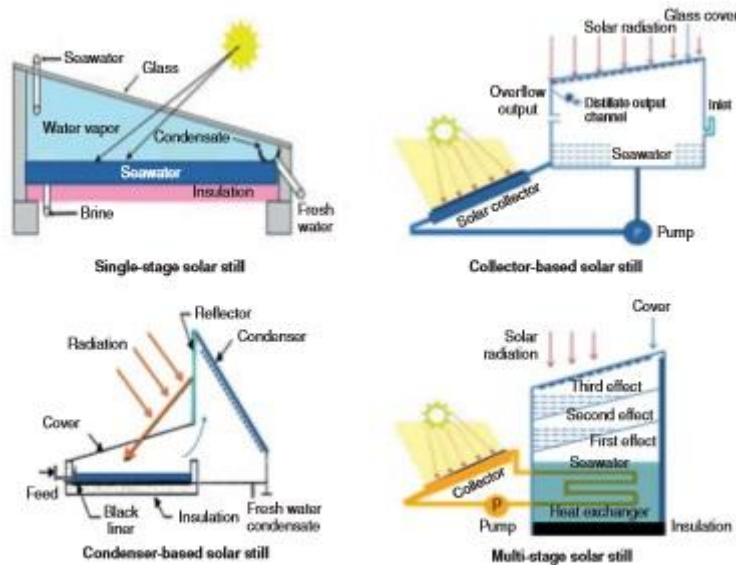
Ηλιακή απόσταξη:

Κατά την ηλιακή απόσταξη, σε έναν ηλιακό αποστακτήρα, οι διαδικασίες της συλλογής θερμότητας και της απόσταξης συμβαίνουν εντός της ίδιας δομής, όπου η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται κατευθείαν για απόσταξη μέσω του φαινομένου του θερμοκηπίου. Το θαλασσινό νερό τοποθετείται σε μια σκουρόχρωμη λεκάνη εντός μιας αεροστεγούς διάφανης δομής όπου εξατμίζεται λόγω της απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας και στην συνέχεια, συμπυκνώνεται στην κεκλιμένη δομή μέσω της απελευθέρωσης της λανθάνουσας θερμότητας του στο γύρω περιβάλλον. Τα συμπυκνωμένα σταγονίδια με την σειρά τους, κυλούν κάτω από το κάλυμμα και καταλήγουν στις κοιλότητες συσσώρευσης, όπου συλλέγονται ως καθαρό νερό.

Οι ηλιακοί αποστακτήρες είναι υδρολογικοί κύκλοι μικρής κλίμακας και η απόδοση τους εξαρτάται από μετεωρολογικούς υπαρκτούς περιορισμούς όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η διαύγεια του ουρανού, οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος, η ταχύτητα του ανέμου κ.ά. Επιπλέον, το παραγόμενο προϊόν των ηλιακών αποστακτήρων επηρεάζεται από πολλούς λειτουργικούς παράγοντες όπως το βάθος της άλμης, η διαρροή των υδρατμών, η θερμομόνωση, η κλίση του καλύμματος, οι μορφοποιήσεις των υλικών κ.ά. Η λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης κανονικά χάνεται στο κάλυμμα και για αυτόν τον λόγο η απόδοση του συστήματος είναι σχετικά χαμηλή, με την ημερήσια παραγωγή να είναι της τάξης των 3 - 4 lt/m<sup>2</sup>. Οι ηλιακοί αποστακτήρες χρειάζονται μεγάλες επιφάνειες συλλογής για την μεγιστοποίηση της απορρόφησης της ακτινοβολίας και συνήθως, συνδυάζονται και με άλλες μεθόδους αφαλάτωσης για να αυξήσουν την αποτελεσματικότητά τους.

Η εκτενής μελέτη και έρευνα των ηλιακών αποστακτήρων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών και διαφορετικών διατάξεων όπως φαίνεται και στην Εικ. 1.40. Ο συνδυασμός των ηλιακών αποστακτήρων με διάφορες συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας και με συμπυκνωτές καθώς και η χρήση επίπεδων συγκεντρωτικών

ηλιακών συλλεκτών, η ενσωμάτωση (παθητικού) κενού αέρος, η ανάκτηση θερμότητας μέσα στους ηλιακούς αποστακτήρες και η αύξηση των συμβατικών συστημάτων θερμικής αφαλάτωσης που συνδέονται με τους ηλιακούς αποστακτήρες, αποτελούν όλοι διαφορετικούς τρόπους αύξησης της εφαρμοσιμότητας των ηλιακών αποστακτήρων. Σε γενικές γραμμές, οι ηλιακοί αποστακτήρες είναι σχετικά οικονομικοί ως προς την κατασκευή και την συντήρηση, πράγμα που τους κάνει μια βιώσιμη επιλογή για τις υποανάπτυκτες κοινότητες με καλούς ηλιακούς πόρους και για καταστάσεις έκτακτης ανάγκης που μπορούν να προκαλέσουν διακοπές ρεύματος.



**Εικόνα 1.40:** Διάφορες διατάξεις ηλιακών αποστακτήρων

### 1.3.1.2 Έμμεση χρήση της ηλιακής ενέργειας

Ηλιακοί συλλέκτες:

Το υποσύστημα συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας ενός ηλιακού συστήματος αφαλάτωσης είναι ουσιαστικά ένας ηλιακός συλλέκτης, που απορροφά την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και μεταφέρει την προσληφθείσα θερμότητα στο ρευστό που ρέει εντός της δομής του. Το ρευστό λειτουργίας του ηλιακού συλλέκτη μπορεί να είναι, είτε ένα μέσο μεταφοράς θερμότητας ή ένας χώρος αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας ή ακόμα και το ίδιο το θαλασσινό νερό πριν την εισαγωγή σε ένα θερμικό σύστημα αφαλάτωσης. Οι ηλιακοί συλλέκτες δύνανται να είναι στατικοί ή παρακολούθησης - ιχνηλάτησης. Οι συλλέκτες ιχνηλάτησης σχεδιάζονται ώστε να εντοπίζουν και να παρακολουθούν τις ακτίνες του ηλιακού φωτός, μέσω της μετακίνησης τους σε μονούς ή διπλούς άξονες. Επίσης, οι ηλιακοί συλλέκτες κατηγοριοποιούνται σε συγκεντρωτικούς και σε μη συγκεντρωτικούς τύπους. Ο λόγος συγκέντρωσης ενός ηλιακού συλλέκτη είναι η σχετική ποσότητα της ηλιακής ροής στον δέκτη προς την ηλιακή ροή στις περιοχές των ανοιγμάτων, δηλαδή στις περιοχές των οπών από τις οποίες περνάει η μόνωση. Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες έχουν υψηλά ανακλαστικές επιφάνειες, για να ανακλούν και να συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε έναν δέκτη ή σε έναν απορροφητή, ενώ οι μη συγκεντρωτικοί έχουν υψηλά απορροφητικές επιφάνειες με χαμηλή εκπομπή για να μεγιστοποιήσουν

την μεταφορά θερμότητας στο ρευστό λειτουργίας. Τέλος, οι ηλιακοί συλλέκτες επιλέγονται σύμφωνα με την επιθυμητή θερμοκρασία λειτουργίας.

**Φωτοβολταϊκά κύτταρα:**

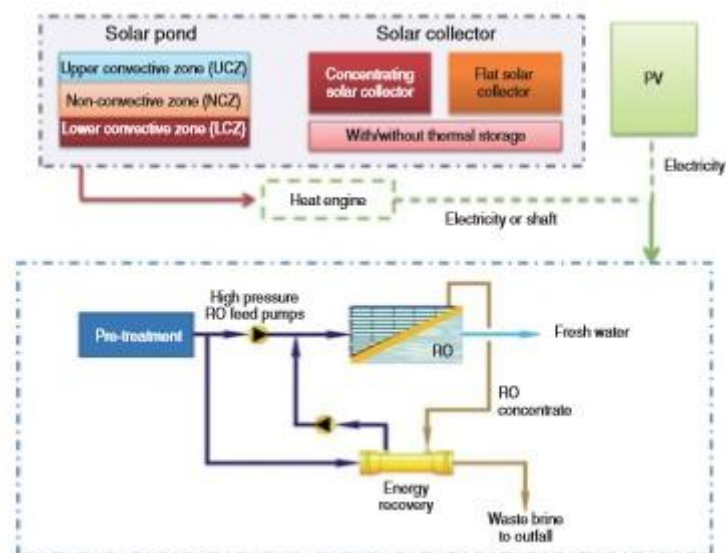
Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα παρασκευάζονται από κοινούς ημιαγωγούς όπως το πυρίτιο ή το γερμάνιο, ή από άλλες χημικές ενώσεις ημιαγωγών όπως το αρσενίδιο του γαλλίου (GaAs), το τελλουρίδιο του καδμίου (CdTe), το ίνδιο του χαλκού (CuIn), το σεληνίδιο του γαλλίου (GaSe) κ.ά. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα στην απλούστερη μορφή τους είναι ηλεκτρονικές διόδους ημιαγωγής μεγάλης επιφάνειας, που επιτρέπουν την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος στην αντίθετη κατεύθυνση με την παρουσία του φωτός. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα μπορούν να συνδεθούν σε διατάξεις σειράς ή παράλληλα για να σχηματίσουν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο ή πάνελ και έχουν επίσης την δυνατότητα της άμεσης μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ωφέλιμη ηλεκτρική ενέργεια. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ σχεδιάζονται για ειδικές συνθήκες εξόδου τάσης και ρεύματος, όταν οι ακτίνες του ηλίου προσπίπτουν κατακόρυφα στις επιφάνειες τους με ένταση  $1,000 \text{ W/m}^2$ . Υπό αυτές τις συνθήκες, η απόδοση ισχύος ενός φωτοβολταϊκού πάνελ εκφράζεται σε Watt ή kiloWatt και βρίσκεται στην μέγιστη τιμή της. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα περιλαμβάνουν μια συστοιχία συνδεδεμένων πάνελ για την παραγωγή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος. Δεδομένου ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα παράγουν μια έξοδο ισχύος συνεχούς ρεύματος, χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας (inverter) για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος (DC) σε εναλλασσόμενο (AC). Τα φωτοβολταϊκά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανεξάρτητα ή από κοινού με άλλες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την τροφοδοσία των συστημάτων ασφαλάτωσης.

Επίσης, το κόστος αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την εφαρμοσιμότητα των φωτοβολταϊκών συστημάτων και ειδικά τα τελευταία χρόνια που οι τιμές τους έχουν μειωθεί αρκετά λόγω της μαζικής παραγωγής. Τα φωτοβολταϊκά γενικότερα, έχουν λιγότερες απαιτήσεις συντήρησης σε σχέση με άλλα ηλιακά συστήματα και επειδή η ίδια η φύση των φωτοβολταϊκών είναι αρκετά απλή, υπάρχει και η δυνατότητα τμηματικής ανάπτυξης μιας εγκατάστασης σε φάσεις. Τα φωτοβολταϊκά επιπλέον δεν χρειάζονται καθόλου νερό για την λειτουργία τους, καθιστώντας έτσι ανεξάρτητη την ανάπτυξη του ηλιακού υποσυστήματος από το υποσύστημα ασφαλάτωσης. Ωστόσο, κατά την ασφαλάτωση RO, που συνεπάγεται αυστηρή προεπεξεργασία και απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό, η εφαρμογή των φωτοβολταϊκών συστημάτων για πιθανή ενεργειοδότηση της διαδικασίας πρέπει να διερευνηθεί κατάλληλα για τις απομονωμένες περιοχές, στις οποίες δεν υπάρχει εξειδικευμένο προσωπικό και αφθονία ως προς το νερό και την ενέργεια.

### **1.3.2 Αντίστροφη ώσμωση με την χρήση ηλιακής ενέργειας**

Η ώσμωση είναι ένα φυσικό φαινόμενο, κατά το οποίο το νερό διέρχεται διαμέσου μιας μεμβράνης από ένα διάλυμα χαμηλότερης συγκέντρωσης σε ένα διάλυμα υψηλότερης συγκέντρωσης. Η ροή του νερού μπορεί να αντιστραφεί, με την προϋπόθεση ότι θα εφαρμοστεί μια εξωτερική πίεση μεγαλύτερη της ωσμωτικής στο διάλυμα της υψηλότερης συγκέντρωσης. Στα συστήματα ασφαλάτωσης RO, η πίεση του θαλασσινού νερού αυξάνεται πάνω από το επίπεδο της φυσικής ωσμωτικής πίεσης των 2.5 MPa, αλλά διατηρείται κάτω από το επίπεδο του ορίου αντοχής των μεμβρανών (συνήθως 6 - 8 MPa) αναγκάζοντας το νερό να διέλθει μέσα από τους πόρους της μεμβράνης. Η RO είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος ασφαλάτωσης από

άποψη εγκατεστημένης ισχύος λόγω της ανώτερης ενεργειακής απόδοσης σε σύγκριση με τις θερμικές μεθόδους, παρά το γεγονός ότι χρειάζεται εκτεταμένη προεπεξεργασία του νερού. Επιπλέον, ένα μέρος της μηχανικής ενέργειας που έχει καταναλωθεί, μπορεί να ανακτηθεί από το απορριπτόμενο και συμπυκνωμένο διάλυμα της άλμης μέσω μιας κατάλληλης συσκευής ανάκτησης ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από συστοιχίες φωτοβολταϊκών κυττάρων ή η μηχανική ενέργεια που παράγεται από ηλιακές λίμνες και από ηλιακούς συλλέκτες που συνδέονται με κάποιον θερμικό κινητήρα όπως οι κινητήρες Stirling και Rankine, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια μονάδα RO (Εικ. 1.41).



**Εικόνα 1.41:** Διάταξη σύζευξης συστήματος αντίστροφης ώσμωσης - ηλιακής ενέργειας

Η RO που τροφοδοτείται ενεργειακά από φωτοβολταϊκά συστήματα συναντάται αρκετά συχνά κυρίως σε εγκαταστάσεις επίδειξης λόγω της επεκτασιμότητας και της στοιχειοδομής, τόσο των φωτοβολταϊκών συστημάτων όσο και των συστημάτων RO. Έχουν διεξαχθεί αρκετές έρευνες για τον συνδυασμό της RO με συσκευές ανάκτησης ενέργειας, μπαταρίες, υβριδικές πηγές ισχύος αιολικής ενέργειας - κινητήρων Diesel και άλλες μεθόδους αφαλάτωσης. Έχουν γίνει αρκετές λεπτομερείς οικονομικές αναλύσεις βάσει μιας πλήρους στρατηγικής βελτιστοποίησης της RO, που ενεργειοδοτείται από φωτοβολταϊκά, με αρκετά ευνοϊκά και επιθυμητά αποτελέσματα. Οι οικονομικοί παράγοντες και η αξιοπιστία είναι οι κυριότερες προκλήσεις για την βελτίωση των υποβοηθούμενων από φωτοβολταϊκά συστημάτων RO. Ωστόσο, η ραγδαία πτώση του κόστους των φωτοβολταϊκών πάνελ καθιστά αυτήν την επιλογή ολοένα και πιο εφικτή. Σε αντίθεση όμως με την υποβοηθούμενη από φωτοβολταϊκά RO, που είναι εμπορικά διαθέσιμη σε μικρή κλίμακα, η υποβοηθούμενη από την ηλιακή θερμική ενέργεια RO είναι απέχει πολύ από την εμπορευματοποίηση. Ο συνδυασμός του ηλιακά ενισχυμένου οργανικού κύκλου Rankine (Organic Rankine Cycle, ORC) με την RO, έχει μελετηθεί τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά. Το πλεονέκτημα αυτής της σύζευξης ORC - RO είναι ότι το θαλασσινό νερό λειτουργεί ως απορροφητής θερμότητας για τον συμπυκνωτή του κύκλου Rankine, ενώ προθερμαίνεται για να αυξήσει την διαπερατότητα των

μεμβρανών RO οδηγώντας σε μειωμένη κατανάλωση ενέργειας. Για την θέρμανση του ρευστού λειτουργίας του κύκλου Rankine σε θερμοκρασίες σχεδιασμού χρησιμοποιούνται επίπεδες πλάκες, σωλήνες εκκένωσης ή συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες. Επίσης, ένα κλάσμα της μηχανικής ενέργειας που παράγεται από τον κύκλο Rankine μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενεργειοδότηση του συνδεδεμένου συστήματος RO.

## **1.4 ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ**

Η πρώτη επίδειξη της δυνατότητας της πυρηνικής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έλαβε κατά τις αρχές της δεκαετίας του 1950. Από τότε, η τεχνολογία παραγωγής πυρηνικής ενέργειας έχει περάσει από πολλά στάδια, οδηγώντας σε αρκετούς τύπους συστημάτων πυρηνικών αντιδραστήρων που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας. Σήμερα, το 17% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτει από την πυρηνική ενέργεια. Η παραγωγή πυρηνικής ενέργειας συνεπάγεται πολύπλοκη και προηγμένη τεχνολογία με αυστηρά πρότυπα ασφάλειας και ποιότητας και είναι ευρέως αποδεκτή ως μια αξιόπιστη, ασφαλής και πλήρως ανταγωνιστική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η προσαρμογή της πυρηνικής ενέργειας για αφαλάτωση αποτελείται από δύο τμήματα, την επιλογή του τύπου του πυρηνικού αντιδραστήρα και την εφαρμογή του πυρηνικού κύκλου καυσίμου, που εξαρτάται τόσο από την διαθεσιμότητα του ουρανίου όσο και από την απόρριψη των ραδιενεργών αποβλήτων. Κάθε τμήμα περιλαμβάνει την επιλογή κατάλληλης τεχνολογίας, που γίνεται βάσει της παραγωγής νερού και ισχύος, αλλά και βάσει των φυσικών και τεχνολογικών διαθέσιμων πόρων του κάθε κράτους. Τεχνικά μιλώντας, ο οποιοσδήποτε πυρηνικός αντιδραστήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αφαλάτωση, όμως ορισμένοι τύποι έχουν διακριθεί ως οι πιο πρακτικοί και πιθανοί για αυτήν την εφαρμογή. Ειδική προσοχή έχει δοθεί στην τεχνολογία των αντιδραστήρων με ψύξη νερού, λόγω της προηγμένης ανάπτυξης και δομής τους. Αυτοί οι αντιδραστήρες χρησιμοποιούν φυσικό ουράνιο ή ουράνιο χαμηλού εμπλουτισμού ως καύσιμο, είναι εγκεκριμένοι και διατίθενται από αρκετούς πωλητές και προμηθευτές.

### **1.4.1 Σύζευξη μονάδων αφαλάτωσης με πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος**

Σε μια μονάδα πυρηνικής ενέργειας το σύστημα του αντιδραστήρα συγκροτεί την πηγή θερμότητας, που αντικαθιστά τον λέβητα σε έναν σταθμό παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Το υπόλοιπο μέρος είναι ένα συμβατικό σύστημα μετατροπής ενέργειας που αποτελείται από ένα κύκλωμα ατμού - νερού, που τροφοδοτεί με ατμό έναν στρόβιλο ο οποίος οδηγεί μια ηλεκτρική γεννήτρια. Αυτή η αρχή είναι ενσωματωμένη σε αρκετούς τύπους, τεχνολογικά προηγμένων και εμπορικά διαθέσιμων αντιδραστήρων. Σε έναν αντιδραστήρα υπό πίεση, ο πυρήνας του αντιδραστήρα εμπεριέχεται σε ένα δοχείο πίεσης στο οποίο χρησιμοποιείται νερό ως ψυκτικό μέσο. Το νερό κυκλοφορεί μέσα από ένα κλειστό κύριο κύκλωμα, εντός του οποίου γίνεται η μεταφορά θερμότητας από το πυρηνικό καύσιμο σε μια γεννήτρια ατμού. Στο δευτερεύων κύκλωμα γίνεται η παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης, που θα προωθηθεί στον στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Η

πίεση και η θερμοκρασία λειτουργίας στο κύριο κύκλωμα είναι περίπου 160 bar και 300 °C, αντίστοιχα. Ο αντιδραστήρας τροφοδοτείται με Ουράνιο μέσου εμπλουτισμού έως και 5% <sup>235</sup>U (ισότοπο Ουρανίου<sup>235</sup>).

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες ισχύος είναι κατάλληλοι για τις διαδικασίες αφαλάτωσης, που απαιτούν ενέργεια υπό την μορφή της ηλεκτρικής ενέργειας όπως η RO και η MVC. Η ισχύς παρέχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο ειδικής μονάδας για την οδήγηση της αντλίας υψηλής πίεσης της RO και του κύριου συμπιεστή της MVC. Η ηλεκτρική σύζευξη ενός σταθμού πυρηνικής ενέργειας και μιας μονάδας RO ή MVC, είναι αρκετά απλή γιατί απαιτεί μόνο μια ηλεκτρική σύνδεση. Υπάρχει μικρή αλληλεξάρτηση ανάμεσα στον πυρηνικό σταθμό ενέργειας που παράγει ηλεκτρική ενέργεια και στην μονάδα αφαλάτωσης που παράγει αφαλατωμένο νερό. Προσφέρει ευελιξία ως προς την τοποθεσία και το μέγεθος της μονάδας και για αυτόν τον λόγο δεν είναι απαραίτητη η τοποθέτηση του πυρηνικού σταθμού, κοντά σε μονάδες αφαλάτωσης που έχουν μόνο απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια. Δεδομένου ότι η ηλεκτρική σύνδεση είναι η μόνη διεπαφή, ο κίνδυνος ραδιενεργούς μόλυνσης του αφαλατωμένου νερού είναι ελάχιστος. Ωστόσο, η συνεγκατάσταση του πυρηνικού σταθμού και της μονάδας αφαλάτωσης προσφέρει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα. Οι εγκαταστάσεις των πυρηνικών - αφαλατωτικών μονάδων μπορούν να συνδιαχειρίζονται την εισαγωγή θαλασσινού νερού, τις δομές απόρριψης και απορροής, τις λοιπές εγκαταστάσεις και το προσωπικό. Αυτή η κοινή διάταξη των μονάδων καλείται όμορη ή παρακείμενη. Το νερό ψύξης του συμπυκνωτή της πυρηνικής μονάδας, συνήθως απορρίπτεται στην θάλασσα υπό την μορφή απόβλητης θερμότητας. Σε μια όμορη διάταξη υπάρχει η πιθανότητα χρησιμοποίησης αυτής της απόβλητης θερμότητας στο θαλασσινό νερό τροφοδοσίας της RO, βελτιώνοντας της απόδοση της μονάδας αφαλάτωσης. Κατά αυτόν τον τρόπο η αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας της RO, οδηγεί σε αύξηση της ροής διαμέσου των μεμβρανών και σε επακόλουθη αύξηση της παραγωγής καθαρού νερού από την ίδια μεμβρανική επιφάνεια. Μέσω της χρήσης κατάλληλης προεπεξεργασίας της τροφοδοσίας, σχεδιασμού του συστήματος και τεχνικών βελτιστοποίησης, μπορούν να επιτευχθούν ευρύτερες βελτιώσεις στην απόδοση στην μείωση του κόστους. Η βελτιστοποίηση των όμορων μονάδων πρέπει να γίνεται με διαφορετικό τρόπο από τις ανεξάρτητες.

#### **1.4.2 Σύζευξη μονάδων αφαλάτωσης με θερμικούς πυρηνικούς αντιδραστήρες**

Οι θερμικοί πυρηνικοί αντιδραστήρες είναι πιο απλοί ως προς την κατασκευή και την λειτουργία, καθώς δεν χρειάζονται στρόβιλο και άλλα βοηθητικά συστήματα για το ηλεκτρικό ρεύμα. Ωστόσο, οι απαιτήσεις ασφαλείας παραμένουν ίδιες με τα υπόλοιπα είδη αντιδραστήρων. Οι θερμικοί πυρηνικοί αντιδραστήρες χρησιμοποιούνται για την παροχή θέρμανσης σε κατοικημένες περιοχές (κυρίως στην Ρωσική Ομοσπονδία και στην Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας) και για την παροχή θερμότητας σε διάφορες διαδικασίες (π.χ. στον Καναδά). Γενικά, οι θερμικοί αντιδραστήρες για την παροχή θέρμανσης έχουν μικρότερο μέγεθος και είναι πιο συμπαγείς από αυτούς που παρέχουν θερμότητα για διάφορες διαδικασίες. Επίσης, δεν υπάρχουν τεχνικά προβλήματα ή προβλήματα ασφαλείας σχετικά με την εφαρμογή θερμικών πυρηνικών συστημάτων, ούτε ανησυχίες σχετικά με την πιθανή ραδιενεργή μόλυνση των συστημάτων παροχής θέρμανσης και θερμότητας.

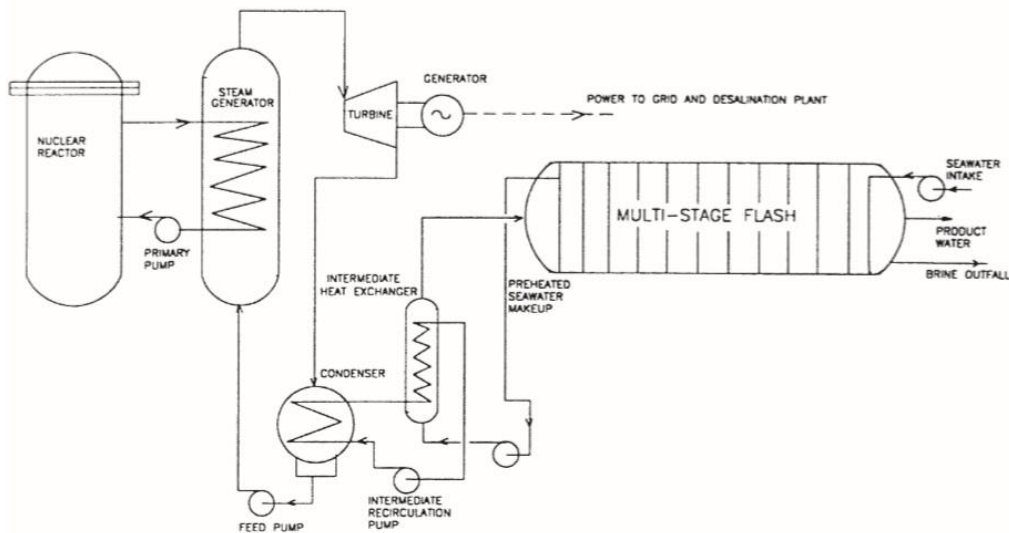
Στον θερμικό τύπο αντιδραστήρα γενικά, ο ατμός ή το ζεστό νερό που παράγεται από τον αντιδραστήρα, προμηθεύεται απευθείας σε κάποια μονάδα θερμικής αφαλάτωσης χωρίς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το ηλεκτρικό ρεύμα χρειάζεται για την άντληση των υδάτων και για βοηθητικά συστήματα και για αυτό παρέχεται από άλλη πηγή (π.χ. ένα ηλεκτρικό δίκτυο). Είναι επιθυμητό οι μονάδες αφαλάτωσης και πυρηνικής ενέργειας να είναι παρακείμενες και όμορες, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες θερμότητας και η ανάγκη μεγάλων δικτύων σωληνώσεων. Στους πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος, ο ατμός παράγεται υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, ενώ στους θερμικούς πυρηνικούς αντιδραστήρες απαιτείται μόνο ατμός χαμηλής θερμοκρασίας ή ζεστό νερό για τις θερμικές μεθόδους αφαλάτωσης. Οι θερμικές μέθοδοι αφαλάτωσης έχουν ένα μέγιστο όριο θερμοκρασίας περίπου 140 °C, λόγω της εκτεταμένης καθαλάτωσης πάνω από αυτήν την θερμοκρασία. Οι προσπάθειες που έγιναν για την λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης σε υψηλότερες θερμοκρασίες άλμης, μέσω της εφαρμογής βελτιωμένου ελέγχου της καθαλάτωσης, αποδείχθηκαν ασύμφωρες ως προς το κόστος. Έτσι οι θερμικοί πυρηνικοί αντιδραστήρες, που είναι σχεδιασμένοι για να παρέχουν ατμό στους 130 °C ή χαμηλότερα, έχουν τις περισσότερες προοπτικές για σύζευξη με μονάδες αφαλάτωσης.

#### **1.4.3 Σύζευξη μονάδων αφαλάτωσης με πυρηνικούς αντιδραστήρες συμπαραγωγής**

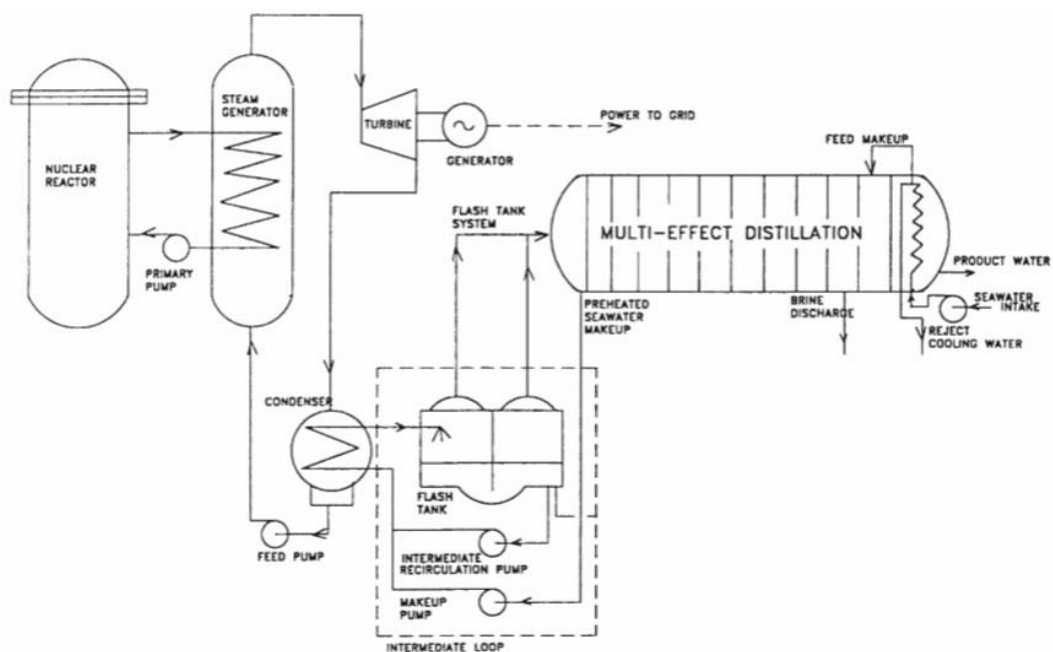
Στην περίπτωση πυρηνικών σταθμών που παράγουν θερμική και ηλεκτρική ενέργεια, ο ατμός μπορεί να αφαιρεθεί σε κατάλληλα σημεία του δευτερεύοντος κυκλώματος του πυρηνικού σταθμού για χρήση από την μονάδα αφαλάτωσης. Ωστόσο, σε όλα τα είδη και στάδια της συμπαραγωγής, πρέπει να συμπεριλαμβάνονται προστατευτικά φράγματα που θα εμποδίζουν την μεταφορά της οποιασδήποτε ποσότητας ραδιενέργειας. Υπάρχουν δύο είδη συμπαραγωγής, η παράλληλη και η συμπαραγωγή σε σειρά. Στην παράλληλη συμπαραγωγή, γίνεται παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μαζί με την παραγωγή αφαλατωμένου νερού, μέσω της προώθησης ενός τμήματος του ατμού σε ένα στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με συμβατικό τρόπο και ενός τμήματος ατμού πάλι στην μονάδα αφαλάτωσης. Αυτή η διαμόρφωση επιτρέπει αυξημένη ευελιξία ως προς την χρήση της ενέργειας, αλλά η συνολική κατανάλωση ενέργειας θα είναι ίδια με εκείνη που θα προέκυπτε από την παραγωγή ατμού για αφαλάτωση και ηλεκτρική ενέργεια ξεχωριστά. Στην συμπαραγωγή σε σειρά, η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος προκύπτει από την επέκταση και διάδοση του ατμού, πρώτα μέσα από έναν στρόβιλο αυξημένης πίεσης και μετά στην μονάδα αφαλάτωσης. Αυτή η μορφή συμπαραγωγής, έχει ως αποτέλεσμα την μειωμένη συνολική κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με την παράλληλη συμπαραγωγή. Από θερμοδυναμικής άποψης, είναι χρήσιμη η μετατροπή της πλειονότητας της ενθαλπίας του ατμού σε μηχανική/ηλεκτρική ενέργεια στον στροβιλοαντιδραστήρα πριν την χρήση της ως θερμαντικό μέσο σε μια θερμική μονάδα αφαλάτωσης για την παραγωγή αφαλατωμένου νερού. Η αύξηση της πίεσης του στροβίλου προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας της διαθέσιμης θερμότητας για την μονάδα αφαλάτωσης, αλλά μειώνει την ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Για αυτόν τον λόγο, στην συμπαραγωγή σε σειρά, η πίεση του στροβίλου πρέπει να βελτιστοποιείται σε σχέση με το συνολικό οικονομικό πλάνο της εγκατάστασης.



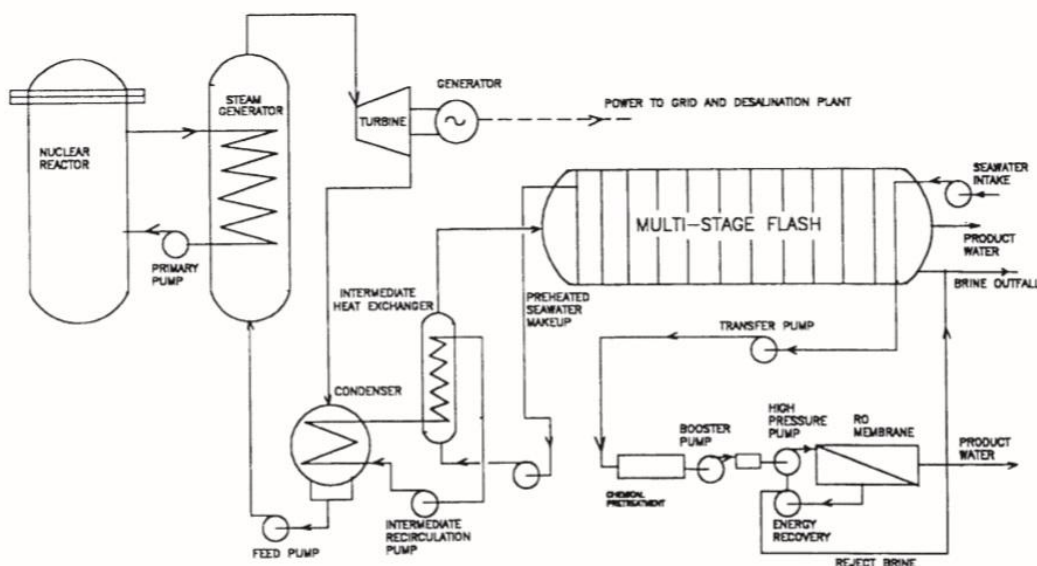
Η Εικ. 1.42 δείχνει μια διάταξη σύζευξης μιας μονάδας MSF και ενός πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος, μαζί με έναν ενδιάμεσο εναλλάκτη θερμότητας ως πρόσθετο βρόχο απομόνωσης. Η Εικ. 1.43 δείχνει μια διάταξη σύζευξης ενός πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος και μιας μονάδας MED. Το υβριδικό σύστημα στην ίδια τοποθεσία, παίζει σημαντικό ρόλο ως προς την μείωση του κόστους του νερού και ως προς την παραγωγή νερού ποικίλης ποιοτικής αξίας. Τέλος, η Εικ. 1.44 δείχνει μια διάταξη σύζευξης ενός πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος και μιας υβριδικής μονάδας MSF - RO.



**Εικόνα 1.42:** Διάταξη σύζευξης ενός πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος και μιας μονάδας αφαλάτωσης MSF



**Εικόνα 1.43:** Διάταξη σύζευξης ενός πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος και μιας μονάδας αφαλάτωσης MED



**Εικόνα 1.44:** Διάταξη σύζευξης ενός πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος και μιας υβριδικής μονάδας αφαλάτωσης MSF - RO

## 1.5 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ - ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Παρά τις τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της αφαλάτωσης, υπάρχουν ακόμα βασικές και πρακτικές προκλήσεις - προβλήματα που πρέπει να ξεπεραστούν, ώστε να έχουμε μέγιστη ανάκτηση πόσιμου νερού και ελάχιστη αποβολή υδάτων υψηλής αλατότητας με την λιγότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας.

- Ανεξερεύνητες ιδιότητες μεμβρανών αφαλάτωσης: Παρόλο που οι σταυρωτά συνδεδεμένες μεμβράνες RO FT-30 χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες οι μικρομοριακές λεπτομέρειες της δομής τους παραμένουν άγνωστες. Αυτή η έλλειψη γνώσης εμποδίζει την διασύνδεση των χημικών και μικρομοριακών δομικών τροποποιήσεων και για αυτόν τον λόγο καταβάλλονται προσπάθειες για την ανάπτυξη εργαλείων κατανόησης της δομής των μεμβρανών.
- Καθαλάτωση: Η ποσότητα των αλάτων στο νερό είναι ανάλογη της ποσότητας νερού που μπορεί να ανακτηθεί. Καθώς ένα διάλυμα αλάτων συμπυκνώνεται με την αφαίρεση νερού, πλησιάζει τον κορεσμό και μέσω της κρυστάλλωσης γίνεται στερεό. Η κρυσταλλική μορφή μπορεί να σχηματίσει μια κρούστα αλάτων (καθαλάτωση) στον εξοπλισμό και να προκαλέσει βλάβες σε αυτόν ή τις μεμβράνες. Η δυσκολία πρόβλεψης της εμφάνισης αυτού του φαινομένου είναι πολύπλοκη, ειδικά όταν υπάρχουν αρκετά είδη διαφορετικών αλάτων σε ένα διάλυμα και καθένα από αυτά έχει διαφορετικό επίπεδο κορεσμού. Ο έλεγχος της καθαλάτωσης αποτελεί πρόκληση για τους επιστήμονες που καλούνται να καθορίσουν αν, πότε και που θα γίνει η εμφάνιση του

φαινομένου, αναλύοντας την ποιότητα των υδάτων και βελτιώνοντας την τεχνολογία επεξεργασίας.

- Πρόσληψη θαλασσινού νερού και απόρριψη αλμόλοιπου: Κατά την πρόσληψη θαλασσινού νερού, υπάρχει η πιθανότητα εισχώρησης διάφορων βλαβερών υδρόβιων μικροοργανισμών στο σύστημα. Η αντιμετώπιση των μικροοργανισμών αυτών, γίνεται με την παγίδευση από διαχωριστικά φίλτρα των μεγαλύτερων μικροοργανισμών και με την εξολόθρευση των μικρότερων. Κατά την απόρριψη αλμόλοιπου τώρα, χωρίς κατάλληλη ανάμειξη με νερό, υπάρχει η πιθανότητα επιζήμιων επιπτώσεων στο φυσικό περιβάλλον. Τα εναπομείναντα ύδατα υψηλής αλατότητας πρέπει να τεθούν και αυτά υπό επεξεργασία, παρόλα αυτά δεν υπάρχει πληθώρα κατάλληλων τοποθεσιών για την απόρριψή τους. Συνήθως οι τοποθεσίες απόρριψης τέτοιων υδάτων είναι ο ωκεανός και οι λίμνες (εξάτμισης) για παράκτιες μονάδες αφαλάτωσης και για μονάδες της ενδοχώρας, αντίστοιχα. Άλλοι τρόποι απόρριψης είναι η αποβολή τους σε κάποιο δίκτυο αποχέτευσης με σκοπό την τελική επεξεργασία τους σε κάποια μονάδα επεξεργασίας λυμάτων, η έγχυση υπό πίεση μέσω ειδικών πηγαδιών στο υπέδαφος (όπως γίνεται στην Φλόριντα) και η σμίκρυνση και επαναχρησιμοποίηση των συστατικών της άλμης. Σε περιοχές με ξηρό κλίμα, υπάρχει η δυνατότητα για εξάτμιση και ενισχυμένη εξάτμιση.
- Έλλειψη αντοχής στο χλώριο στις μεμβράνες πολυαμιδίου: Το υποχλωριώδες νάτριο (λευκαντικό) είναι ευρέως διαδεδομένο στις μονάδες επεξεργασίας υδάτων για την αποφυγή ανάπτυξης βιοφίλμ στις επαπτόμενες με το νερό επιφάνειες, συμπεριλαμβανομένων και των διάφορων ειδών μεμβρανών. Αυτό όμως δεν αποτελεί επιλογή για της ευρείας χρήσης μεμβράνες πολυαμιδίου, λόγω της υψηλής επιρρέπειας σε καταστροφή από το χλώριο. Η ανάπτυξη μεμβρανών ανθεκτικών στο χλώριο είναι μια αναγκαιότητα.
- Ενεργειακό κόστος: Η ανάκτηση νερού από πηγές νερού υψηλής αλατότητας μπορεί να είναι μια διαδικασία με υψηλές απαιτήσεις ενέργειας Όσο αυξάνεται η αλατότητα, άλλο τόσο αυξάνεται και η απαιτούμενη πίεση και κατ' επέκταση η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για τον διαχωρισμό των αλάτων από το διάλυμα. Για θαλασσινό νερό (μέσης) αλατότητας 35,000 mg/lit, η θεωρητική τιμή της απαιτούμενης πίεσης που χρειάζεται για την υπερνίκηση της ωσμωτικής πίεσης και την εξαναγκασμένη ροή του νερού διαμέσου της μεμβράνης από την περιοχή υψηλής συγκέντρωσης αλάτων σε αυτή του καθαρού νερού είναι περίπου 700 psi. Για την αποχέτευση σε μια συνηθισμένη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων, η απαιτούμενη πίεση είναι περίπου 20 - 30 psi.

## **2. ΧΗΜΕΙΑ, ΜΙΚΡΟΒΙΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ**

### **2.1 ΧΗΜΕΙΑ ΝΕΡΟΥ**

#### **2.1.1 Χημική δομή του μορίου του νερού**

Το μόριο του νερού αποτελείται από ένα άτομο οξυγόνου και δύο άτομα υδρογόνου. Το ζεύγος ηλεκτρονίων που σχηματίζει τους δεσμούς, είναι μετατοπισμένο προς το μέρος του ηλεκτραρνητικότερου οξυγόνου και έτσι το συνολικό μόριο εμφανίζεται ως δίπολο με  $\delta^-$  φορτίο στο μέρος του οξυγόνου και  $\delta^+$  φορτίο στο μέρος των υδρογόνων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το  $\delta^+$  ενός μορίου νερού, να μπορεί να ενωθεί με το  $\delta^-$  ενός άλλου μορίου νερού με τον λεγόμενο δεσμό υδρογόνου. Ο δεσμός υδρογόνου έχει περίπου το ένα δέκατο της ισχύος ενός ομοιοπολικού δεσμού, αλλά είναι όμως αρκετά ισχυρός ούτως ώστε να κρατάει τα δύο μόρια σε επαφή.

#### **2.1.2 Φυσικές ιδιότητες του νερού**

Το νερό στην υγρή μορφή του εμφανίζει ιδιαιτερότητες στις φυσικές του ιδιότητες λόγω των δεσμών υδρογόνου, οι οποίοι διαμορφώνουν τα μεμονωμένα μόρια του νερού σε δομικές μονάδες πολλαπλάσιες από το απλό μόριο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι φυσικές του ιδιότητες να εμφανίζουν αυξημένες τιμές σε σχέση με τις αναμενόμενες για τα μεμονωμένα μόρια ή σε σχέση με άλλες ανάλογες ενώσεις, όπως π.χ. το  $H_2S$ , οι οποίες δεν σχηματίζουν δεσμούς υδρογόνου. Οι ιδιότητες αυτές είναι η θερμοχωρητικότητα, το σημείο ζέσης, η διηλεκτρική σταθερά, η επιφανειακή τάση και η θερμότητα τήξης, οι οποίες επηρεάζονται από την επιπλέον απαιτούμενη ενέργεια για την καταστροφή των δεσμών υδρογόνου.

#### **2.1.3 Ιδιαιτερότητες της πυκνότητας του νερού**

Το νερό παρουσιάζει την «ανωμαλία» να εμφανίζει την μεγαλύτερη πυκνότητά του στους  $4^\circ C$ , ενώ κανονικά αυτή έπρεπε να εμφανίζεται στους  $0^\circ C$  όταν το νερό γίνεται πάγος. Χάρη στην ιδιότητα αυτή ο πάγος είναι ελαφρύτερος από το νερό και επιπλέει, ενώ διαφορετικά σαν βαρύτερος θα βυθιζόταν στον πυθμένα των λιμνών και των θαλασσών και με τους νέους πάγους που θα συσσωρεύονταν από πάνω όλο το νερό θα πάγωνε με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ζωή (τουλάχιστον στην σημερινή της μορφή). Η ιδιότητα αυτή οφείλεται στην διαφορετική διάταξη των δεσμών υδρογόνου στα μόρια του νερού και στα μόρια του πάγου. Η τήξη του πάγου, όπως

και η τήξη όλων των στερεών, οφείλεται στο ότι οι δομικές μονάδες (μόρια) του στερεού αυξάνουν την παλινδρομική κίνηση περί μιας μέσης θέσης ισορροπίας που έχουν στο κρυσταλλικό πλέγμα, λόγω απορρόφησης θερμότητας κατά την αύξηση της θερμοκρασίας με αποτέλεσμα οι δομικές μονάδες να απομακρύνονται μεταξύ τους μέχρις ότου προκύψει η υγρή κατάσταση και η απομάκρυνση αυτή σταματήσει. Κατά την θέρμανση του πάγου από τους 0 °C αυξάνεται η κινητική ενέργεια των «συζευγμένων» μορίων και ένα ποσοστό των δεσμών υδρογόνου διασπάται, με αποτέλεσμα κάποια μόρια H<sub>2</sub>O να αποδεσμεύονται. Αυτό έχει ως συνέπεια ο όγκος του πάγου να μικραίνει, δηλαδή να εμφανίζει συστολή. Παράλληλα όμως, εμφανίζει και διαστολή λόγω της αύξησης της κίνησης των δομικών μονάδων. Στον πάγο 0 °C η συστολή είναι μεγαλύτερη της διαστολής και παραμένει μεγαλύτερη γιατί τα μόρια του H<sub>2</sub>O στους 0 °C και μέχρι τους 4 °C διατηρούν μια ψευδοκρυσταλλική κατάσταση. Αποτέλεσμα αυτού είναι η πυκνότητα να αυξάνεται μέχρι τους 4 °C (όπου το νερό εμφανίζει την μεγαλύτερη πυκνότητα) και μετά τους 4 °C η διαστολή να υπερτερεί της συστολής με την πυκνότητα να αποκτά την κανονική της τιμή.

#### 2.1.4 Ιδιαιτερότητες του σημείου ζέσεως

Το καθαρό νερό έχει σημείο ζέσης 100 °C και σημείο πήξης 0 °C. Το σημείο ζέσης παρουσιάζεται αυξημένο, σε σχέση με το θεωρητικά αναμενόμενο, σε σύγκριση με άλλα υδρίδια στοιχείων της ίδιας ομάδας του περιοδικού πίνακα τα οποία είναι αέρια σε θερμοκρασίες δωματίου (π.χ. το H<sub>2</sub>S). Η ιδιότητα αυτή οφείλεται στους δεσμούς υδρογόνου που συγκροτούν τα τριμερή μόρια, τα οποία κατά τη θέρμανση του υγρού απορροφούν θερμότητα πρώτα για να διασπασθούν οι δεσμοί υδρογόνου (λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης) και μετά για να εξαερωθούν τα μεμονωμένα μόρια του υγρού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανύψωση του σημείου ζέσεως στους 100 °C. Η ιδιότητα αυτή είναι σημαντική γιατί το νερό παραμένει ως υγρό σε ευρεία περιοχή θερμοκρασιών (0 °C - 100 °C) και ιδιαίτερα στις συνήθεις θερμοκρασίες 15 - 35 °C, όπου εκδηλώνονται οι συνήθεις χημικές και φυσικές δράσεις στο περιβάλλον. Ιδιαίτερα στις βιοχημικές αντιδράσεις οξειδωσης που γίνονται στον οργανισμό, η εκλυόμενη θερμότητα απορροφάται από το νερό και δεν επιδρά καταστροφικά στα διάφορα γειτονικά οργανίδια.

#### 2.1.5 Το νερό ως διαλύτης

Το νερό είναι άριστος διαλύτης και για ανόργανες και για οργανικές ουσίες λόγω της διπολικότητας δ<sup>+</sup> και δ<sup>-</sup> που εμφανίζει το μόριό του. Στις ιοντικές ανόργανες ενώσεις, (π.χ. στο αλάτι, το κρυσταλλικό πλέγμα αποτελείται από ιόντα Na<sup>+</sup> και Cl<sup>-</sup>), το νερό με την πρόσκρουσή του στο κρυσταλλικό πλέγμα τους αποσπά εύκολα τα θετικά ιόντα (κατιόντα), καθώς αυτά ελκύνονται από τον δ<sup>-</sup> πόλο του και μετά τα περιβάλλει με τα μόριά του. Το ίδιο γίνεται και με τα αρνητικά ιόντα (ανιόντα), με τους δ<sup>+</sup> πόλους του μορίου του νερού. Στις ομοιοπολικές ανόργανες ενώσεις (είτε πολικές είτε μη πολικές), η διάλυση γίνεται λιγότερο εύκολα και πάλι με τη δράση του δ<sup>+</sup> και δ<sup>-</sup> φορτίου του μορίου αλλά και όταν οι δυνάμεις συνάφειας μεταξύ νερού και ουσίας υπερνικούν τις δυνάμεις συνάφειας μεταξύ των σωματιδίων (μορίων) της ουσίας. Στις οργανικές ενώσεις με πολικές ομάδες (π.χ. αλκοόλες, αλδεΐδες, κετόνες, οξέα μικρής αλυσίδας ατόμων άνθρακα), λειτουργεί και πάλι ο μηχανισμός της διάλυσης διαμέσου

του  $\delta^+$  και  $\delta^-$  φορτίου αλλά και ο μηχανισμός των δυνάμεων συνάφειας. Οι οργανικές ενώσεις μακριάς αλυσίδας ατόμων άνθρακα (λιπαρές αλυσίδες) δεν διαλύονται στο νερό, αλλά όμως το νερό συμβάλλει στην διασπορά τους μετά από τη χρήση σαπώνων, απορρυπαντικών ή γαλακτωματοποιητών.

### 2.1.6 Είδη - κατηγορίες νερού

Το νερό ανάλογα με την προέλευσή του, την επεξεργασία ή την χρήση του μπορεί να διακριθεί σε είδη - κατηγορίες. Οι κατηγορίες νερού αναφέρονται και αναλύονται παρακάτω.

**Νερό της βροχής (βρόχινο νερό):**

Είναι το νερό που επανέρχεται στην επιφάνεια της γης από τα σύννεφα με την μορφή βροχής, μετά από υγροποίηση των υδρατμών του σε κατάλληλες κλιματολογικές συνθήκες. Είναι η καθαρότερη μορφή φυσικού νερού, όταν δεν έχει επιμολυνθεί κατά την διαδρομή του από τα συστατικά της ατμόσφαιρας. Ως μη επιβλαβή συστατικά μπορεί να περιέχει διαλυμένο οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα και ως επιβλαβή οξείδια του θείου και του αζώτου, σκόνη κ.ά. από την ατμόσφαιρα.

**Φυσικό νερό:**

Είναι το νερό που υπάρχει στην φύση, δηλαδή στους ποταμούς, στις λίμνες και στις επιφανειακές ή υπόγειες πηγές. Το φυσικό νερό μπορεί να είναι πόσιμο ή να μετατραπεί σε πόσιμο μετά από κατάλληλη επεξεργασία. Είναι κατάλληλο για αρδευτικές και μερικές βιομηχανικές χρήσεις.

**Πόσιμο νερό:**

Είναι το νερό που είναι κατάλληλο για πόση και μπορεί να είναι φυσικό νερό, νερό επεξεργασίας - διύλισης ή αφαλάτωσης. Το πόσιμο νερό πρέπει να είναι άχρωμο και άοσμο, αλλά με ευχάριστη αίσθηση γεύσης λόγω των περιεχομένων αλάτων.

**Νερό της θάλασσας (θαλασσινό νερό):**

Είναι το νερό που περιέχει διαλυμένο χλωριούχο νάτριο σε σχετικά μεγάλη αναλογία (περίπου 3%) και δεν είναι πόσιμο. Περιέχει επίσης διαλυμένες και πολλές άλλες ανόργανες κυρίως ενώσεις καλίου, μαγνησίου, ασβεστίου κ.ά. αλλά σε πολύ μικρότερες αναλογίες από ότι το χλωριούχο νάτριο.

**Πηγαίο νερό:**

Είναι το φυσικό νερό που προέρχεται από υπόγεια ύδατα και είτε αντλείται στην επιφάνεια είτε αναβλύζει μόνο του (αρτεσιανό). Είναι συνήθως απαλλαγμένο μικροοργανισμών, γιατί σε βάθος μεγαλύτερο των τεσσάρων μέτρων δεν υπάρχουν μικροοργανισμοί.

**Μεταλλικό νερό:**

Είναι το φυσικό πόσιμο νερό που περιέχει διοξείδιο του άνθρακα, διαλυμένες ουσίες περισσότερες από 1 g/lit, σπάνιες ενώσεις σε ποσοστά μεγαλύτερα από τα συνήθη ή έχει θερμοκρασία εξόδου μεγαλύτερη από 20 °C και δεν έχει υποστεί καμία άλλη επεξεργασία.

**Τεχνητό μεταλλικό νερό:**

Είναι το πόσιμο νερό στο οποίο έχουν προστεθεί φυσικό μεταλλικό νερό ή φυσικά πηγαία άλατα.

**Φυσιολογικός ορός:**

Είναι το νερό που περιέχει NaCl 0.9%.

**Διυλισμένο νερό ή νερό δικτύου ύδρευσης:**

Είναι το φυσικό νερό που έχει υποστεί επεξεργασία με διύλιση και έχει καταστεί πόσιμο. Η επεξεργασία περιλαμβάνει κυρίως την χλωρίωση (με χλωριούχο νερό,  $\text{Cl}_2+6\text{H}_2\text{O}$ ) για τη θανάτωση των μικροοργανισμών, την καθίζηση στερεών εναιωρημάτων (με θειικό αργίλιο) και την διήθηση (με κρυσταλλική άμμο). Σε μερικές περιπτώσεις γίνεται και φθορίωση.

Χλωριωμένο νερό:

Είναι το φυσικό νερό που έχει υποστεί χλωρίωση για την θανάτωση των μικροοργανισμών.

Αποσταγμένο νερό:

Είναι το νερό που έχει ληφθεί μετά από απόσταξη οποιουδήποτε νερού. Είναι η καθαρότερη μορφή νερού, αλλά δεν είναι ευχάριστο στην πόση γιατί δεν περιέχει διαλυμένα άλατα.

Απιονισμένο νερό:

Είναι το νερό που έχει απαλλαχθεί από τα διαλυμένα θετικά και αρνητικά ιόντα διαφόρων αλάτων, τα οποία και αντικαθίστανται από ανιόντα υδροξειδίου ( $\text{OH}^-$ ) και κατιόντα υδρογόνου ( $\text{H}^+$ ), αντίστοιχα. Ο απιονισμός γίνεται με τους απιονιστήρες, οι οποίοι είναι κυλινδρικά δοχεία γεμάτα με ιοντοανταλλακτικές ρητίνες μέσω των οποίων διαβιβάζεται το προς καθαρισμό νερό. Οι χρησιμοποιημένες ρητίνες περιέχουν τα ιόντα των αλάτων του νερού και «αναγεννώνται» από την αλληλεπίδρασή τους με αραιά διαλύματα οξέων και βάσεων, διαδοχικά. Το απιονισμένο νερό είναι υψηλής καθαρότητας και χρησιμοποιείται ευρέως στα εργαστήρια, δεν είναι όμως απαλλαγμένο από διαλυμένα αέρια, οργανικές ουσίες και βακτήρια.

Υπερ-καθαρό νερό:

Είναι το απιονισμένο νερό που είναι απαλλαγμένο από αέρια, οργανικές ουσίες και βακτήρια μέσω της χρήσης ρητινών υψηλής απόδοσης και φίλτρων μικροοργανισμών.

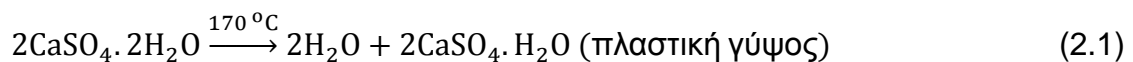
Αφαλατωμένο νερό:

Είναι το νερό που λαμβάνεται από το θαλασσινό νερό με απομάκρυνση των διαφόρων αλάτων του.

Κρυσταλλικό νερό:

Είναι το νερό του οποίου τα μόρια, είναι ενωμένα με τα μόρια ενός κρυσταλλικού άλατος. Τα μόρια του κρυσταλλικού νερού συμμετέχουν πάντοτε με καθορισμένη αναλογία (π.χ.  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  κ.ά.). Η απομάκρυνση του κρυσταλλικού νερού γίνεται με θέρμανση συνήθως στους  $110^\circ\text{C}$  -  $250^\circ\text{C}$  σε πυριαντήριο (εξ. 2.1, 2.2).

Π.χ.



Χημικά ενωμένο νερό ή Χημικό νερό:

Είναι το νερό του οποίου τα άτομα οξυγόνου και υδρογόνου βρίσκονται σε αναλογία 1:2, αντίστοιχα. Τέτοια άτομα είναι και αυτά που συμμετέχουν στη δομή των μορίων ορισμένων οξέων και βάσεων βαρέων μετάλλων και τα οποία κατά την πύρωση (εξ. 2.3, 2.4) αποβάλλονται ως μόρια νερού, υπό ταυτόχρονο σχηματισμό οξειδίων των μετάλλων και ενίοτε και άλλων προϊόντων.

Π.χ.



Η πύρωση γίνεται σε κάμινο σε θερμοκρασίες συνήθως μεγαλύτερες των 1,000 °C και το στερεό (π.χ. οξειδίο) που απομένει, ως μη περαιτέρω διασπάσιμο, χαρακτηρίζεται ως τέφρα.

### 2.1.7 Σκληρότητα νερού

Ως σκληρότητα του νερού, νοείται η περιεκτικότητά του σε συνολικά ανόργανα άλατα και εκφράζεται μέσω της περιεκτικότητας σε  $\text{CaCO}_3$  ή σε  $\text{CaO}$ . Η σκληρότητα μετράται σε γαλλικούς ( $f^\circ$ ) και σε γερμανικούς ( $d^\circ$ ) βαθμούς, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$1f^\circ = 10 \text{ ppm } \text{CaCO}_3 \text{ (mg/lit)}$$

$$1d^\circ = 10 \text{ ppm } \text{CaO} \text{ (mg/lit)}$$

Οι γαλλικοί και οι γερμανικοί βαθμοί συνδέονται με την παρακάτω σχέση:

$$1.001 f^\circ = 0.561 d^\circ.$$

Η κλίμακα της σκληρότητας έχει ως εξής:

Απιονισμένο:  $d^\circ = 0 - 1$

Πολύ μαλακό:  $d^\circ < 8 - 16$

Μέτριο:  $d^\circ = 16 - 32$

Σκληρό:  $d^\circ = 32 - 64$

Πολύ σκληρό:  $d^\circ > 64$

### 2.1.8 Χημικοί παράγοντες και υγειονομικός αντίκτυπος

Το νερό περιέχει διάφορα στοιχεία όπως ανθρακικά άλατα, ασβέστιο, μαγνήσιο, νάτριο, κάλιο, αρσενικό, φθόριο, ραδιενεργές ουσίες, αλουμίνιο, χλώριο, φωσφορικά άλατα, τριαλογονομεθάνια (THM), σίδηρο, μόλυβδο, χαλκό, φυτοφάρμακα - εντομοκτόνα που προστίθενται σε αυτό από διάφορες πηγές όπως τα συστήματα επεξεργασίας και διανομής του νερού, το υπέδαφος, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες και οι μολυσμένες από βαρέα μέταλλα ή βιομηχανικά απόβλητα περιοχές. Η βιομηχανία είναι μια σημαντική πηγή μόλυνσης του νερού. Οι βιομηχανικοί ρύποι που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα, περιέχουν πληθώρα τοξικών μεταλλικών στοιχείων που είναι πιθανόν να καταλήξουν στον υδροφόρο ορίζοντα και να τον μολύνουν. Τα εδάφη γεωργικής καλλιέργειας είναι επίσης πλούσια σε τοξικά μεταλλικά στοιχεία λόγω των ποικίλων φωσφορικών λιπασμάτων, της οργανικής ύλης, των εντομοκτόνων και επιπλέον λόγω της παρουσίας φυτικής και ζωικής αποσύνθεσης. Η άρδευση με υγρά απόβλητα και λύματα, επίσης αυξάνει την ποσότητα βαρέων μετάλλων στα γεωργικά εδάφη. Η μόλυνση του νερού μπορεί να προκληθεί από την απορροή αυτών των υδάτων μαζί με την διάβρωση του εδάφους. Η παρουσία των μετάλλων γενικά στο νερό, είναι φυσιολογική και συνηθισμένη, ουσιαστικά πολλά από αυτά είναι απαραίτητα για την επιβίωση του ανθρώπου. Το ασβέστιο, το μαγνήσιο, το κάλιο, το νάτριο, ο χαλκός και ο σίδηρος είναι απαραίτητα



για τις φυσιολογικές λειτουργίες του οργανισμού. Το πόσιμο νερό όμως με αυξημένη περιεκτικότητα σε τοξικά μέταλλα όπως το αλουμίνιο, το αρσενικό, το βάριο, το κάδμιο, το χρώμιο, ο μόλυβδος, ο υδράργυρος, το σελήνιο, το μαγγάνιο, το μολυβδαίνιο, το κοβάλτιο, ο άργυρος και ο ψευδάργυρος μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση χρόνιων παθήσεων. Παραδείγματα χρόνιων παθήσεων είναι ο καρκίνος, οι γενετικές ανωμαλίες, βλάβες στο νευρικό και το ανοσοποιητικό σύστημα κ.ά. Ο μόλυβδος (Pb), ο ψευδάργυρος (Zn), ο χαλκός (Cu), το μαγγάνιο (Mn), το κοβάλτιο (Co), το νικέλιο (Ni), το κάδμιο (Cd), το χρώμιο (Cr) και το μολυβδαίνιο (Mo) είναι τοξικοί και καρκινογόνοι παράγοντες που μπορούν να εμφανιστούν ως μολυντές στο πόσιμο νερό. Παρακάτω περιγράφονται κάποια χημικά στοιχεία με τοξικό ή πιθανόν τοξικό αντίκτυπο στον άνθρωπο.

**Νιτρικά άλατα:**

Τα νιτρικά άλατα μπορούν να ανιχνευθούν σε όλα τα ύδατα σε μικρές ποσότητες. Υψηλές συγκεντρώσεις μπορούν να προκληθούν λόγω νιτρικού καλίου, γεωργικών λιπασμάτων αλλά και λόγω των διαδικασιών αποικοδόμησης και οξείδωσης οργανικών και ανόργανων ουσιών. Το πόσιμο νερό με αυξημένη περιεκτικότητα νιτρικών αλάτων μπορεί να προκαλέσει μεθαιμοσφαιριναιμία στα παιδιά βρεφικής ηλικίας. Ο καθαρισμός του νερού από νιτρικά άλατα γίνεται με βιολογική απονίτρωση και ιοντοανταλλαγή.

**Μόλυβδος:**

Ο μόλυβδος είναι ένα επικίνδυνο στοιχείο, είναι επιζήμιο ακόμα και σε μικρές ποσότητες και μπορεί να εισέλθει στον ανθρώπινο οργανισμό με ποικίλους τρόπους. Η κύρια πηγή μόλυνσης του πόσιμου νερού από μόλυβδο είναι οι υδραυλικές σωληνώσεις και η βιομηχανία. Σε περιόδους στασιμότητας τα ύδατα των σωληνώσεων παραμένουν λιμνάζοντα και η συγκέντρωση μολύβδου σε αυτά, αυξάνεται. Μια επίστρωση από ανθρακικό ασβέστιο, μπορεί να εμποδίσει την επαφή του πόσιμου ύδατος με την μεταλλική επιφάνεια και συνεπώς την μόλυνση του. Η διάβρωση των σωληνώσεων αυξάνει την συγκέντρωση μολύβδου, ειδικά όταν τα παρόντα ύδατα είναι όξινα. Η έκθεση στον μόλυβδο είναι σωρευτική ανά τον χρόνο και η υψηλή συγκέντρωση μολύβδου στον ανθρώπινο οργανισμό μπορεί να προκαλέσει τον θάνατο ή μόνιμες βλάβες στο κεντρικό νευρικό σύστημα, στον εγκέφαλο και στα νεφρά. Αυτές οι βλάβες με την σειρά τους, προκαλούν μαθησιακά προβλήματα και προβλήματα συμπεριφοράς, συγκέντρωσης και μνήμης, υψηλή αρτηριακή πίεση, προβλήματα ακοής, κεφαλαλγίες, προβλήματα αναπαραγωγής σε άνδρες και γυναίκες, προβλήματα στο πεπτικό σύστημα και πόνους στους μύες και τις αρθρώσεις. Επίσης, μόλυβδος μπορεί να ανιχνευθεί και σε αρκετά τρόφιμα, κυρίως στα ψάρια λόγω της βιομηχανικής ρύπανσης. Για την λύση του προβλήματος της διαλυτότητας του μολύβδου στο νερό υπάρχουν χημικές και ηλεκτροχημικές μέθοδοι αντιμετώπισης.

**Κάδμιο:**

Το κάδμιο αποτελεί τοξικό ιχνοστοιχείο και μπορεί να ανιχνευθεί στα βιομηχανικά ύδατα, στο πετρέλαιο και στα μολυσμένα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα που προορίζονται για πόσιμα και συχνά σε συνδυασμό με τον ψευδάργυρο. Το κάδμιο συσσωρεύεται στο ανθρώπινο σώμα με την ηλικία, ειδικά στα νεφρά και μπορεί επίσης να προκαλέσει καρκινικές και καρδιαγγειακές νόσους. Σε χαμηλή συγκέντρωση, μπορεί να προκαλέσει βήχα, πονοκεφάλους και εμετό και σε υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να συσσωρευτεί στο ήπαρ και στα νεφρά και να αντικαταστήσει το ασβέστιο στα οστά (όπως και ο μόλυβδος). Επίσης, σχετίζεται με την νεφρική ανεπάρκεια, την υπέρταση και την χρόνια αναιμία και μπορεί να

παρέμβει στην ικανότητα της μεταλλοθειονίνης να ρυθμίζει τα επίπεδα ψευδαργύρου και χαλκού στον ανθρώπινο οργανισμό. Η μεταλλοθειονίνη είναι μια πρωτεΐνη που δεσμεύει την περίσσεια των τοξικών μετάλλων και τα αδρανοποιεί, η παρουσία όμως καδμίου διακόπτει την διαδικασία αυτή και προκαλεί διαταραχές στην ομοίωση του οργανισμού.

**Χαλκός:**

Ο χαλκός είναι μια απαραίτητη ουσία για τον άνθρωπο, αλλά η χρόνια έκθεση σε μολυσμένο νερό με χαλκό μπορεί να προκαλέσει αναιμία, βλάβες στο ήπαρ (κίρρωση ήπατος) και στα νεφρά, διάρροια, κοιλιακούς πόνους, ναυτία, εμετό και κεφαλαλγία. Ο χαλκός σε υψηλές συγκεντρώσεις είναι επικίνδυνος για τα παιδιά και για τους ενήλικες με συγκεκριμένες μεταβολικές διαταραχές. Η πηγή μόλυνσης του πόσιμου νερού με χαλκό είναι η διάβρωση των σωλήνων ύδρευσης και τα βιομηχανικά λύματα. Επίσης, χαλκός στο πόσιμο νερό μπορεί να προκύψει και από διάφορα προσθετικά σχεδιασμένα για τον έλεγχο ανάπτυξης της άλγης. Από την άλλη μεριά, η έλλειψη χαλκού από τον οργανισμό έχει ως αποτέλεσμα αναπτυξιακά προβλήματα και προβλήματα στην κυκλοφορία του αίματος.

**Μολυβδαίνιο:**

Το μολυβδαίνιο είναι ένα αναγκαίο θρεπτικό στοιχείο για τον άνθρωπο και αποτελεί συστατικό αρκετών ενζύμων όπως η ξανθοξειδάση, η θειώδης οξειδάση και η αλδεϋδική οξειδάση. Υπάρχει σε μικρές ποσότητες στον ανθρώπινο οργανισμό και μπορεί να ανιχνευθεί στο ήπαρ, στα νεφρά και στα οστά. Είναι απαραίτητο για την μετατροπή της πουρίνης σε ουρικό οξύ, αλλά η υψηλή συγκέντρωσή του μπορεί να οδηγήσει σε πόνους και οίδημα των αρθρώσεων και σε αύξηση του ουρικού οξέος στο αίμα. Επίσης, μπορεί να προκαλέσει αποβολή του χαλκού από τον οργανισμό.

**Νικέλιο:**

Το νικέλιο είναι ένα σημαντικό ιχνοστοιχείο, αλλά τοξικό σε μεγάλες ποσότητες για τον άνθρωπο. Θεωρείται καρκινογόνο και η ρύπανση του νερού από αυτό πηγάζει από βιομηχανικές και γεωργικές δραστηριότητες. Η τοξικότητά του αυξάνεται με την παρουσία και άλλων μετάλλων όπως το κοβάλτιο, ο χαλκός, ο σίδηρος και ο ψευδάργυρος. Υπάρχουν αρκετές μελέτες που δείχνουν ότι η έκθεση στο νικέλιο μπορεί να προκαλέσει ερεθισμό του δέρματος, τριχόπτωση και την επιδείνωση των εκζεμάτων.

**Χρώμιο:**

Το χρώμιο είναι ένα βασικό στοιχείο για τα ζώα και τον άνθρωπο. Σε υπερβολικές ποσότητες μπορεί να γίνει τοξικό, ειδικά όταν έχει εξασθενή μορφή (εξασθενές χρώμιο). Η ρύπανση των υδάτων από το χρώμιο πηγάζει από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (βιομηχανία, γεωργία κλπ.). Η γαλβανοποίηση μπορεί να απελευθερώσει χρωμικό οξύ σε μορφή αεροζόλ (μαζί με τριοξείδιο του χρωμίου σε αέρια μορφή), το οποίο προκαλεί διάφορες δερματίτιδες και βλάβες στους πνεύμονες. Η μακροχρόνια έκθεση σε χρώμιο μπορεί να προκαλέσει βλάβες στα νεφρά, στο ήπαρ, στο κυκλοφορικό σύστημα και στους νευρικούς ιστούς. Επιπλέον, το χρώμιο μπορεί να ανιχνευθεί και σε υδρόβιους οργανισμούς που καταναλώνονται από τον άνθρωπο όπως τα ψάρια (ακόμα και σε υψηλά επίπεδα), θέτοντας σε κίνδυνο την υγεία του.

**Φυτοφάρμακα:**

Τα φυτοφάρμακα βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στον κλάδο της γεωργίας. Μπορούν να μεταφερθούν στο υπέδαφος μέσω της αποστράγγισης και σε άλλα τμήματα του επιφανειακού εδάφους μέσω των υδάτων απόρριψης. Συνήθως ένα

μικρό μέρος των εφαρμοζόμενων φυτοφαρμάκων εισχωρεί στο νερό. Επιπλέον, με το που θα βρεθούν στο περιβάλλον υποβάλλονται σε πολλές διεργασίες αποικοδόμησης. Πράγματι, αρκετά από αυτά ελκύονται περισσότερο από το έδαφος παρά από το νερό και χαρακτηρίζονται από περιορισμένη κινητικότητα. Οι περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις εξαρτώνται από τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες. Εκτός όμως από τις εγγενείς ιδιότητες τους ποικίλοι άλλοι παράγοντες επηρεάζουν την μόλυνση των υδάτων όπως το είδος της καλλιέργειας, ο ρυθμός και η συχνότητα εφαρμογής, η συνολική χρήση, τα χαρακτηριστικά του εδάφους (η φύση του εδάφους και η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη), τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά και οι κλιματικές συνθήκες. Η μόλυνση των επιφανειακών υδάτων εξαρτάται από την εποχή και έχει σύντομη διάρκεια ζωής. Τα υπόγεια ύδατα προστατεύονται περισσότερο και θεωρούνται καλύτερης ποιότητας από τα επιφανειακά. Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι το κύριο μέρος της μόλυνσης των υδάτων οφείλεται σε σχετικά λίγες χημικές ενώσεις. Για παράδειγμα, ατραζίνη, τερβουθλαζίνη, βενταζόνη, MCPP, ισοπροτουρόνη, εξαζινόνη, διχλωροβενζαμίδιο, DTZ ατραζίνη, AAZ ατραζίνη, βενταζόνη, DCMU, MCPA και οξαδιαζόν. Οι λιποφιλικές χημικές ενώσεις όπως το DDT αλληλεπιδρούν έντονα με τα σωματίδια του εδάφους, είναι ουσιαστικά ακίνητα και δεν θεωρούνται μολυντές του νερού.

### **2.1.9 Αφαίρεση βαρέων μετάλλων και τοξικών μεταλλικών στοιχείων από υδατικά διαλύματα**

Η αποβολή βαρέων μετάλλων και τοξικών μεταλλικών στοιχείων σε κοινοτικά αποχετευτικά συστήματα και στο υδατικό περιβάλλον, προκαλεί δυσμενείς επιπτώσεις στο οικοσύστημα και στην ανθρώπινη υγεία. Λόγω της υψηλής κινητικότητας των μετάλλων στο περιβάλλον, υπάρχει η τάση τα μέταλλα αυτά να απορροφώνται από τους ζωντανούς οργανισμούς και να συσσωρεύονται στα φυτά και την υδρόβια ζωή. Οι διάφορες διαδικασίες εξόρυξης αποτελούν σημαντική πηγή μόλυνσης του περιβάλλοντος με τοξικά μέταλλα. Η μόλυνση μπορεί να προκύψει από το χώμα ή από θραύσματα βράχων, από την απορροή των υδάτων αποχέτευσης των περιοχών εξόρυξης (ορυχεία), από την εξαγωγή υδάτων κ.ά. Άλλες, βιομηχανικές κυρίως, πηγές μόλυνσης είναι οι διάφορες διαδικασίες επιμετάλλωσης, η κατασκευή και παραγωγή μπαταριών, η βυρσοδεψία, η διύλιση του πετρελαίου και οι διάφορες βιομηχανίες τυπογραφίας.

Υπάρχει ένα μεγάλο εύρος τεχνολογιών, που χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση των βαρέων μετάλλων από το νερό και τα λύματα. Η χημική κατακρήμνιση - ιζηματοποίηση καθώς και η συσσωμάτωση - κροκίδωση υπό την λειτουργία υψηλού pH θεωρούνται απλές μέθοδοι χαμηλού κόστους για την επεξεργασία λυμάτων με υψηλές συγκεντρώσεις μεταλλικών στοιχείων. Για την μείωση των ρυπαντών σε οριακό επίπεδο απαιτείται πληθώρα χημικών ουσιών και για την παραγόμενη λάσπη, απαιτείται ασφαλής αποβολή ή εναπόθεση που δεν θα επηρεάζει μακροπρόθεσμα το περιβάλλον. Γενικά, επειδή τα ιζηματοποιημένα υγρά απόβλητα δεν μπορούν να υποβληθούν σε αυστηρά όρια απόρριψης, καθίσταται υποχρεωτική η επακόλουθη φυσικοχημική επεξεργασία τους για την συμμόρφωση με τους κανονισμούς αποβολής.

Η ιοντοανταλλαγή είναι μια ευρέως διαδεδομένη, σε βιομηχανικό επίπεδο, διαδικασία για την αφαίρεση βαρέων μετάλλων από τα λύματα λόγω της υψηλής αποδοτικότητας και κινητικότητας, του μειωμένου παραγόμενου όγκου απόρριψης

και της συμμόρφωσης με τους αυστηρούς κανονισμούς αποβολής. Κατά την διεργασία της ιοντοανταλλαγής, τα ιόντα μετάλλων του απορριπτόμενου διαλύματος ανταλλάσσονται με τα ιόντα της μήτρας της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης. Το pH της διεργασίας είναι συνήθως όξινο με εύρος τιμών από 2 - 6 και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των ιοντοανταλλακτικών ρητινών. Μόλις πληρωθεί η χωρητικότητα της ιοντοανταλλακτικής ρητίνης, αυτή αναγεννάται με έναν συμπυκνωμένο ηλεκτρολύτη όπως π.χ. ένα ισχυρό οξύ. Η ανάκτηση των χρήσιμων και πολύτιμων μεταλλικών στοιχείων από τα απορριπτόμενα διαλύματα, γίνεται μέσω κατάλληλων χημικών ουσιών αντίδρασης. Τα λύματα συνήθως χρειάζονται εντατική προεπεξεργασία για την αποτροπή της εμφάνισης καθαλάτωσης και της μόλυνσης των ιοντοανταλλακτικών ρητινών.

Μια ακόμα αποτελεσματική και οικονομική μέθοδος διαχωρισμού των βαρέων μετάλλων από τα υγρά απόβλητα είναι και η προσρόφηση - επίζηση. Η προσρόφηση προσφέρει μεγάλη ευελιξία ως προς τον σχεδιασμό και την λειτουργία και σε πολλές περιπτώσεις οδηγεί στην παραγωγή επεξεργασμένων λυμάτων υψηλής ποιότητας. Ένα ευρύ φάσμα απορροφητικών στοιχείων και ουσιών έχει ερευνηθεί για τον σκοπό αυτό όπως ο ενεργός άνθρακας, οι νανοσωλήνες άνθρακα και τα παράγωγα των προϊόντων άνθρακα όπως τα διάφορα προσθετικά και οι συνθέσεις ενεργού άνθρακα. Διάφορες μελέτες που έχουν γίνει, έχουν αναδείξει στοιχεία όπως ο φυσικός ζεόλιθος και ο μπεντονίτης (ιλυόλιθος), σε μη κοστοβόρα εναλλακτικά απορροφητικά στοιχεία του ενεργού άνθρακα. Οι περιορισμοί της επίζησης είναι η χαμηλή ικανότητα προσρόφησης, η χαμηλή εκλεκτικότητα και η αργή πορώδης διάχυση των ιόντων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η προσρόφηση είναι μη αναστρέψιμη και τα απορροφητικά που φέρουν βαρέα μέταλλα πρέπει να απορριφθούν.

Στην αφαίρεση των βαρέων μετάλλων υπό την μορφή αιωρούμενων στερεών και διαλυμένων ιόντων, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και οι μέθοδοι μεμβρανών. Η μικροδιήθηση (microfiltration, MF) και η υπερδιήθηση (ultrafiltration, UF) χρησιμοποιούν διαπερατές μεμβράνες για τον διαχωρισμό σωματιδίων και κolloειδών βαρέων μετάλλων. Για την βελτίωση της αποδοτικότητας της αφαίρεσης, οι μεμβράνες MF και UF μπορούν να τροποποιηθούν για να αυξηθεί η πολυπλοκότητά τους και η δέσμευση μεταλλικών στοιχείων ή να συνδυαστούν με άλλες διαδικασίες όπως η επίζηση και η συσσωμάτωση. Οι μεμβράνες NF και RO χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση διαλυμένων ιόντων μετάλλων, με την αποτελεσματικότητα της αφαίρεσης να εξαρτάται από το pH της τροφοδοσίας, την πίεση, την ροή του διηθήματος, τις συγκεντρώσεις των διαφόρων μετάλλων και τις ιδιότητες των μεμβρανών όπως το μέγεθος των πόρων και τα (ηλεκτρικά φορτία) των επιφανειών των μεμβρανών. Για τις «φαρδιές» και «χαλαρές» μεμβράνες NF, η απόρριψη αυξήθηκε όταν το pH της τροφοδοσίας ήταν κάτω από το ισοηλεκτρικό όριο λόγω της αυξημένης ηλεκτρικής απώθησης που εμφανίζεται μεταξύ των θετικά φορτισμένων ιόντων (κατιόντων) των μετάλλων και της επιφάνειας της μεμβράνης. Ωστόσο, η απόρριψη βαρέων μετάλλων με αρνητικό φορτίο όπως το αρσενικό (As), είναι αρκετά μικρή γιατί δεν υπάρχει ηλεκτρική απώθηση. Η απόρριψη σε αυτήν την περίπτωση, περιορίζεται στην δυνατότητα αναχαίτισης της μεμβράνης των μορίων μεγάλου μοριακού βάρους (πιο ογκώδη μόρια). Η χρήση μεμβρανών RO χαμηλής πίεσης επιτυγχάνει αφαίρεση των δισθενών (π.χ. χαλκός και νικέλιο) και των εξασθενών (π.χ. εξασθενές χρώμιο) βαρέων μετάλλων από τα υγρά απόβλητα σε ποσοστό άνω του 95%. Παρά την υψηλή απόδοση της αφαίρεσης όμως, το φαινόμενο της καθαλάτωσης (ή καλύτερα για τις μεμβράνες η πόλωση

συγκέντρωσης) αποτελεί σημαντική παράμετρο και για αυτό απαιτείται ενδεδειγμένη προεπεξεργασία που θα προηγείται της κύριας επεξεργασίας του οποιουδήποτε διαλύματος. Η ηλεκτροδιάλυση (electrodialysis, ED) είναι άλλη μια μέθοδος μεμβρανών που χρησιμοποιεί ιοντοανταλλακτικές μεμβράνες φορτισμένων ιόντων για τον διαχωρισμό μεταλλικών στοιχείων από υδατικά διαλύματα. Μελέτες έχουν δείξει, ότι η ED μπορεί αποτελεσματικά να μειώσει την συγκέντρωση χρωμίου (Cr) από 10 mg/lt σε 0.1 mg/lt. Σε γενικές γραμμές, η απόδοση της επεξεργασίας με ED είναι συνάρτηση της αρχικής συγκέντρωσης των μετάλλων, του ρυθμού της ροής, του pH λειτουργίας, της θερμοκρασίας και του ηλεκτρικού ρεύματος. Ωστόσο, η ED δεν είναι τόσο αποτελεσματική, στην παροχή νερού υψηλής καθαρότητας με συγκεντρώσεις μετάλλων της τάξης των λίγων mg/lit.

Η πιο καινοτόμος και επαναστατική μέθοδος διαχωρισμού των βαρέων και τοξικών μετάλλων από τα υδατικά διαλύματα, που παράλληλα επιτρέπει και την ανάκτηση πολύτιμων μεταλλικών στοιχείων, είναι ο χωρητικός απιονισμός (capacitive deionization, CDI). Ο CDI είναι μια μέθοδος ηλεκτρο-απορρόφησης, κατά την οποία τα ιόντα απορροφώνται από τις επιφάνειες πορώδων ηλεκτροδίων που βρίσκονται υπό ηλεκτρικό πεδίο. Όταν το υδατικό διάλυμα ρέει ανάμεσα από τα πορώδη ηλεκτρόδια, τα θετικά φορτισμένα ιόντα (κατιόντα) όπως αυτά του ασβεστίου, του μαγνησίου, του νατρίου, του χαλκού και του σιδήρου απορροφώνται από την ηλεκτρική διπλή στρώση των αρνητικά φορτισμένων ηλεκτροδίων της καθόδου, ενώ τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα (ανιόντα) όπως αυτά του θείου, του χλωρίου, του κυανίου και του αρσενικού μαζί με τα νιτρικά ιόντα απορροφώνται από την ηλεκτρική διπλή στρώση των θετικά φορτισμένων ηλεκτροδίων της ανόδου. Με την πλήρωση της απορροφητικής χωρητικότητας των ηλεκτροδίων, τα ιόντα που έχουν απορροφηθεί μπορούν να αποκολληθούν και να απελευθερωθούν από τις επιφάνειες των ηλεκτροδίων με την εξάλειψη ή την αντιστροφή του ηλεκτρικού πεδίου και την επακόλουθη αναγέννηση της απορροφητικής χωρητικότητας των ηλεκτροδίων.

Τα ηλεκτρόδια πρέπει να έχουν υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, μεγάλες ειδικές επιφάνειες, υψηλή χημική και ηλεκτροχημική σταθερότητα και να διαμορφώνονται εύκολα βάσει των απαιτήσεων σχεδιασμού. Μερικά υλικά που έχουν διερευνηθεί για την κατασκευή ηλεκτροδίων είναι ο ενεργός άνθρακας, το γραφένιο, οι νανοδομές άνθρακα, οι νανοπορώδεις δομές του διοξειδίου του πυριτίου, οι δομές οξειδίου του αργιλίου και μαγνησίου και οι νανοσωλήνες και νανοϊνες άνθρακα. Μια συσκευή CDI αποτελείται από ζεύγη ηλεκτροδίων που διαχωρίζονται από αγωγίμους αποστάτες - διαχωριστές και μη αγωγή προστατευτικά για την αποφυγή βραχυκυκλωμάτων. Τα ηλεκτρόδια συγκρατούνται μεταξύ τους μέσω ενός μεταλλικού ή πλαστικού πλαισίου, διαμέσου του οποίου ρέει το επεξεργασμένο διάλυμα. Ένας ολοκληρωμένος κύκλος επεξεργασίας περιλαμβάνει τέσσερα στάδια, την προ-φόρτιση των ηλεκτροδίων από μια εξωτερική πηγή ενέργειας, την ηλεκτρο-απορρόφηση για τον διαχωρισμό των μεταλλικών ιόντων από το νερό, την αναγέννηση των ηλεκτροδίων μέσω της εξάλειψης του ηλεκτρικού πεδίου και της προώθησης των αλάτων στο διάλυμα της συμπύκνωσης και τέλος, την τελική αποβολή του διαλύματος της συμπύκνωσης.

Ο μεμβρανικός χωρητικός απιονισμός (membrane capacitive deionization, MCDI) είναι μια τροποποίηση του CDI και συνδυάζει τις ιοντοανταλλακτικές μεμβράνες με τα ηλεκτρόδια άνθρακα. Πιο συγκεκριμένα, μια ιοντοανταλλακτική μεμβράνη ανιόντων τοποθετείται στην άνοδο και μια ιοντοανταλλακτική μεμβράνη κατιόντων τοποθετείται στην κάθοδο. Ο MCDI μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση της αφαλάτωσης, γιατί οι ιοντοανταλλακτικές μεμβράνες εμποδίζουν την

αποδέσμευση των «αντι-ιόντων» των ηλεκτροδίων αυξάνοντας έτσι την αφαίρεση των αλάτων. Επιπλέον, η απόδοση και η δυνατότητα αφαίρεσης των αλάτων του MCDI αυξήθηκαν κατά 33 - 56% σε σύγκριση με τον απλό CDI. Οι μέθοδοι MCDI και CDI εφαρμόζονται για την επεξεργασία ποικίλων τύπων υδάτων όπως τα υφάλμυρα ύδατα, τα ύδατα υψηλής σκληρότητας, τα μολυσμένα από υδρογονάνθρακες ύδατα και τα ύδατα που παράγονται κατά την διύλιση του πετρελαίου, τα υγρά απόβλητα θερμοηλεκτρικών σταθμών και ο αλμόλοιπος που προέρχεται από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων με RO.

Επίσης, ο CDI παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις μεθόδους μεμβρανών όπως ο απλός σχεδιασμός, η απουσία αντλίας ή θερμαντήρα - λέβητα υψηλής πίεσης και η λειτουργία σε συνθήκες περιβάλλοντος και σε χαμηλές τάσεις ηλεκτρικού ρεύματος. Για χαμηλές συγκεντρώσεις (< 3,000 mg/lit) διαλυμένων στερεών TDS, ο CDI μπορεί να ανταγωνιστεί ως προς το κόστος ακόμα και την RO, ενώ παρουσιάζει παράλληλα χαμηλά επίπεδα μόλυνσης, μειωμένες απαιτήσεις προεπεξεργασίας και προαιρετική χρήση χημικών για τον καθαρισμό και τον έλεγχο της καθαλάτωσης. Εκτός όμως των παραπάνω, ο CDI είναι αρκετά ελκυστικός και για την δυνατότητα επίτευξης πολλαπλών στόχων ταυτόχρονα όπως η ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων, η παραγωγή νερού υψηλής καθαρότητας, η επαναχρησιμοποίηση των ίδιων ηλεκτροδίων για μεγάλο χρονικό διάστημα και τα χαμηλά επίπεδα μόλυνσης και καθαλάτωσης των ηλεκτροδίων.

## **2.2 ΜΙΚΡΟΒΙΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ**

Η έλλειψη νερού είναι ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα με περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές προεκτάσεις. Περίπου το 20% του παγκόσμιου πληθυσμού (δηλαδή πάνω από 1.2 δισεκατομμύρια άνθρωποι) αντιμετωπίζει πρόβλημα έλλειψης πόσιμου νερού, ενώ το 80% των ασθενειών που αντιμετωπίζει ο άνθρωπος σχετίζονται άμεσα με τη χρήση ακατάλληλου (χαμηλής ποιότητας) νερού. Εκτιμάται, ότι το σημαντικότερο πρόβλημα που θα κληθεί να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα κατά τον 21<sup>ο</sup> αιώνα, θα είναι η παροχή επαρκούς ποιότητας και ποσότητας νερού με ανανεώσιμο τρόπο για πληθυσμό άνω των 6 δισεκατομμυρίων ανθρώπων. Στα ανεπτυγμένα κράτη οι σχετιζόμενες με το νερό ασθένειες έχουν στην πλειοψηφία τους εξαλειφθεί. Ωστόσο, στις αναπτυσσόμενες οικονομίες του Τρίτου Κόσμου παραμένουν ένα σημαντικό πρόβλημα. Σύμφωνα με εκτιμήσεις του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (World Health Organization, WHO) για το 89% του παγκόσμιου πληθυσμού, 1.1 δισεκατομμύρια άνθρωποι ανά τον κόσμο δεν είχαν πρόσβαση σε καλύτερες συνθήκες ύδρευσης και 2.4 δισεκατομμύρια άνθρωποι δεν είχαν πρόσβαση σε καλύτερες συνθήκες υγιεινής κατά το έτος 2000. Επιπλέον, ο Π.Ο.Υ. καταλήγει βάσει υπολογισμών και των παραπάνω εκτιμήσεων ότι κάθε χρόνο υπάρχουν 4 δισεκατομμύρια κρούσματα εντερικών ασθενειών μαζί με εκατομμύρια άλλα κρούσματα νοσημάτων που προκύπτουν από την έλλειψη καθαρού νερού. Η θνησιμότητα των ασθενειών που σχετίζονται με το νερό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το σύνολο του παγκόσμιου πληθυσμού, οι σχετικοί ρυθμοί θνησιμότητας, η συχνότητα εμφάνισης κρουσμάτων, οι παρεμβάσεις εκ μέρους της υγειονομικής κοινότητας και οι μελλοντικές προσπάθειες αλλαγής αυτών των παραγόντων με σκοπό την μείωση των θανάτων. Οι ασθένειες που σχετίζονται με το

νερό ταξινομούνται σε πέντε κατηγορίες. Οι πρώτες τρεις συνδέονται άμεσα με την έλλειψη καλύτερων συνθηκών ύδρευσης.

Η πρώτη κατηγορία αποτελείται από τις υδατογενείς νόσους, δηλαδή τις ασθένειες που μεταδίδονται μέσω του νερού και προκαλούνται από την κατάποση μολυσμένου, από ανθρώπινα ή ζωικά περιττώματα και ούρα, νερού. Σε αυτά περιέχονται και ευδοκιμούν παθογόνα βακτήρια και ιοί που προκαλούν ασθένειες όπως η χολέρα, ο τυφοειδής πυρετός ή τύφος (τυφική σαλμονέλλωση) που προκαλείται από το βακτήριο *salmonella typhi*, η αμοιβαδοειδής δυσεντερία (αμοιβάδωση), η βακτηριδιακή δυσεντερία (σιγκέλλωση) και τα διάφορα είδη διάρροιας. Άλλα ευρέως διαδεδομένα νοσήματα είναι η γιαρδίαση ή λαμβλίαση, η χοίρειος κυστικέρκωση ή ταινίαση (παράσιτο *taenia solium*), η ασκαρίαση (παράσιτο *ascaris lumbricoides*), η αγκυλοστομίαση (παράσιτο αγκυλόστομο του δωδεκαδάκτυλου) και η στρογγυλοειδίαση (παράσιτο *strongyloides stercoralis*).

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τα νοσήματα που προκύπτουν από την επαφή του δέρματος ή των οφθαλμών με μολυσμένο νερό και από την ανεπάρκεια καθαρού νερού για προσωπική υγιεινή. Τέτοια νοσήματα είναι το τράχωμα (βακτήριο *chlamydia trachomatis*), ο ενδημικός τύφος που προκαλεί το βακτήριο *rickettsia typhi* ή τύφος του ποντικού γιατί μεταδίδεται από τους ψύλλους των αρουραίων και των ποντικών, η ψωρίαση κ.α. Τέτοιου είδους νοσήματα σχετίζονται κυρίως με την έλλειψη νερού και μεταδίδονται μέσω παρασιτικών εντόμων όπως οι ψύλλοι, οι ψείρες και τα τσιμπούρια.

Η τρίτη κατηγορία αφορά τις νόσους που προέρχονται από παράσιτα που βρίσκονται σε οργανισμούς ξενιστές και ζουν ή χρειάζονται νερό (συνήθως μολυσμένο) για να επιβιώσουν. Οι τρόποι μετάδοσης είναι η κατάποση και γενικότερα η οποιαδήποτε επαφή και χρήση αυτού του νερού από τον άνθρωπο. Οι πιο διαδεδομένες νόσοι αυτής της κατηγορίας είναι η σχιστοσωμίαση (παράσιτο *schistosoma*) και η δρακουνκούλιαση (παράσιτο *dracunculus medinensis*). Η σχιστοσωμίαση, με τα σημερινά δεδομένα, προσβάλλει 200 εκατομμύρια ανθρώπους σε 70 χώρες.

Η τέταρτη κατηγορία απαρτίζεται από τις ασθένειες που μεταδίδονται από έντομα, τα οποία ζουν, αναπαράγονται και επιβιώνουν σε μολυσμένα, στάσιμα και συνήθως βαλτώδη ύδατα. Τέτοια έντομα είναι κατά κύριο λόγο τα κουνούπια, τα οποία γίνονται φορείς παθογόνων μικροοργανισμών που προκαλούν ασθένειες όπως η ελονοσία (πρωτόζωο πλασμώδιο), ο δάγκειος πυρετός (δάγκειος ιός), η φιλαρίαση μπάνκροφτ (παράσιτο *wuchereria bancrofti*), η ογκοκερκίαση (παράσιτο *onchocerca volvulus*), η αφρικανική τρυπανοσωμίαση (πρωτόζωο *trypanosoma brucei*), η αμερικανική τρυπανοσωμίαση (πρωτόζωο *trypanosoma cruzi*) και ο κίτρινος πυρετός (ιός κίτρινου πυρετού).

Η πέμπτη κατηγορία περιέχει τις παθήσεις που προκαλούνται από παθογόνους μικροοργανισμούς που βρίσκονται σε υδατικά αερολύματα (αεροζόλ) ή εναιωρήματα και ευδοκιμούν σε υγραντήρες και κλιματιστικά. Παραδείγματα τέτοιων παθήσεων είναι η νόσος των λεγεωνάριων ή λεγεωνέλλωση ή λεγιονέλλωση ή λετζιονέλλωση, η ιογενής γαστρεντερίτιδα τύπου norwalk (νοροϊός) καθώς και η διφθερίτιδα (βακτήριο *corynebacterium diphtheriae*), που μεταδίδονται μέσω του αέρα και εισέρχονται στο ανθρώπινο σώμα με την αναπνοή. Η λεγεωνέλλωση εμφανίστηκε σχετικά πρόσφατα το 1977, στο συνέδριο της αμερικανικής λεγεώνας (από όπου πήρε και την ονομασία της), στην Φιλαδέλφεια των Η.Π.Α., όταν 221 άτομα μολύνθηκαν μέσω του συστήματος κλιματισμού και 34 από αυτά κατέληξαν. Το βακτήριο *legionella* spp. προκαλεί δύο ειδών ασθένειες, την λεγεωνέλλωση που

είναι ένα είδος πνευμονίας και μια σχετικά ήπια μορφή πυρετού. Συγκεκριμένα, το legionella pneumophila είναι υπεύθυνο για το 90% των λοιμώξεων, είναι ανθεκτικό στο χλώριο, μπορεί να επιβιώσει κατά την επεξεργασία του πόσιμου νερού και μπορεί να εξουδετερωθεί μόνο με βιοκτόνα και υπεριώδη ακτινοβολία.

Οι παρακάτω Πίν. 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 αναφέρουν αντίστοιχα τις εκτιμήσεις της παγκόσμιας νοσηρότητας και θνησιμότητας των σχετιζόμενων με το νερό ασθενειών για τις αρχές της δεκαετίας του 1990, τους θανάτους και τα αναπηρικά έτη διαβίωσης τέτοιων ασθενειών, τις ασθένειες που προκύπτουν από μολυσμένο πόσιμο νερό, τους παθογόνους μικροοργανισμούς που μεταδίδονται με το νερό, τους παθογόνους μικροοργανισμούς που μπορούν να αναπαραχθούν στο δίκτυο ύδρευσης και τις εκτιμήσεις της σχετιζόμενης με το νερό θνησιμότητας.

**Πίνακας 2.1:** Εκτιμήσεις παγκόσμιας νοσηρότητας και θνησιμότητας ασθενειών σχετιζόμενων με το νερό (αρχές δεκαετίας 1990)

Ασθένεια	Νοσηρότητα (κρούσματα/έτος ή μολυσμένα άτομα)	Θνησιμότητα (θάνατοι/έτος)
είδη διάρροιας	1.000.000.000	3.300.000
εντερικές έλμινθες	1.500.000.000 (μολυσμένα άτομα)	100.000
σχιστοσωμίαση	200.000.000 (μολυσμένα άτομα)	200.000
δρακουνκουλίαση	150.000 (το 1996)	-
τράχωμα	150.000.000	-
ελονοσία	400.000.000	1,500,000
δάγκειος πυρετός	1.750.000	20.000
πολιομυελίτιδα	114.000	-
τρυπανοσωμίαση	275.000	130.000
φιλαρίαση μπάνκροφτ	72.800.000 (μολυσμένα άτομα)	-
ογκοκερκίαση	17.700.000 (μολυσμένα άτομα, 270.000 τυφλοί)	40.000 (θάνατοι από τύφλωση)

Ο παρακάτω Πίν. 2.2 αποκλείει τη θνησιμότητα και τα αναπηρικά έτη διαβίωσης (Disability Adjusted Life Year, D.A.L.Y.) ασθενειών που σχετίζονται με το νερό και μεταδίδονται από έντομα, όπως η ελονοσία, η ογκοκερκίαση και ο δάγκειος πυρετός.

**Πίνακας 2.2:** Θάνατοι και D.A.L.Y.\* από ασθένειες σχετικές με το νερό

Ασθένεια	2000		2004	
	Θάνατοι	D.A.L.Y.*	Θάνατοι	D.A.L.Y.*
είδη διάρροιας	2019585	63345722	2163283	72776516
πολιομυελίτιδα	1136	188543	1195	34399
διφθερίτιδα	5527	187838	5091	173575
<b>Τροπικές ασθένειες</b>				
τρυπανοσωμίαση	49129	1570242	52347	1672728
σχιστοσωμίαση	15335	1711522	41087	1707144
τράχωμα	72	3892326	108	1334414



Εντερικές νηματοειδείς λοιμώξεις				
ασκαρίαση	4929	1204384	2455	1850781
τριχουρίαση	2393	1661689	1828	1012138
αγκυλοστομίαση	3477	1785539	242	1091589
άλλες εντερικές λοιμώξεις	1692	53222	1957	58158
σύνολο	2103274	75601028	2269593	81711443
*Disability Adjusted Life Year (Αναπηρικό Έτος Διαβίωσης)				

**Πίνακας 2.3:** Ασθένειες που προκύπτουν από μολυσμένο πόσιμο νερό

Ασθένεια	Παθογόνος μικροοργανισμός
<b>Βακτηριδιακές ασθένειες</b>	
σαλμονέλλωση	salmonella spp.
τυφοειδής πυρετός	salmonella typhi
παρατυφοειδής πυρετός	salmonella paratyphi A
σιγκέλλωση (δυσεντερία)	shigella spp. (s. dysenteriae, s. flexneri, s. boydii, s. sonnei)
χολέρα	vibrio cholerae
λεπτοσπίρωση	leptospira spp.
γαστρεντερίτιδα	escherichia coli
καμπυλοβακτηρίωση (διάρροια κ.α.)	campylobacter jejuni, campylobacter coli
<b>Ιογενείς ασθένειες</b>	
ηπατίτιδα Α	ιός ηπατίτιδας Α
γαστρεντερίτιδα	νοροϊός τύπου norwalk
<b>Παρασιτικές ασθένειες</b>	
αμοιβάδωση	entamoeba histolytica
κυκλοσποριδίωση	cyclospora cayetanensis
κρυπτοσποριδίωση	cryptosporidium parvum
γιαρδίαση	giardia lamblia

**Πίνακας 2.4:** Παθογόνοι μικροοργανισμοί μεταδιδόμενοι με το νερό

Βακτήρια	Ιοί	Πρωτόζωα
vibrio cholerae	πολιοϊός τύπου 1,2,3	entamoeba histolytica
salmonella typhi	ιός ηπατίτιδας Α,Ε	giardia lamblia
salmonella paratyphi	εντεροϊοί	cryptosporidium parvum
salmonella enteritidis	ροταϊοί	toxoplasma gondii
shigella spp.	αδενοϊοί	
yersinia enterocolitica	νοροϊοί τύπου norwalk	
campylobacter jejuni		
escherichia coli		
leptospira spp.		

**Πίνακας 2.5:** Παθογόνοι μικροοργανισμοί που μπορούν να αναπαραχθούν στο δίκτυο ύδρευσης

pseudomonas aeruginosa (ψευδομονάδα αεριογόνος)
legionella spp.
aeromonas hydrophila (αερομονάδα υδρόφιλη)
flavobacterium spp. (φλαβοβακτήρια)
acinetobacter spp. (ακινετοβακτήρια)
ακανθαμοιβάδες
άτυπα μυκοβακτηρίδια

**Πίνακας 2.6:** Εκτιμήσεις σχετιζόμενης με το νερό θνησιμότητας

Πηγή	Θάνατοι/Έτος
Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας 2000	2.200.000
Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας 1999	2.300.000
Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας 1992	4.000.000
Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας 1996	> 5.000.000
UNDP* 2002	> 5.000.000
WSSD** Johannesburg 2002	> 5.000.000
*Ετήσια αναφορά προγράμματος ανάπτυξης Ηνωμένων Εθνών	
**Παγκόσμια σύνοδος κορυφής βιώσιμης ανάπτυξης	

Επιπτώσεις στην υγεία όμως, μπορεί να προκύψουν και από την αφαίρεση θρεπτικών και χρησιμων για τον άνθρωπο στοιχείων του νερού αφαλάτωσης ή οποιασδήποτε άλλης επεξεργασίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το Ισραήλ, όπου ερευνητές διαπίστωσαν πιθανή σχέση της αφαλάτωσης με την έλλειψη ιωδίου. Ως γνωστόν, η αφαλάτωση αφαιρεί το ιώδιο από το νερό και αυτό μπορεί να προκαλέσει διάφορες διαταραχές στον ανθρώπινο οργανισμό. Οι ερευνητές παρατήρησαν έλλειψη ιωδίου σε ευ-θυρεοειδείς ενήλικες (δηλαδή με καλή λειτουργία του θυρεοειδούς αδένα), που κατανάλωναν πόσιμο νερό αφαλάτωσης πτωχό σε ιώδιο. Μεταγενέστερες έρευνες στον γενικό πληθυσμό του Ισραήλ, έδειξαν ότι το 62% των παιδιών σχολικής ηλικίας και το 85% των εγκύων γυναικών είναι κάτω από το εύρος επάρκειας του Π.Ο.Υ. Επίσης, επισημάνθηκαν η εθνική εξάρτηση από το πτωχό σε ιώδιο αφαλατωμένο νερό, η απουσία ενός ευρύτερου προγράμματος ιωδίωσης των αλάτων προς κατανάλωση και οι αναφορές αυξημένης χρήσης θυρεοειδικών φαρμάκων στο Ισραήλ ως πιθανές αιτίες της χαμηλής πρόσληψης ιωδίου του πληθυσμού. Κατά το έτος που διενεργήθηκε η έρευνα, η ποσότητα νερού που παραγόταν από τις μονάδες αφαλάτωσης αποτελούσε το 50% του πόσιμου νερού και το 80% του νερού βιομηχανικής χρήσης του Ισραήλ.

## 2.3 ΣΤΑΔΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗΣ

Τα πρώτα υγειονομικά και μικροβιολογικά κριτήρια για το πόσιμο νερό τα έθεσε ο Fränkel το 1887, βασισμένος στις μελέτες απογραφής αποικιών μικροοργανισμών που έκανε στα πηγάδια του Βερολίνου. Ο Fränkel πρότεινε ότι ο αριθμός των αποικιών ανά ml δεν πρέπει να υπερβαίνει τις 10, κάτι τέτοιο όμως δεν ήταν εφικτό την εποχή εκείνη από τις υπάρχουσες συσκευές διήθησης του νερού. Μετά την επιδημία χολέρας στο Αμβούργο το 1892, που δεν διέθετε καμία συσκευή επεξεργασίας του πόσιμου νερού (για αυτό και το βακτήριο της χολέρας προκάλεσε επιδημία), ο Koch τροποποίησε τα κριτήρια του Fränkel και έθεσε μέγιστο όριο τις 100 αποικίες ανά ml (1894). Τα κριτήρια του Koch ήταν πιο ρεαλιστικά και υιοθετήθηκαν από την Γερμανία το 1899. Ωστόσο, λόγω του υψηλού κόστους επεξεργασίας, το μοντέλο επιτρεπτού αριθμού αποικιών αντικαταστάθηκε από τους ελέγχους για *E. Coli*, κολοβακτηρίδια και άλλους εντερικούς παθογόνους μικροοργανισμούς.

Σήμερα, η επεξεργασία του νερού αποτελείται από ποικίλα στάδια επεξεργασίας όπως η προεπεξεργασία, η συσσωμάτωση - κροκίδωση, η καθίζηση (ή αντίθετα η επίπλευση), η διήθηση και η απολύμανση.

**Προεπεξεργασία:**

Ως προεπεξεργασία μπορεί να θεωρηθεί κάθε είδους διεργασία που διενεργείται, ώστε να τροποποιηθεί η ποιότητα του νερού πριν την κύρια επεξεργασία και περιλαμβάνει κυρίως την αποθήκευση, την κοσκίνιση και τον αερισμό. Η προεπεξεργασία μπορεί να έχει και το πλεονέκτημα της μείωσης ή σταθεροποίησης του μικροβιακού φορτίου.

**Συσσωμάτωση - Κροκίδωση:**

Κατά την συσσωμάτωση εισάγεται στο νερό ένας θρομβωτικός παράγοντας που αποσταθεροποιεί τα εναπομείναντα σωματίδια (και τους μικροοργανισμούς) από την κοσκίνιση και τα αναγκάζει να σχηματίσουν διάφορα συσσωματώματα. Οι πιο συνηθισμένοι θρομβωτικοί παράγοντες (πηκτικά μέσα) είναι το θειικό αργίλιο, το υδροξειδίο αργιλίου, το χλωριούχο πολυαργίλιο, ο χλωριούχος σίδηρος, ο θειικός σίδηρος και ο ασβέστης. Η συσσωμάτωση επηρεάζει άμεσα την αποδοτικότητα της κρυσταλλικής διήθησης και έχει έμμεσες επιπτώσεις στην διεργασία απολύμανσης, τυχόν αποτυχία ή ανεπάρκεια συσσωμάτωσης λόγω χρήσης λιγότερης ποσότητας πηκτικού μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την υγεία των καταναλωτών (υπάρχουν περιπτώσεις εμφάνισης του παρασίτου *cryptosporidium* μετά από αποτυχία σε αυτό το στάδιο επεξεργασίας). Η χρήση περισσότερης ποσότητας πηκτικού μπορεί επίσης να θέσει σε κίνδυνο την υγεία των καταναλωτών.

**Καθίζηση:**

Σκοπός της καθίζησης είναι η αφαίρεση ουσιών και σωματιδίων, συμπεριλαμβανομένων και των συσσωματωμάτων του προηγούμενου σταδίου επεξεργασίας. Κατά το στάδιο της καθίζησης, η ροή του νερού έχει ανοδική κατεύθυνση αντίθετη της βαρύτητας, με σκοπό την απομάκρυνση του νερού και τον σχηματισμό ενός ιζηματογενούς στρώματος λάσπης στην βάση της δεξαμενής καθίζησης. Η καλή λειτουργία των δεξαμενών καθίζησης είναι ζωτικής σημασίας, γιατί μέσω αυτής ρυθμίζεται κατάλληλα η ροή του νερού, ώστε να αποτρέπεται η απορρόφηση και η εισχώρηση των σωματιδίων στο επόμενο στάδιο επεξεργασίας. Το κυριότερο πρόβλημα, που μπορεί να εμφανιστεί κατά την καθίζηση, είναι οι διακυμάνσεις στην ροή του νερού οι οποίες επιτρέπουν στα διάφορα σωματίδια να

ξεφύγουν από τις δεξαμενές καθίζησης. Ανάμεσα στους παράγοντες που επηρεάζουν την καθίζηση είναι το μέγεθος, η μορφή και το βάρος των συσσωματωμάτων, το ιξώδες και η θερμοκρασία του νερού, ο αριθμός και οι διαστάσεις (μήκος, πλάτος, βάθος) των δεξαμενών, η ταχύτητα της ροής, ο χρόνος παραμονής της κάθε παρτίδας νερού στην δεξαμενή, ο ρυθμός εμφάνισης υπερχειλίσης, ο σχεδιασμός εισόδου - εξόδου κ.ά. Το ίζημα λάσπης, που δημιουργείται, είναι ένα μείγμα όλων των ακαθαρσιών που υπάρχουν στο νερό και αποτελείται κυρίως από βακτήρια, ιούς και πρωτόζωα. Για αυτόν τον λόγο, είναι επιτακτική ανάγκη η ύπαρξη ενός πλάνου συλλογής και ασφαλούς αποβολής αυτού του ιζήματος από τις δεξαμενές. Ο μη συχνός καθαρισμός σε τακτά χρονικά διαστήματα, έχει ως αποτέλεσμα την είσοδο, μαζί με το νερό, των διαφόρων σωματιδίων, μολυντών και ρυπαντών στο επόμενο στάδιο επεξεργασίας. Η επίπλευση είναι το αντίθετο της καθίζησης και γίνεται όταν υπάρχουν σωματίδια με μικρότερη πυκνότητα από αυτή του νερού.

Διήθηση:

Μετά την καθίζηση, το νερό περιέχει μόνο μικρά και λεπτά στερεά και διαλυτές ουσίες. Η αφαίρεση αυτών των ουσιών και των στερεών που έχουν απομείνει, γίνεται μέσω της διήθησης. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι διήθησης όπως η κρυσταλλική - κοκκώδης διήθηση, η γρήγορη και η αργή διήθηση μέσω φίλτρων άμμου και η διήθηση μεμβρανών. Ο κατάλληλος σχεδιασμός και λειτουργία της διήθησης μπορούν να δράσουν ως ένα σταθερό και αποτελεσματικό εμπόδιο στην εισχώρηση παθογόνων μικροβίων. Συγκεκριμένα, σε μερικές περιπτώσεις η κρυσταλλική διήθηση αποτελεί το μοναδικό εμπόδιο που υπάρχει. Για παράδειγμα, στην αφαίρεση ωκύστεων του παρασίτου *cryptosporidium* όταν το μοναδικό απολυμαντικό που χρησιμοποιείται είναι το χλώριο.

Τα φίλτρα άμμου γρήγορης διήθησης περιέχουν χονδρές διαβαθμίσεις άμμου χαλαζία (διαμέτρου 1 mm), ώστε τα κενά μεταξύ των κόκκων να είναι σχετικά μεγάλα και να επιτρέπουν την γρήγορη διέλευση του νερού μέσα από αυτά. Τέτοιου είδους φίλτρα χρησιμοποιούνται για ύδατα που έχουν ήδη υποστεί επεξεργασία με συσσωμάτωση και καθίζηση και είναι λιγότερο αποτελεσματικά ως προς την αφαίρεση μικροοργανισμών. Η θολότητα του νερού ποικίλλει ανάλογα με την χρονική διάρκεια της κάθε αντίστροφης ροής καθαρισμού των στρωμάτων των φίλτρων. Η απόδοση των φίλτρων μετά την αντίστροφη ροή καθαρισμού, είναι και παραμένει μειωμένη μέχρι τα επιμέρους στρώματα των φίλτρων να ξαναγίνουν συμπαγή, έχοντας ως συνέπεια την διέλευση στοιχείων που έπρεπε να κατακρατηθούν. Αυτό επισημαίνει την ανάγκη για συνεχή παρακολούθηση και έλεγχο της διήθησης, ειδικά σε αυτό το στάδιο.

Η λειτουργία των φίλτρων άμμου αργής διήθησης είναι πιο απλή, γιατί δεν είναι απαραίτητη η αντίστροφη ροή καθαρισμού σε συχνή βάση. Αυτό την καθιστά κατάλληλη για αναπτυσσόμενα κράτη και μικρά αγροτικά συστήματα, με την προϋπόθεση όμως επαρκούς εδαφικής έκτασης. Κατά την αργή διήθηση, αναπτύσσεται στην επιφάνεια του στρώματος των κόκκων άμμου ένα μείγμα μικροβιακής λάσπης, το οποίο αποτελείται από βακτήρια, πρωτόζωα και αμοιβάδες, καρκινοειδή και ασπόνδυλες προνύμφες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την οξειδωση των οργανικών ουσιών του νερού και την μετατροπή του αμμωνιακού αζώτου σε νιτρικά άλατα. Οι παθογόνοι ιοί, βακτήρια και παράσιτα αφαιρούνται μέσω της επίπλευσης - προσρόφησης και της επακόλουθης απομάκρυνσής τους. Η σωστή λειτουργία και χρήση των φίλτρων άμμου αργής διήθησης αποδίδει βέλτιστη ποιότητα νερού, η οποία είναι πολύ καλύτερη από το οποιοδήποτε συμβατικό

σύστημα επεξεργασίας του νερού. Η αποβολή των βακτηρίων θα είναι αποτελεσματική τουλάχιστον κατά 98 - 99.5%, ο παράγοντας του παθογόνου βακτηρίου E. Coli θα μειωθεί κατά 1000 και η αφαίρεση των ιών θα είναι κατά πολύ υψηλότερη. Επίσης, τα φίλτρα άμμου αργής διήθησης είναι πολύ αποτελεσματικά και στην αφαίρεση παρασίτων, όπως οι έλμινθες και τα πρωτόζωα. Παρόλα αυτά, κατά το αρχικό στάδιο εκκίνησης με χαμηλή θερμοκρασία, υπάρχει η πιθανότητα το νερό, που θα περάσει από τα φίλτρα άμμου, να έχει ένα μικρό ποσοστό ιών και E. Coli. Τα μειονεκτήματα αυτού του τύπου φίλτρων είναι το δαπανηρό λειτουργικό κόστος και η εντατική εργασία που απαιτείται, επειδή το στρώμα λάσπης που σχηματίζεται στην επιφάνεια του φίλτρου εμποδίζει την αποστράγγιση του νερού και πρέπει να αφαιρείται μετά από την διέλευση της κάθε παρτίδας νερού.

Η λειτουργία τόσο της γρήγορης, όσο και της αργής διήθησης φίλτρων άμμου είναι αρκετά πολύπλοκη, με την μη σωστή λειτουργία τους να προκαλεί προβλήματα. Το πιο σοβαρό πρόβλημα είναι η εμφάνιση ρωγμών στην βάση του στρώματος της άμμου, που επιτρέπει την ελεύθερη διέλευση του νερού χωρίς φιλτράρισμα.

Απολύμανση:

Η απολύμανση πρέπει να θεωρείται υποχρεωτική για όλα τα είδη επιφανειακών (και μη) υδάτων που παρέχονται και μεταφέρονται μέσω σωληνώσεων, ακόμα και εκείνων που προέρχονται από μη μολυσμένες πηγές υδάτων υψηλής ποιότητας. Αυτό γίνεται με σκοπό την ύπαρξη πολλαπλών εμποδίων για την αποφυγή της μόλυνσης και ρύπανσης του νερού και την δημιουργία και εφαρμογή κανονιστικών προτύπων για την παραγωγή και διάθεση νερού υψηλής ποιοτικής αξίας. Παρά το γεγονός ότι η αργή διήθηση φίλτρων άμμου είναι εξαιρετικά αποτελεσματική στην αποβολή βακτηρίων και η συσσωμάτωση στην αφαίρεση ιών, το επεξεργασμένο νερό μπορεί ακόμα να περιέχει παθογόνους ιούς και βακτήρια που πρέπει να απομακρυνθούν ή να καταστραφούν. Στην πραγματικότητα είναι αδύνατη η αποστείρωση του νερού χωρίς την χρήση υψηλής συγκέντρωσης χημικών ουσιών που θα καθιστούσαν δυσάρεστη και επικίνδυνη την πόση του. Η τελική απολύμανση λοιπόν του επεξεργασμένου νερού είναι σχεδόν καθολική (σε παγκόσμιο επίπεδο) και υψίστης σημασίας, καθώς αντιπροσωπεύει το τελευταίο εμπόδιο που υπάρχει στην μεταφορά και μετάδοση υδατογενών βακτηριδίων και ιογενών ασθενειών. Η απολύμανση γίνεται κυρίως με την χρήση χλωρίου και υποχλωρίου, αλλά εκτός από αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλοι απολυμαντικοί παράγοντες όπως οι χλωραμίνες, το διοξείδιο του χλωρίου, το όζον και η υπεριώδης ακτινοβολία.

Η αποτελεσματικότητα της κάθε διαδικασίας απολύμανσης εξαρτάται από τον βαθμό καθαρότητας που έχει επιτευχθεί ή όχι στα προηγούμενα στάδια επεξεργασίας, καθώς οι απολυμαντικοί παράγοντες μπορεί να εξουδετερωθούν ή να αδρανοποιηθούν σε μεγάλο ή μικρό βαθμό από την οργανική ύλη και τις οξειδωτικές ενώσεις του νερού. Οι μικροοργανισμοί που συγκεντρώνονται μεταξύ τους, συσσωματώνονται και σχηματίζουν σωματιδιακή ύλη, μπορούν με αυτόν τον τρόπο να προστατευθούν εν μέρει απ την απολύμανση. Ένας σημαντικός δείκτης παρακολούθησης και μέτρησης του φαινομένου αυτού είναι η θολότητα. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα αποτυχίας της απολύμανσης στην καταστροφή υδατογενών παθογόνων βακτηρίων, όταν η θολότητα ήταν μεγαλύτερη από 5 νεφελομετρικές μονάδες (Nephelometric Turbidity Units, NTU). Είναι λοιπόν απαραίτητο τα στάδια επεξεργασίας, που προηγούνται της τελικής απολύμανσης, να παράγουν νερό και οποιοδήποτε άλλο μείγμα με μέση θολότητα που δεν θα ξεπερνάει την 1 και τις 5 NTU, αντίστοιχα. Οι μονάδες με κατάλληλη διαχείριση και σωστή λειτουργία μπορούν

να επιτύχουν πολύ χαμηλότερες τιμές θολότητας NTU και συνεπώς την παραγωγή νερού καλύτερης ποιότητας.

### 3. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

#### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το παγκόσμιο πρόβλημα της έλλειψης νερού (λειψυδρία) που προκαλείται από τους φθίνοντες πόρους πόσιμου νερού, την αυξανόμενη ανάγκη για πόσιμο νερό μαζί με τις ακραίες κλιματικές συνθήκες (λιγότερες βροχοπτώσεις), επισημαίνει την σημασία της επεξεργασίας των μη συμβατικών υδάτων για την εξασφάλιση βιώσιμης οικονομικής και κοινωνικής ανάπτυξης στις περιοχές που μαστίζονται από έλλειψη νερού. Η αφαλάτωση, μια διαδικασία που είχε ως αρχικό ορισμό την απομάκρυνση αλάτων και μεταλλικών στοιχείων από αλατούχα ύδατα, τώρα πλέον συμπεριλαμβάνει και την επεξεργασία υφάλμυρων υδάτων και λυμάτων, προσφέροντας μια μακροπρόθεσμη λύση και αυξάνοντας την παροχή νερού ανθρώπινης κατανάλωσης και χρήσης. Ο Πίν. 3.1 δείχνει τα κύρια αποθέματα νερού στην Γη και οι Πίν. 3.2, 3.3 δείχνουν την κατανάλωση εμφιαλωμένου νερού σε km<sup>3</sup> ανά κράτος (για 71 κράτη και κρατίδια) και ανά ήπειρο για οκτώ χρονικές περιόδους.

**Πίνακας 3.1:** Κύρια αποθέματα νερού στην Γη

Πηγή προέλευσης	Περιοχή Κατανομής (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Όγκος (10 <sup>3</sup> km <sup>3</sup> )	Ποσοστό Συνολικού Νερού (%)	Ποσοστό Καθαρού Νερού (%)
Σύνολο Νερού	510000	1386000	100	-
Σύνολο Καθαρού Νερού	149000	35000	2.53	100
Ωκεανοί	361300	1340000	96.5	-
Αλατώδη Υπόγεια Ύδατα	-	13000	1	-
Καθαρά Υπόγεια Ύδατα	-	10500	0.76	30
Παγετώνες Ανταρκτικής	13980	21600	1.56	61.7
Παγετώνες Γροιλανδίας	1800	2340	0.17	6.7
Παγόβουνα Αρκτικής	226	84	0.006	0.24
Παγετώνες Βουνών	224	40.6	0.003	0.12

Μόνιμα Παγωμένο Υπέδαφος	21000	300	0.022	0.86
Αλατώδεις Λίμνες	822	85.4	0.006	-
Λίμνες Καθαρού Νερού	1240	91	0.007	0.26
Υγρότοποι	2680	11.5	0.0008	0.03
Ποτάμια	-	2.12	0.0002	0.006
Βιολογικά Συστήματα	-	1.12	0.0001	0.0003
Ατμόσφαιρα	-	12.9	0.0001	0.04

**Πίνακας 3.2:** Κατανάλωση εμφιαλωμένου νερού ανά κράτος σε km<sup>3</sup> (1997 - 2004)

Κράτος	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Η.Π.Α.	14362	15635	17348	18563	20535	22893	24199	25893
Μεξικό	10484	10883	11579	12424	13244	14767	16495	17683
Κίνα (μαζί με την Ταϊβάν)	2750	3540	4610	5993	7605	9887	10628	11894
Βραζιλία	3932	4742	5658	6817	8166	9628	10758	11598
Ιταλία	7558	7722	8925	9221	9480	9690	10350	10661
Γερμανία	8207	8216	8313	8401	8552	8680	9950	10313
Γαλλία	6053	6565	6947	7462	7820	8430	8907	8550
Ινδονησία	2262	2736	3436	4300	5122	6146	6945	7362
Ισπανία	3543	3716	4077	4208	4344	4513	5098	5506
Ινδία	1047	1364	1682	2150	2668	3361	4202	5126
Ταϊλάνδη	3567	3842	4064	4286	4539	4837	4934	4962
Τουρκία	932	1185	1369	1667	1871	2007	2332	2460
Σαουδική Αραβία	1298	1490	1610	1770	1938	2116	2140	2270
Ηνωμένο Βασίλειο	724	813	1200	1415	1590	1780	2070	2205
Νότια Κορέα	892	1009	1110	1191	1274	1359	1631	1957
Ρωσία	524	611	791	968	1162	1406	1691	1944
Πολωνία	829	944	1106	1279	1461	1723	1852	1873
Ιαπωνία	647	790	923	1149	1231	1461	1539	1566
Βέλγιο-Λουξεμβούργο	1213	1234	1299	1262	1265	1330	1429	1532

Φιλιππίνες	728	837	999	1119	1213	1292	1363	1414
Καναδάς	541	650	755	848	939	1027	1063	1116
Ρουμανία	406	448	583	640	800	839	890	993
Τσεχία	555	598	639	701	763	821	862	891
Πορτογαλία	647	646	706	719	736	761	789	846
Ελβετία	623	653	652	654	657	668	705	744
Αυστρία	569	610	605	610	632	645	704	672
Αργεντινή	569	575	594	599	600	603	648	669
Ουγγαρία	202	245	300	398	467	515	618	662
Πακιστάν	69	108	158	242	360	548	580	637
Ουκρανία	242	274	316	362	421	479	547	612
Αυστραλία	304	355	390	443	488	566	585	595
Κολομβία	563	579	560	549	548	557	568	577
Ελλάδα	393	410	436	450	463	483	501	522
Σερβία	-	-	297	313	335	392	439	469
Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα	230	245	256	270	285	326	359	413
Χονγκ Κονγκ (Ημιαυτόνομη Περιοχή)	191	222	245	271	298	331	364	401
Βουλγαρία	54	67	142	180	228	286	324	384
Λίβανος	181	215	240	275	310	346	358	383
Ισραήλ	100	112	133	170	225	283	340	378
Βενεζουέλα	202	221	230	248	263	290	317	346
Ολλανδία	249	241	273	286	296	317	333	344
Κροατία	136	158	177	200	224	247	275	309
Αίγυπτος	134	146	168	188	209	235	259	290
Μαλαισία	138	158	180	199	218	237	257	288
Βιετνάμ	115	140	159	180	200	219	239	248
Σλοβακία	159	162	169	170	173	178	183	190
Σουηδία	127	127	143	151	161	175	183	189



Κουβέιτ	68	78	96	112	128	144	158	172
Περου	76	81	89	104	118	132	147	162
Σλοβενία	68	81	93	109	124	138	150	162
Χιλή	67	81	102	116	117	118	123	130
Ιρλανδία	51	62	66	86	99	107	119	129
Σιγκαπούρη	57	64	70	76	82	88	95	103
Νότια Αφρική	31	41	58	69	81	96	96	101
Νορβηγία	67	76	79	79	88	91	88	101
Δανία	72	72	82	82	82	84	95	97
Φινλανδία	45	51	58	62	66	68	72	74
Λετονία	2	3	31	39	47	56	72	74
Παραγουάη	46	50	54	57	61	65	69	73
Κύπρος	48	49	51	55	58	62	67	71
Κατάρ	33	38	43	47	52	56	61	66
Ιορδανία	28	31	36	40	44	48	53	57
Λιθουανία	15	18	20	24	29	35	40	46
Μπαχρέιν	27	28	31	34	37	40	42	45
Ομάν	16	18	20	23	26	29	33	37
Εσθονία	15	18	21	24	27	30	34	37
Ουργουάη	17	19	20	22	23	25	26	27
Νικαράγουα	13	15	16	17	19	20	22	23
Κούβα	11	12	13	15	17	19	21	23
Μπρουνέι Νταρουσσαλάμ	10	11	12	14	15	16	18	19
Νησιά Ειρηνικού*	10	11	12	13	14	15	16	18
Υποσύνολο	80141	87244	97722	107280	117831	131265	143517	152784
Όλες οι υπόλοιπες Χώρες	508	595	737	891	1033	1234	1407	1597
Σύνολο	80649	87839	98459	108171	118864	132499	144925	154381
*Περιλαμβάνει τα Νησιά Κάρολαϊν (Μικρονησία εκτός του Παλάου), τα Νησιά								

**Πίνακας 3.3:** Κατανάλωση εμφιαλωμένου νερού σε km<sup>3</sup> ανά Ήπειρο (1997 - 2004)

Ήπειρος	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Ευρώπη	34328	36074	39965	42276	44520	47037	51768	53661
Βόρεια Αμερική	25398	25822	29695	31850	34734	38349	41778	44715
Ασία	12472	14820	17647	21170	24824	29783	32795	35977
Νότια Αμερική	5484	6362	7323	8528	9915	11437	12677	13607
Αφρική/Μέση Ανατολή/Ωκεανία	2459	2808	3092	3456	3837	4302	4499	4823
Όλες οι υπόλοιπες	508	1953	737	891	1033	1592	1407	1597
Σύνολο	80649	87838	98459	108171	118864	132499	144925	154381

Μελετώντας κανείς τους Πίν. 3.2, 3.3 καταλαβαίνει ότι η παγκόσμια ζήτηση για νερό κατάλληλο για ανθρώπινη κατανάλωση και χρήση συνεχώς αυξάνεται, με την αφαλάτωση να παίζει σημαντικό ρόλο σε αυτήν την επιτακτική ανάγκη.

### 3.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Υπάρχουν πολλές πιθανές επιπτώσεις των παράκτιων μονάδων αφαλάτωσης στο (θαλάσσιο) περιβάλλον όπως η πρόσκρουση, η απορρόφηση ή η παγίδευση των υδρόβιων οργανισμών στο σύστημα, η εκροή του αλμόλοιπου, οι εκπομπές καυσαερίων και αερίων του θερμοκηπίου που προέρχονται από την καύση ορυκτών καυσίμων για την ενεργειακή τροφοδότηση των μονάδων, η υψηλή κατανάλωση ενέργειας, η θερμοκρασιακή ρύπανση που προκαλεί η εκροή της άλμης, η μείωση του διαλυμένου οξυγόνου στην υποθαλάσσια περιοχή εκροής της άλμης λόγω της αυξημένης αλατότητας και θερμοκρασίας, η συγκέντρωση χλωρίου στο διάλυμα της άλμης κ.ά.

#### 3.2.1 Επιπτώσεις από την εισροή θαλασσινού νερού

Κατά την εισροή θαλασσινού νερού τροφοδοσίας, υπάρχει η πιθανότητα πρόσκρουσης, απορρόφησης, παγίδευσης ή ακόμα και εισχώρησης των υδρόβιων οργανισμών (ψάρια, αυγά ψαριών, φυτοπλαγκτόν, ζωοπλαγκτόν κλπ.) στο σύστημα (Εικ. 3.1). Αυτό μπορεί να προκαλέσει την θνησιμότητα αυτών των οργανισμών και βλάβες στο σύστημα επηρεάζοντας την καλή λειτουργία του. Η τοποθέτηση και εγκατάσταση των διαφόρων αγωγών εισροής και εκροής προκαλεί διαταραχές και αλλαγές στον βυθό του θαλάσσιου οικοσυστήματος, αλλά επίσης μπορεί να δημιουργήσει νέους τεχνητούς υφάλους για τον τοπικό βιότοπο της περιοχής. Ένας εναλλακτικός τρόπος εισαγωγής θαλασσινού νερού τροφοδοσίας, που ελαχιστοποιεί τις επιπτώσεις από την εισροή υδρόβιων οργανισμών στο σύστημα, είναι τα παράκτια πηγάδια εισαγωγής θαλασσινού νερού τροφοδοσίας αλλά η χρήση τους

συνεπάγεται μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας και υψηλότερο κόστος. Επιπλέον, δύο ακόμα παράγοντες που πρέπει να συνυπολογιστούν είναι η πιθανότητα εμφάνισης τυχόν διαρροών στα τοιχώματα των αγωγών (μόλυνση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα) και η ηχορύπανση. Ουσιαστικά όμως η ηχορύπανση δεν διαδραματίζει τόσο σημαντικό ρόλο, διότι πρώτον η εγκατάσταση δεν θα είναι τοποθετημένη κοντά σε κατοικημένες περιοχές ή περιοχές αναψυχής και δεύτερον, ο θόρυβος συνήθως που παράγεται, δεν ξεπερνά το κανονικό και επιτρεπτό όριο των 65 dBA (Ldn).



**Εικόνα 3.1:** Αγωγός εισροής θαλασσινού νερού της μονάδας αφαλάτωσης της Nuweiba (Αίγυπτος)

### 3.2.2 Επιπτώσεις από την εκροή του αλμόλοιπου

Κατά την εκροή του αλμόλοιπου, το διάλυμα της άλμης που απορρίπτεται έχει υψηλότερη τιμή αλατότητας και θερμοκρασίας. Η άλμη υψηλής αλατότητας και θερμοκρασίας μπορεί να αυξήσει τοπικά την αλατότητα του νερού του θαλάσσιου περιβάλλοντος από 5 μέχρι 10 ppt και την θερμοκρασία περιβάλλοντος από 7 μέχρι 8 °C. Αρνητικές συνέπειες έχει κατά κύριο λόγο, η απόρριψη υδάτων υψηλής αλατότητας στα ευαίσθητα υποθαλάσσια οικοσυστήματα. Το διάλυμα άλμης που απορρίπτεται, έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από το νερό της θάλασσας και κατακάθεται στον βυθό προκαλώντας καταστροφικές συνέπειες. Οι επιπτώσεις αυτές εξαρτώνται από τις φυσικοχημικές ιδιότητες των απορριπτόμενων διαλυμάτων και τα υδρογραφικά και βιολογικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος - αποδέκτη. Τα ρηχά ύδατα και γενικά οι περιοχές με μικρό σχετικά βάθος, στις οποίες παρατηρείται πλούσια βιοποικιλότητα, είναι πιο ευαίσθητες από αυτές της ανοικτής θάλασσας, στις οποίες η διάσπαση και η διάχυση της άλμης γίνονται ευκολότερα. Σε πολλές περιπτώσεις υπάρχει η πιθανότητα απόρριψης άλμης μαζί με υγρά απόβλητα υψηλής θερμοκρασίας που προέρχονται από κάποια παρακείμενη εγκατάσταση

παραγωγής ενέργειας που καλύπτει τις ενεργειακές απαιτήσεις της μονάδας αφαλάτωσης. Οι περισσότεροι οργανισμοί μπορούν να προσαρμοστούν σε μικρές αποκλίσεις της θερμοκρασίας και της αλατότητας, ακόμα και να αντέξουν σε ακραίες συνθήκες προσωρινά. Η συνεχής έκθεση όμως σε δυσμενείς συνθήκες, μπορεί να γίνει καταστροφική προκαλώντας μόνιμες αλλοιώσεις στην σύσταση και στην αφθονία των ειδών. Αυτές οι αλλαγές μπορεί να ελκύσουν νέους οργανισμούς που τελικά θα υπερισχύσουν ή να απομακρύνουν τους ήδη υπάρχοντες. Η μείωση της θερμοκρασίας της άλμης μπορεί να γίνει με την χρήση «ψυκτικών» υδάτων.

Η καύση ορυκτών καυσίμων για την ενεργειοδότηση των μονάδων αφαλάτωσης έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, που ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα και ενισχύουν την κλιματική αλλαγή. Το 2015, παρατηρήθηκε ότι το 50% της παγκόσμιας παραγωγής αλάτων από την θάλασσα, βασίζεται σε ορυκτές πηγές ενέργειας. Ειδικά, οι μονάδες που χρησιμοποιούν θερμικές τεχνικές αφαλάτωσης εκπέμπουν περισσότερους ρυπογόνους παράγοντες στην ατμόσφαιρα λόγω των υψηλότερων ενεργειακών απαιτήσεων. Είναι σημαντικό όμως, να γίνει διάκριση ανάμεσα στην μείωση των εκπομπών καυσαερίων και στην μείωση της χρησιμοποιούμενης από ορυκτά καύσιμα ενέργειας. Η υψηλή κατανάλωση ενέργειας επιβαρύνει την ρύπανση της ατμόσφαιρας μέσω των εκπομπών διοξειδίου του θείου ( $SO_2$ ) και οξειδίων του αζώτου ( $NO_x$ ). Ωστόσο, οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου ελαττώνονται λόγω τεχνολογικών αναβαθμίσεων και οι εκπομπές διοξειδίου του θείου υφίστανται διακυμάνσεις ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται πετρέλαιο αντί για φυσικό αέριο. Σε μερικές περιοχές της Μέσης Ανατολής, ο τομέας της παραγωγής αφαλατωμένου νερού είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος εκπομπός διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ) μετά τον τομέα της εξόρυξης και διύλισης του πετρελαίου. Η χρήση ορυκτών καυσίμων αναμένεται να αυξηθεί, καθώς αυξάνονται οι μονάδες που θέτονται σε λειτουργία λόγω της αυξανόμενης ζήτησης νερού. Ένας τρόπος αντιμετώπισης είναι η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή τουλάχιστον η εκτίμηση και ανάλυση των εκπομπών ρύπων των επιμέρους τμημάτων με σκοπό την μέγιστη δυνατή μείωση αυτών.

Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στην περιοχή εκροής μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά από την άλμη. Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου θα ελαττωθεί, γιατί το διάλυμα εκροής έχει υψηλότερη θερμοκρασία και αλατότητα από ότι το περιβάλλον. Αυτό έχει ως άμεση συνέπεια την υποξία, δηλαδή την δημιουργία συνθηκών με χαμηλά επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου που μπορούν να αποβούν καταστροφικά για την υδρόβια ζωή. Η αύξηση της θερμοκρασίας τοπικά συνεπάγεται μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου και αύξηση της βιομάζας που προέρχεται από την απόρριψη των οργανισμών που έχουν εισαχθεί στο σύστημα. Στην RO η θερμοκρασία της άλμης δεν ποικίλλει τόσο πολύ, ώστε να επιφέρει αλλαγές στα επίπεδα του διαλυμένου οξυγόνου. Η προσθήκη όμως χημικών για τον περιορισμό της διάβρωσης και για την εξάλειψη των υπολειμμάτων χλωρίου, που δεσμεύουν το οξυγόνο μπορούν να τα μειώσουν.

Τα υψηλά επίπεδα αλκαλικότητας της άλμης, αυξάνουν την ποσότητα ανθρακικού ασβεστίου, θειικού ασβεστίου και άλλων στοιχείων της θάλασσας σχεδόν στην διπλάσια τιμή από την κανονική. Ελάχιστα πειράματα έχουν διεξαχθεί για να ποσοτικοποιήσουν την αλλαγή της αλκαλικότητας του θαλασσινού νερού και την αντοχή των υδρόβιων οργανισμών σε αυτή. Το εύρος του pH της θάλασσας επίσης υφίσταται διακυμάνσεις λόγω της άλμης που παρόλα αυτά είναι αμελητέες σε σχέση με τις υπόλοιπες επιπτώσεις. Για την καλύτερη λειτουργία των μονάδων απαιτείται

προεπεξεργασία και μετεπεξεργασία των υδάτων, ώστε να αφαιρεθούν τα χημικά που προστίθενται για την ενίσχυση της κροκίδωσης και την αποφυγή της αλλοίωσης των μεμβρανών και που μπορούν να επηρεάσουν το θαλάσσιο οικοσύστημα.

Στις περισσότερες μονάδες αφαλάτωσης, γίνεται προσθήκη χλωρίου κατά την προεπεξεργασία του νερού τροφοδοσίας με σκοπό την μείωση της βιοσυσσώρευσης, δηλαδή της συγκέντρωσης υδρόβιων οργανισμών στο σύστημα όπως φύκια, άλγες κλπ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την ύπαρξη διαφόρων υπολειμμάτων και καταλοίπων στα ρεύματα απόρριψης, όπως ο υποβρωμίτης. Οι εκροές άλμης από τις μονάδες απόσταξης περιέχουν υπολείμματα χλωρίου FRC (Free Residuals of Chlorine) της τάξης των 200 - 500  $\mu\text{g}/\text{lt}$ , που είναι το 10 - 25% της συγκέντρωσης. Στα συστήματα RO, το νερό τροφοδοσίας χλωριώνεται αλλά πριν την εισαγωγή του στις μεμβράνες αποχλωριώνεται με όξινο θειώδες ή διθειώδες νάτριο για να αποφευχθεί η καταστροφή τους. Η συγκέντρωση χλωρίου στις ροές εκροής, εξαρτάται από την δοσολογία που χρησιμοποιείται κατά την χλωρίωση του νερού. Η αύξηση της συγκέντρωσης των υπολειμμάτων χλωρίου, επηρεάζει την ποιότητα του νερού του περιβάλλοντος και κατ' επέκταση το οικοσύστημα. Μετά την απόρριψη, αναμένεται περαιτέρω μείωση των υπολειμμάτων χλωρίου FRC μέχρι και 90% με εκτιμώμενες συγκεντρώσεις της τάξης των 20 - 50  $\mu\text{g}/\text{lt}$  στην περιοχή απόρριψης. Αυτό συμπίπτει με τα επίπεδα (30 - 100  $\mu\text{g}/\text{lt}$ ) που παρατηρούνται στις ζώνες ανάμειξης μεγάλων μονάδων απόσταξης. Λόγω των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των υπολειμμάτων χλωρίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά το διθειικό νάτριο, η μονοχλωραμίνη, ο θειικός χαλκός και το όζον. Ωστόσο, κανένα από αυτά δεν έχει βρει αποδοχή, σε αντίθεση με το διοξείδιο του χλωρίου που θεωρείται ως πιθανή εναλλακτική λύση.

Τα κράματα χαλκού και νικελίου χρησιμοποιούνται ευρέως ως υλικά κατασκευής για τους εναλλάκτες θερμότητας που υπάρχουν στις μονάδες απόσταξης. Οι συγκεντρώσεις χαλκού που υπάρχουν στον αλμόλοιπο των μονάδων απόσταξης και προκύπτουν λόγω των διαφόρων διαβρώσεων, είναι της τάξης των 15 - 100  $\mu\text{g}/\text{lt}$ . Η παρουσία του χαλκού δεν προϋποθέτει απαραίτητα ότι θα έχει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Οι φυσικές συγκεντρώσεις χαλκού στον ωκεανό και στις εκβολές των ποταμών είναι περίπου 0.1  $\mu\text{g}/\text{lt}$  και 100  $\mu\text{g}/\text{lt}$ , αντίστοιχα. Είναι αρκετά δύσκολη η διάκριση ανάμεσα στα φυσικά επίπεδα του χαλκού και σε αυτά που προέρχονται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (βιομηχανία κλπ.). Οι συγκεντρώσεις όμως που υπάρχουν στις ροές εκροής των μονάδων απόσταξης μπορούν να επηρεάσουν τα φυσικά επίπεδα του χαλκού.

Η μη ιονισμένη αμμωνία είναι εξαιρετικά τοξική για τους υδρόβιους οργανισμούς. Στο περιβάλλον υπάρχει και ιονισμένη και μη ιονισμένη αμμωνία. Οι συγκεντρώσεις αυτών των δύο εξαρτώνται από το pH. Αν το pH είναι υψηλό, τότε η συγκέντρωση της μη ιονισμένης αμμωνίας είναι υψηλή και επηρεάζει την υδρόβια ζωή. Οι συγκεντρώσεις αυτών των δύο στις περιοχές απόρριψης εξαρτώνται από το μέγεθος των μονάδων και τις τοπικές συνθήκες του νερού του περιβάλλοντος. Γενικά, για να αποφευχθεί ο αρνητικός αντίκτυπος στο περιβάλλον, πρέπει οι συγκεντρώσεις των ρευμάτων απόρριψης να συμπίπτουν ή τουλάχιστον να είναι μέσα στο εύρος τιμών των φυσικών συγκεντρώσεων.

### 3.2.3 Τρόποι αντιμετώπισης της αλατότητας

Εκτιμάται ότι για κάθε 1 m<sup>3</sup> αφαλατωμένου νερού που παράγεται, προκύπτουν 2 m<sup>3</sup> άλμης που απορρίπτονται στην θάλασσα και επηρεάζουν την ποιότητα του νερού και την υδρόβια ζωή. Παρά την τεχνολογική ανάπτυξη καινούργιων τεχνικών αφαλάτωσης, ελάχιστες βελτιώσεις έχουν σημειωθεί στην διαχείριση των ρευμάτων απόρριψης της άλμης λόγω του αυξανόμενου κόστους. Για την αποφυγή των επιπτώσεων της υψηλής αλατότητας, η άλμη μπορεί να αραιωθεί με θαλάσσια ή ψυκτικά ύδατα και η εκροή της να γίνει τμηματικά μέσω πολλαπλών αγωγών. Σε αυτό μπορούν να συμβάλλουν και τα διάφορα συστήματα προσομοίωσης της εκροής της άλμης, όπως το CORMIX. Για την αποφυγή των επιπτώσεων της υψηλής θερμοκρασίας, πρέπει να γίνει η μέγιστη δυνατή απορρόφηση - ανάκτηση της θερμικής ενέργειας ή μέγιστη δυνατή διασπορά αυτής στο περιβάλλον (π.χ. με ψυκτικούς πύργους), μαζί με την μέγιστη εφικτή αραιώση πριν την απόρριψη. Οι επιπτώσεις των χημικών μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με την αντικατάσταση των επικίνδυνων ουσιών και με την υλοποίηση εναλλακτικών επιλογών επεξεργασίας. Ειδικά, τα βιοκτόνα όπως το χλώριο, που μπορούν έντονα να επηρεάσουν μη στοχευμένους οργανισμούς στην περιοχή απόρριψης, πρέπει να αντικαθίστανται ή να επεξεργάζονται πριν την απόρριψη. Το χλώριο μπορεί να αφαιρεθεί αποτελεσματικά από διάφορα χημικά όπως το διθειώδες νάτριο (για τις μονάδες RO) και το διοξειδίο του θείου και υπεροξειδίο του υδρογόνου (για τις μονάδες απόσταξης). Τα ύδατα αντίστροφης ροής για τον καθαρισμό των φίλτρων πρέπει να επεξεργάζονται με καθίζηση, ενώ τα καθαριστικά διαλύματα πρέπει να επεξεργάζονται σε ειδικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας ή να απορρίπτονται σε κατάλληλο αποχετευτικό σύστημα. Μια καινούργια διαδικασία διαχείρισης της άλμης, είναι η χημική αντίδρασή της με το διοξειδίο του άνθρακα. Αυτή η προσέγγιση, που υπόσχεται ότι θα είναι οικονομική, αποτελεσματική και φιλική προς το περιβάλλον, χρησιμοποιεί χημικές αντιδράσεις για να μετατρέψει την άλμη σε διπτανθρακικό νάτριο (μαγειρική σόδα) και το υφάλμυρο πλέον νερό σε νερό άρδευσης. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι το κύριο αεριώδες αντιδρόν (διοξειδίο του άνθρακα) μπορεί να είναι καθαρό ή υπό την μορφή μείγματος καυσαερίων, που δείχνει την δυνατότητα αυτής της προσέγγισης και για ανάκτηση του διοξειδίου του άνθρακα από καυσαέρια.

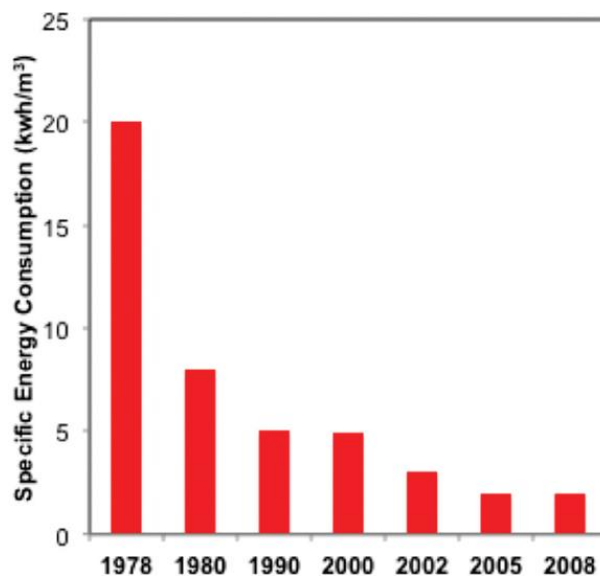
### 3.2.4 Κατανάλωση και εξοικονόμηση ενέργειας

Η κατανάλωση ενέργειας (περίπου 3 - 5 kWh/m<sup>3</sup> για θαλασσινό νερό και 0.5 - 3 kWh/m<sup>3</sup> για υφάλμυρο νερό) είναι ο κύριος παράγοντας κόστους στην αφαλάτωση και έχει μειωθεί αρκετά λόγω των τεχνολογικών καινοτομιών. Τέτοιες καινοτομίες είναι η χρήση μηχανισμών ανάκτησης ενέργειας και η χρήση αντλιών μεταβαλλόμενης συχνότητας στις μονάδες RO. Σε μια μονάδα που χρησιμοποιεί συσσωρευτή εμβόλου και αντλία χαμηλής πίεσης, έχουν παρατηρηθεί τιμές της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας της τάξης των 2 - 2.3 kWh/m<sup>3</sup>.

Η παραγωγή αφαλατωμένου νερού στο σημερινό στάδιο ανάπτυξης είναι πιο ακριβή ως προς το κόστος, από την επεξεργασία πηγών συμβατικών υδάτων. Το υψηλό κόστος οφείλεται στο γεγονός ότι η αφαλάτωση έχει ως στόχο την αποβολή μικρών διαλυτών ρυπογόνων ουσιών όπως άλατα, ανόργανα και οργανικά μολυσματικά στοιχεία κ.ά., που δεν αποτελούν πρόβλημα στην επεξεργασία συμβατικών υδάτων. Επιπρόσθετα, η υψηλή συγκέντρωση αλάτων στο θαλασσινό

νερό επιβάλλει ένα θερμοδυναμικό όριο  $1.1 \text{ kWh/m}^3$  ως την θεωρητική ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας για 50% ανάκτηση νερού, συμβάλλοντας σημαντικά στο κόστος της αφαλάτωσης θαλασσινού νερού. Απαραίτητος στόχος για την βελτίωση της τεχνολογίας αφαλάτωσης είναι ο ενεργειακά αποδοτικότερος και αποτελεσματικότερος διαχωρισμός ρύπων - υδάτων.

Τα συστήματα RO τυπικά χρησιμοποιούν λιγότερη ενέργεια από τα συστήματα θερμικών διεργασιών αφαλάτωσης. Τα ενεργειακά κόστη των διαφόρων τεχνικών αφαλάτωσης ωστόσο, ποικίλουν αρκετά ανάλογα με το μέγεθος των εγκαταστάσεων, το είδος της τεχνικής αφαλάτωσης που χρησιμοποιείται και τέλος, την αλατότητα και περιεκτικότητα σε αλατούχα στοιχεία των επεξεργαζόμενων υδάτων. Προς το παρόν, το κόστος αφαλάτωσης θαλασσίων υδάτων είναι υψηλότερο από τις συνηθισμένες πηγές πόσιμων υδάτων. Παρόλα αυτά, είναι αναμενόμενο ότι όσο η τεχνολογία αναπτύσσεται και βελτιώνεται, τόσο το ενεργειακό κόστος και το κόστος κατασκευής θα μειώνονται (Εικ. 3.2). Η κατανάλωση ενέργειας της τεχνολογίας RO επιπλέον, μειώθηκε περαιτέρω χάρη στις βελτιώσεις στην σύσταση, στις παραγωγικές διαδικασίες και διεργασίες, όπως για παράδειγμα στην ανάκτηση ενέργειας από αλατούχο διάλυμα που βρίσκεται υπό καθεστώς πίεσης, στην σμίκρυνση και απλοποίηση των εγκαταστάσεων των μονάδων, στην πιο αποτελεσματική προεπεξεργασία της τροφοδοσίας και στις πηγές ενέργειας χαμηλότερου κόστους.



**Εικόνα 3.2:** Η ειδική κατανάλωση ενέργειας ( $\text{kWh/m}^3$ ) της RO για το χρονικό διάστημα 1978 - 2008.

Σε κάποιες περιπτώσεις, όπως στην αφαλάτωση θαλασσινού νερού, υπάρχει ο ισχυρισμός ότι οι σημερινές μεμβράνες έχουν φτάσει πολύ κοντά στο θερμοδυναμικό όριο του  $1 \text{ kWh/m}^3$  και ότι περαιτέρω βελτίωση στα υλικά ίσως να μην αποδώσει επιπλέον ενεργειακή εξοικονόμηση. Από την άλλη πλευρά, οι καινοτομίες στην διαπερατότητα και την εκλεκτικότητα μπορούν ακόμα να αποδώσουν σημαντικά οφέλη στην επεξεργασία υφάλμυρων υδάτων και την επαναχρησιμοποίηση λυμάτων. Οι υπερπερατές μεμβράνες με πολύ υψηλή απόρριψη αλάτων που είναι κατάλληλες για RO μπορούν ουσιαστικά να μειώσουν την απαραίτητη ενέργεια (45%) ή την υποδομή των εγκαταστάσεων (δοχεία πίεσης

μέχρι και 65%) για πηγές χαμηλής αλατότητας όπως η αφαλάτωση υφάλμυρων υδάτων ή η επαναχρησιμοποίηση υδάτων. Το ενεργειακό πλεονέκτημα είναι κατά πολύ χαμηλότερο για εφαρμογή σε θαλασσινό νερό υψηλής αλατότητας (15% λιγότερη ενέργεια), αλλά το μέγεθος της εγκατάστασης μπορεί να μειωθεί κατά 44%.

Επιπλέον, εξίσου σημαντική είναι και η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για να ελαχιστοποιηθούν οι κλιματικές και ατμοσφαιρικές επιπτώσεις από την καύση των ορυκτών καυσίμων για την ενεργειοδότηση των μονάδων. Παρά την εμπορευματοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όμως στον τομέα της αφαλάτωσης (π.χ. σύζευξη φωτοβολταϊκών συστημάτων με μονάδες αφαλάτωσης), η διεύθυνση στην αγορά παραμένει μικρή λόγω του υψηλού επενδυτικού κόστους. Ωστόσο, η έρευνα στο πεδίο των φωτοβολταϊκών αναπτύσσεται γρήγορα, με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση του κόστους βραχυπρόθεσμα. Οι έρευνες που γίνονται εστιάζουν στην εξερεύνηση των ιδιοτήτων του άμορφου και κρυσταλλικού πυριτίου και άλλων ημιαγωγών και στην ανάπτυξη συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών συστημάτων.

### 3.2.5 Ισραήλ: Ένα παράδειγμα προς μίμηση στην διαχείριση των υδάτων

Η τεχνολογία της αφαλάτωσης χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλά μέρη του κόσμου, ειδικά στα ξηρά μέρη της Μέσης Ανατολής. Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα είναι το Ισραήλ, το οποίο βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην επαναχρησιμοποίηση λυμάτων και στην αφαλάτωση θαλάσσιων υδάτων για την κάλυψη των αναγκών του σε νερό. Το 86% των λυμάτων του ανακυκλώνεται και το 60% του πόσιμου νερού παράγεται από αφαλάτωση (το αντίστοιχο ποσοστό στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α., που υποφέρει συχνά από σοβαρή ξηρασία, είναι 7% και λιγότερο από 1%). Η μονάδα αφαλάτωσης Σώρεκ, η μεγαλύτερη μονάδα αφαλάτωσης του Ισραήλ και η μεγαλύτερη μονάδα αφαλάτωσης RO στον κόσμο τόσο από άποψη έκτασης όσο και από άποψη παραγωγικής ικανότητας, αποτελεί παράδειγμα προς μίμηση. Χρησιμοποιεί μεμβράνες 16 ιντσών, που παράγουν 4.3 φορές περισσότερο νερό από τις συνηθισμένες μεμβράνες και κατασκευάστηκε σε απόσταση 2.5 km από την ακτογραμμή. Τρεις μεγάλοι αγωγοί έχουν τοποθετηθεί με την βοήθεια μετροπόντικα (TBM) κάτω από τον βυθό, οι δύο είναι εισροής και ο ένας εκροής με τον κάθε αγωγό εισροής να αντλεί 13,000 m<sup>3</sup>/h. Η μονάδα για κάθε 2 m<sup>3</sup> νερού που παίρνει από την θάλασσα, επιστρέφει 1 m<sup>3</sup> (50% ανάκτηση) με αλατότητα 7% αντί για 3.5%. Παρά το γεγονός ότι ο αλμόλοιπος έχει αλατότητα 7% αντί για 3.5%, η ανάμειξή του με το νερό παρακολουθείται ώστε να είναι βέβαιο ότι δεν επηρεάζει την θαλάσσια ζωή στην περιοχή. Αν το νερό που παράγεται είναι περισσότερο από όσο καταναλωθεί, τότε οδηγείται στον υπόγειο υδροφόρα για τον εμπλουτισμό του. Σύμφωνα με τους υπεύθυνους της μονάδας, η άντληση του νερού τροφοδοσίας γίνεται με πολύ χαμηλή πίεση προκειμένου να μη «ρουφά» ψάρια ή άλλα είδη. Από το φιλτράρισμα του νερού (πριν από τις μεμβράνες) προκύπτουν καθημερινά 30 τόνοι λάσπης, που οδηγούνται σε ταφή.

Το βασικό ζήτημα στη συγκεκριμένη τεχνολογία εκτιμάται ότι είναι το υψηλό ενεργειακό κόστος. Σήμερα, για την αφαλάτωση 1 m<sup>3</sup> νερού την ώρα χρειάζονται 3.5 - 3.6 kW και επειδή η ενέργεια καλύπτει το 50% του κόστους παραγωγής του νερού, η μονάδα λειτουργεί κυρίως τη νύχτα, ειδικά το καλοκαίρι, όπου η τιμή του ρεύματος είναι χαμηλότερη. Εξίσου σημαντική για την χώρα αυτή είναι και η έρευνα που γίνεται ως προς τις τεχνολογίες διαχείρισης του νερού όπως ο εντοπισμός των διαφόρων



ρυπαντών με βάση το χρώμα της επιφάνειας της μεμβράνης (το χρώμα να αλλάζει ανάλογα με το pH) και η δημιουργία μεμβρανών που θα αυτοκαθαρίζονται.

Το Ισραήλ όμως, εκτός από την εξέλιξη που έχει σημειώσει στον τομέα της αφαλάτωσης και της διαχείρισης του νερού, έχει καταφέρει να αυξήσει την παραγωγικότητα των καλλιεργήσιμων εδαφών, ακόμα και να μετατρέψει άγονα εδάφη σε καλλιεργήσιμα μέσω της στάγδην άρδευσης, δηλαδή μέσω της εξοικονόμησης και του υπολογισμού της απαραίτητης για το φυτό ποσότητας, νερού. Η γεωργία καταναλώνει το 70% του νερού παγκοσμίως με το 85% των καλλιεργειών να υπόκειται στον συμβατικό τρόπο ποτίσματος, ο οποίος είναι αντιπαραγωγικός γιατί το περισσότερο νερό δεν απορροφάται από το φυτό και απλά χάνεται. Με την στάγδην άρδευση, η παροχή νερού ρυθμίζεται ανάλογα με τα βιολογικά στάδια του φυτού, μαζί με το λίπασμα. Κατά αυτόν τον τρόπο, το φυτό «μαθαίνει» να λαμβάνει θρεπτικές ουσίες με σταθερό τρόπο καταναλώνοντας λιγότερη ενέργεια. Με την σωστή άρδευση και λίπανση, η παραγωγή μπορεί να αυξηθεί από 15% έως και 200%, η κατανάλωση νερού να μειωθεί κατά 50% και η ποσότητα των λιπασμάτων να μειωθεί κατά 30%, αφού πάνω από το 95% του νερού θα καταλήξει στο φυτό. Ταυτόχρονα, αποτρέπονται η νιτρορύπανση και η διάβρωση των εδαφών. Η στάγδην άρδευση είναι κατάλληλη για τα περισσότερα είδη καλλιεργειών, ακόμα και για τις υδροβόρες καλλιέργειες όπως το ρύζι. Το καλύτερο παράδειγμα στάγδην άρδευσης και μετατροπής ενός άγονου εδάφους σε καλλιεργήσιμο είναι οι φυτείες του Ισραήλ στην έρημο Negev. Το σύστημα άρδευσης είναι όλο υπόγειο και το χώμα δείχνει επιφανειακά ξερό, αλλά τα φυτά είναι καταπράσινα. Η συλλογή των καρπών γίνεται μηχανικά και υπάρχουν αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι σε κλαδιά, ώστε να ελέγχουν την υγρασία στα δεδομένα της οποίας βασίζεται ο αγρονόμος για να αποφασίσει πόσο νερό χρειάζεται κάθε φορά. Το νερό έρχεται στην περιοχή με τους γνωστούς (στο Ισραήλ) μωβ σωλήνες, που σημαίνει ότι προέρχεται από κέντρο επεξεργασίας αστικών λυμάτων, όπως το 54% του αρδευτικού νερού όλης της χώρας.

### 3.2.6 Τελικές παρατηρήσεις - συμπεράσματα

Για να ελαχιστοποιηθούν ή ακόμα και να αποφευχθούν οι επιπτώσεις από την εκροή της άλμης στο θαλάσσιο οικοσύστημα, συμπεραίνεται από τα παραπάνω ότι η κάθε μονάδα πρέπει να ακολουθεί και να τηρεί τα εξής:

- Πρέπει οπωσδήποτε και πέρα από τις θεωρητικές προβλέψεις οι μονάδες να κάνουν συνεχείς και συστηματικούς ελέγχους της αλατότητας στο σημείο εκροής και πέρα από αυτό.
- Οι υποβρύχιοι διαχυτήρες (αγωγοί εκροής) είναι προτιμότεροι από τις επιφανειακές απορροές διότι έτσι δεν υπάρχει άλμη σε επιφανειακά νερά που ζουν πιο ευαίσθητοι οργανισμοί και γίνονται οι περισσότερες ανθρώπινες δραστηριότητες, ενώ δεν υπάρχει κίνδυνος ο αλμόλοιπος να προσκολληθεί στην ακτή.
- Ο υποβρύχιος διαχυτήρας πρέπει να είναι όσο πιο μακριά από την ακτή, ώστε να έχει μικρότερο αντίκτυπο στις ανθρώπινες δραστηριότητες και μια πιθανή αστοχία να συμβεί μακριά από την ακτή.
- Ο διαχυτήρας πρέπει να στοχεύει κάθετα υπό γωνία 30° έως 60°. Αυτό ωθεί την απορροή μακριά από την ακτή και μειώνει το μήκος και το κόστος του

αγωγού. Παράλληλα αποφεύγεται ο κίνδυνος, ο αλμόλοιπος να γυρίσει προς την ακτή και να υπάρχουν προβλήματα διάβρωσης κ.λπ. Ο διαχυτήρας δεν πρέπει να στοχεύει στην επιφάνεια ή προς την ακτή, τέτοιες δομές δεν συνίστανται.

- Οι μονάδες θα πρέπει να κτίζονται σε μη κατοικημένες περιοχές, που δεν έχουν ψυχαγωγικό χαρακτήρα (παραλίες κλπ.). Επίσης θα ήταν σκόπιμο οι μονάδες να βρίσκονται κοντά σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας, έτσι ώστε να αποφεύγεται το οικονομικό αλλά και το περιβαλλοντικό κόστος από τη μεταφορά της ενέργειας.
- Οι μονάδες πρέπει να έχουν εύκολη πρόσβαση στα αντλιοστάσια ύδρευσης της περιοχής για να μην υπάρχει και υψηλό κόστος μεταφοράς του νερού.
- Όσο μεγαλύτερη παραγωγικότητα έχει η μονάδα τόσο πιο μακριά από την ακτή πρέπει να γίνεται η εκροή του αλμόλοιπου, σε μεγαλύτερο βάθος και μακριά από κατοικημένες περιοχές. Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και μια μελλοντική επέκταση της μονάδας που θα αύξανε την εκροή και πιθανώς την αλατότητά της.

### **3.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΔΟΧΩΡΑΣ**

Η διαχείριση της άλμης που προέρχεται από τις μονάδες αφαλάτωσης υφάλμυρων υδάτων της ενδοχώρας αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα. Οι συμβατικές επιλογές απόρριψης της άλμης των μονάδων της ενδοχώρας περιλαμβάνουν την απόρριψη σε επιφανειακά ύδατα, σε κοινοτικά αποχετευτικά συστήματα (υπόνοιμοι), σε λίμνες εξάτμισης, σε πηγάδια με έγχυση υπό πίεση και την χρήση του αλατούχου διαλύματος της άλμης για την άρδευση ανθεκτικών στην υψηλή αλατότητα φυτών. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τον εκάστοτε τρόπο απόρριψης είναι ο όγκος ή η ποσότητα του συμπυκνώματος, η ποιότητα και τα συστατικά του συμπυκνώματος, οι φυσικοί και γεωγραφικοί παράγοντες, το κεφαλαιακό και λειτουργικό κόστος, η διαθεσιμότητα της τοποθεσίας, η αδειοδότηση, η πιθανότητα μιας μελλοντικής επέκτασης των εγκαταστάσεων και η δημόσια αποδοχή των κατοίκων της περιοχής. Όλοι αυτοί οι παράγοντες μπορούν να επιφέρουν διακυμάνσεις στο κόστος απόρριψης της άλμης της τάξης του 5 - 33% του συνολικού κόστους της εγκατάστασης. Ο καθορισμός του τρόπου απόρριψης της άλμης πρέπει να γίνεται αφότου έχουν ολοκληρωθεί οι απαραίτητες μελέτες και έρευνες, ώστε να ελαχιστοποιηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η ποσότητα της άλμης και κατ' επέκταση το κόστος απόρριψής της. Αυτό κατά κύριο λόγο πραγματοποιείται με την εφαρμογή κατάλληλης προεπεξεργασίας του νερού τροφοδοσίας, με την σωστή λειτουργία της διαδικασίας αφαλάτωσης και με την μεγιστοποίηση της δυνατότητας ανάκτησης νερού (και ενέργειας αν γίνεται) από το σύστημα. Πρέπει όμως να δοθεί προσοχή στην αύξηση της αλατότητας και να ληφθεί υπόψη η ποιότητα της παραγόμενης άλμης. Η Εικ. 3.3 δείχνει εδάφη επηρεασμένα από άλατα, στο Κολοράντο των Η.Π.Α.



**Εικόνα 3.3:** Εδάφη επηρεασμένα από άλατα στο Κολοράντο (Η.Π.Α.)

### **3.3.1 Απόρριψη της άλμης σε επιφανειακά ύδατα και αποχετευτικά συστήματα**

Η απόρριψη της άλμης σε επιφανειακά ύδατα αποτελεί, αν είναι διαθέσιμη και εφικτή, μια από τις πρώτες επιλογές αντιμετώπισης του προβλήματος. Αυτό αντιπροσωπεύει μια εύκολη και γρήγορη λύση γιατί το διάλυμα της άλμης αναμειγνύεται και αραιώνεται με το διάλυμα των επιφανειακών υδάτων. Παρόλα αυτά, η ήδη υπάρχουσα αλατότητα των επιφανειακών υδάτων είναι πολύ πιθανόν να αυξηθεί λόγω της υψηλής αλατότητας της άλμης και για αυτόν τον λόγο πρέπει εξίσου να ληφθεί υπόψη, η ικανότητα διάλυσης της άλμης αυτών των υδάτων. Άρα συμπεραίνεται από τα παραπάνω, ότι η απόρριψη της άλμης σε επιφανειακά ύδατα πρέπει να είναι επιτρεπτή μόνον όταν είναι απόλυτα σίγουρο ότι θα αποφευχθούν οι οποιοσδήποτε δραματικές επιπτώσεις και αλλοιώσεις στο περιβάλλον.

Μια άλλη πιθανή επιλογή και λύση είναι η απόρριψη σε κάποιο κοντινό κοινοτικό αποχετευτικό σύστημα. Τέτοιου είδους πρακτικές ακολουθούνται συνήθως από μικρές μονάδες αφαλάτωσης που χρησιμοποιούν κάποια μέθοδο μεμβρανών. Αυτή η επιλογή παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα όπως η χρήση ενός ήδη υπάρχοντος, εγκατεστημένου και διαθέσιμου συστήματος υπονόμων. Η αύξηση όμως της αλατότητας του νερού των υπονόμων συνεπάγεται μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου, που συνεπώς αυξάνει την βιοχημική απαίτηση οξυγόνου (Biochemical Oxygen Demand, BOD). Η αυξημένη αλατότητα των υγρών αποβλήτων των υπονόμων μπορεί να προκαλέσει διάφορα προβλήματα στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, ειδικά κατά το στάδιο της βιολογικής επεξεργασίας. Επίσης, η απόρριψη της άλμης σε επεξεργασμένα λύματα που προορίζονται για άρδευση καλλιεργήσιμων εδαφών και γεωργική χρήση, τα καθιστά πλέον ακατάλληλα για τον σκοπό αυτό.

### **3.3.2 Απόρριψη σε λίμνες εξάτμισης**

Στις λίμνες εξάτμισης, ο αλμόλοιπος απορρίπτεται σε περιοχές μεγάλης επιφανειακής έκτασης, στις οποίες γίνεται η φυσιολογική εξάτμισή του. Η χρήση των λιμνών εξάτμισης εφαρμόζεται σε άνυδρες και ξηρές περιοχές, ιδίως της Μέσης Ανατολής και της Αυστραλίας και είναι πιθανότατα ο πιο ευρέως διαδεδομένος

τρόπος απόρριψης άλμης για τις μονάδες αφαλάτωσης της ενδοχώρας. Οι λίμνες εξάτμισης παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα όπως η ευκολία κατασκευής, το χαμηλό λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης και η απουσία οποιουδήποτε (ειδικά μηχανολογικού) εξοπλισμού. Η εφαρμογή τους βρίσκει ανταπόκριση κυρίως σε ξηρά μέρη με υψηλούς ρυθμούς εξάτμισης, με ελάχιστες βροχοπτώσεις και με χαμηλή (οικονομική) αξία της γης. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα καλλιέργειας και παραγωγής γαρίδων άλμης, καθώς δημιουργούνται ιδανικές συνθήκες περιβάλλοντος λόγω της απουσίας θηρευτών.

Η κύρια ανησυχία που υπάρχει και σχετίζεται με τις λίμνες εξάτμισης είναι η διαρροή της άλμης στο έδαφος. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της αλατότητας και μόλυνση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η συγκέντρωση των αλάτων, χρησιμοποιούνται ως δείκτες αυτής της διαρροής με την ελάχιστη αύξηση των τιμών τους να σημαίνει πιθανή διαρροή. Η αλλοίωση του εδάφους και της ποιότητας των υπογείων υδάτων αποτελούν τα κύρια μειονεκτήματα αυτού του τρόπου απόρριψης της άλμης. Ένας τρόπος αντιμετώπισης της διαρροής της άλμης είναι η εγκατάσταση και χρήση πολυμερικών στρωμάτων. Επίσης, ένα ακόμα μειονέκτημα των λιμνών εξάτμισης είναι ότι το νερό του συμπυκνώματος δεν μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί και απλά χάνεται. Επιπλέον, μετά την εξάτμιση μπορεί να γίνει αερομεταφορά και εναπόθεση των αλάτων σε κοντινές γεωργικές περιοχές, με αποτέλεσμα την μόλυνση και μείωση της παραγωγικότητάς τους. Συνοψίζοντας, παρά το μικρό κόστος λειτουργίας και συντήρησης, η αύξηση της παραγωγικής ικανότητας της μονάδας συνεπάγεται αύξηση της απαιτούμενης έκτασης απόρριψης και η τοποθέτηση πολυμερικών στρωμάτων συνεπάγεται αύξηση του κατασκευαστικού κόστους. Άρα από τα παραπάνω, προκύπτει ότι οι λίμνες εξάτμισης δεν είναι κατάλληλες για την διαχείριση μεγάλων ποσοτήτων συμπυκνώματος.

### **3.3.3 Απόρριψη με έγχυση σε πηγάδια υπό πίεση**

Κατά την απόρριψη με έγχυση σε πηγάδια, η άλμη προωθείται υπό πίεση στο υπέδαφος σε βάθη που ποικίλλουν από μερικές εκατοντάδες μέχρι χιλιάδες μέτρα ανάλογα με τους εκάστοτε παράγοντες σχεδιασμού, εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται και θέματα αδειοδότησης, όπως η εύρεση και ταυτοποίηση επαρκών υπόγειων γεωλογικών και έγκλειστων περιοχών για την αποτροπή της ανοδικής πορείας και επιστροφής στην επιφάνεια της άλμης. Παρά το γεγονός ότι κατά τον σχεδιασμό η προσοχή εστιάζεται περισσότερο στις εγκατεστημένες σωληνώσεις εσωτερικά του τελικού περιβλήματος σκυροδέματος, εξίσου σημαντικό ρόλο παίζουν η συμβατότητα του συμπυκνώματος με το υλικό των σωληνώσεων για την αποφυγή διαβρώσεων, η αναμενόμενη ποσότητα του συμπυκνώματος, η ανίχνευση τυχόν διαρροών και τα συστήματα παρακολούθησης. Μια πολύ ελκυστική επιλογή είναι και η χρήση περιοχών με εξαντλημένα αποθέματα πετρελαίου και φυσικού αερίου. Αυτή η προσέγγιση παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα όπως η χρήση των ήδη υπαρχόντων και διαθέσιμων πηγαδιών πετρελαίου και φυσικού αερίου και η μακρά εμπειρία από την λειτουργία τέτοιων πηγαδιών. Πριν την χρησιμοποίηση όμως των πηγαδιών, πρέπει να γίνει ο φυσικός και χημικός έλεγχός τους. Γενικά, επειδή η επιλογή της περιοχής για την δημιουργία τέτοιων πηγαδιών είναι το πιο σημαντικό βήμα, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι υδρολογικές και γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή αυτή. Για

παράδειγμα, η δημιουργία πηγαδιών σε σεισμογενείς περιοχές με έντονη δραστηριότητα είναι απαγορευτική και μη επιτρεπτή.

Συνοπτικά, οι κύριοι παράγοντες που πρέπει να συνυπολογιστούν σε μια εγκατάσταση αυτού του είδους, είναι οι εξής:

- Η επιλογή κατάλληλης περιοχής απόρριψης, η οποία πραγματοποιείται μέσω ποικίλων γεωλογικών και υδρολογικών μελετών για την ταυτοποίησή της.
- Το υψηλό κόστος, που σχετίζεται με το κεφαλαιακό και λειτουργικό κόστος.
- Η πιθανότητα εμφάνισης διαβρώσεων και επακόλουθης διαρροής στο εξωτερικό περιβάλλον των πηγαδιών.
- Η αβεβαιότητα της διάρκειας ζωής των πηγαδιών.
- Η μόλυνση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, που μπορεί να προκύψει από την υψηλή αλατότητα και την παρουσία επιζήμιων χημικών στην άλμη.

### 3.3.4 Μηδενική απόρριψη υγρού

Η επεξεργασία που γίνεται μέσω της διαδικασίας της μηδενικής απόρριψης υγρού (Zero Liquid Discharge, ZLD), έχει σκοπό την παραγωγή αφαλατωμένου νερού και ξηρών αλάτων. Οι περισσότερες εφαρμογές ZLD σήμερα, εξυπηρετούν την επεξεργασία υγρών βιομηχανικών αποβλήτων και λυμάτων με την χρήση θερμικών μεθόδων διαχωρισμού μαζί με μεθόδους μεμβρανών. Ωστόσο, οι μέθοδοι μεμβρανών παρουσιάζουν μειωμένη δυνατότητα ZLD και για αυτόν τον λόγο προτείνεται η χρήση κυρίως θερμικών μεθόδων ή ο συνδυασμός θερμικών μεθόδων - μεθόδων μεμβρανών. Οι συμβατικοί τρόποι αφαλάτωσης επιτυγχάνουν 70 - 85% ανάκτηση του νερού τροφοδοσίας, η οποία εξαρτάται πρωτίστως από την ποιότητα του νερού εισαγωγής και συνήθως περιορίζεται από την καθαλάτωση που προκύπτει, λόγω της παρουσίας κυρίως αλάτων ασβεστίου όπως το θειικό και ανθρακικό ασβέστιο μαζί με το διοξείδιο του πυριτίου. Η ZLD είναι η καταλληλότερη λύση για την διαχείριση της άλμης των μονάδων της ενδοχώρας και τα κυριότερα πλεονεκτήματά της είναι τα εξής:

- Μέγιστη ανάκτηση νερού (Η ZLD παρουσιάζει δυνατότητα ανάκτησης 100%, σε σχέση με τους συμβατικούς τρόπους απόρριψης με κανονική ανάκτηση της τάξης του 70 - 85%. Επίσης, η ZLD μπορεί να μειώσει το μέγεθος της εγκατάστασης κατά 15 - 30%.)
- Διατήρηση των φυσικών πόρων (Η ZLD επειδή δεν επιβαρύνει το περιβάλλον όπως οι συμβατικοί τρόποι απόρριψης, βοηθά στην ποιοτική και ποσοτική διατήρηση του επιφανειακού και του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα.)
- Παραγωγή αλάτων (Η ZLD, όπως προαναφέρθηκε παραπάνω, έχει ως στόχο και την παραγωγή ξηρών αλάτων που βρίσκουν ποικίλες εφαρμογές.)
- Ευκολία ενσωμάτωσης και εφαρμογής (Η ZLD μπορεί να ενσωματωθεί και να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε μονάδα της ενδοχώρας, ανεξάρτητα από το μέγεθος και την τοποθεσία της. Αυτό γίνεται κατά κύριο λόγο επειδή δεν επηρεάζει την κύρια επεξεργασία της διαδικασίας αφαλάτωσης, γιατί ακολουθεί μετά από αυτή.)

Για την εφαρμογή της ZLD, υπάρχουν τρία κυρίαρχα σενάρια. Στο πρώτο σενάριο, μετά από αφαλάτωση RO, ο αλμόλοιπος υπόκειται σε περαιτέρω επεξεργασία από κάποια θερμική μέθοδο αφαλάτωσης, μέσω της χρήσης αποστακτήρων πολλαπλών αποτελεσμάτων ή αποστακτήρων συμπίεσης ατμών (παραγωγή αφαλατωμένου νερού με αλατότητα 10 mg/lit και αλμόλοιπου με αλατότητα 250,000 mg/lit), έχοντας ως σκοπό την κρυσταλλοποίηση και την δημιουργία ξηρών αλάτων. Στο δεύτερο σενάριο, πραγματοποιείται ο συνδυασμός κάποιας μεθόδου μεμβρανών και χημικής επεξεργασίας, κατά την οποία αφαιρούνται οι περισσότεροι παράγοντες που προκαλούν καθαλάτωση. Μετά από αυτό, το διάλυμα που προκύπτει υφίσταται περαιτέρω αφαλάτωση για επιπλέον ανάκτηση νερού που μπορεί να φτάσει και το 95%. Επίσης, η χρήση μεμβρανών μειώνει το κόστος και ελαχιστοποιεί τις απαιτήσεις σε ενέργεια. Στο τρίτο σενάριο, γίνεται χρήση της ηλεκτροδιάλυσης ή κάποιας άλλης παρόμοιας μεθόδου, με δυνατότητα ανάκτησης έως και 97%, για τον ίδιο σκοπό. Η ZLD όμως, στο δεύτερο σενάριο, εκτός από την παραγωγή αλάτων μέσω της κρυστάλλωσης, έχει ως αποτέλεσμα και την παραγωγή δευτερευόντων προϊόντων. Τα ιζηματοποιημένα στερεά που προκύπτουν από την χημική επεξεργασία του αλμόλοιπου, είναι πλούσια σε ασβέστιο υπό την μορφή ανθρακικού και πυριτικού ασβεστίου και σε μαγνήσιο υπό την μορφή υδροξειδίου του μαγνησίου και πυριτικού μαγνησίου. Στην περίπτωση δε, της αφαίρεσης από το ίζημα των θειικών ενώσεων, προστίθενται σε αυτό ο γύψος και το σουλφοαλουμινικό ασβέστιο. Ένα τέτοιο μείγμα βρίσκει ποικιλία εφαρμογών όπως η οδοστρωσία και η βιομηχανία σκυροδέματος.

## **4. ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΚΑΙ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ**

### **4.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Το νερό είναι το πιο σφαιρικά νομοθετημένο αντικείμενο στον τομέα της νομοθεσίας του περιβάλλοντος. Η ανάπτυξη της Ευρωπαϊκής Πολιτικής για το νερό άρχισε στη δεκαετία του 1970 με το «Πρώτο Πρόγραμμα Δράσης για το Περιβάλλον» το 1973 που το ακολούθησε το πρώτο νομοθετικό πακέτο αρχής γενομένης το 1975 με την Οδηγία για το επιφανειακό νερό και ολοκληρώθηκε το 1980 με την Οδηγία για το πόσιμο νερό. Το 1995 τα Ευρωπαϊκά Όργανα συμφώνησαν ότι χρειαζόταν πλέον μια θεμελιακή αναθεώρηση της Κοινοτικής Πολιτικής για το νερό. Η Επιτροπή που εξέταζε την ανάγκη μιας σφαιρικής προσέγγισης αναφορικά με την υδατική πολιτική δέχθηκε σχετικές αιτήσεις από την επιτροπή περιβάλλοντος του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και το Συμβούλιο Υπουργών Περιβάλλοντος και στις 23/10/2000 εισάγεται η Οδηγία 2000/60/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και Συμβουλίου, περί θέσπισης πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων. Ο σκοπός της Οδηγίας αυτής είναι να θέσει ένα γενικό και βασικό πλαίσιο, καλύπτοντας μια ευρεία ποικιλία υδάτων, προκειμένου να επιτύχει τους παρακάτω βασικούς στόχους μιας βιώσιμης πολιτικής νερού:

- επάρκεια πόσιμου νερού,
- επάρκεια για άλλες οικονομικές δραστηριότητες,
- προστασία του περιβάλλοντος - όρια εκπομπής ρύπων (Οδηγίες για αστικά και βιομηχανικά απόβλητα, φυτοφάρμακα, επικίνδυνες ουσίες),
- αντιμετώπιση των δυσμενών επιπτώσεων από πλημμύρες και ξηρασίες,
- έλεγχος ποιότητας υπόγειων και επιφανειακών υδάτων που προορίζονται για πόσιμα ύδατα,
- πρότυπα ποιότητας του νερού ανθρώπινης χρήσης.

Στον παρακάτω Πίν. 4.1 υπάρχουν ενδεικτικά οι ευρωπαϊκές οδηγίες, οι ελληνικοί νόμοι, οι κοινές υπουργικές αποφάσεις, οι πράξεις υπουργικών συμβουλίων και τα φύλλα της εφημερίδας της κυβέρνησης που σχετίζονται με την διαχείριση των υδάτινων πόρων και την προστασία του (υδάτινου) περιβάλλοντος.

**Πίνακας 4.1:** Ευρωπαϊκή και αντίστοιχη Ελληνική Νομοθεσία σχετική με την διαχείριση των υδάτων και την προστασία του περιβάλλοντος

Ευρωπαϊκή Νομοθεσία	Ελληνική Νομοθεσία	Περιγραφή
Οδηγία 2000/60/ΕΚ	Ν. 3199/2003, ΦΕΚ Α 280/2003	Περί προστασίας και διαχείρισης των υδάτων
Οδηγία 98/83/ΕΚ	ΚΥΑ Υ2/2600/2001, ΦΕΚ Β 892/2001	Περί ποιότητας του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης
Συνθήκη της Ευρωπαϊκής Ένωσης - Άρθρα 130Ρ, 130Σ, 130Τ	Ν. 1650/1986, ΦΕΚ Α 160/1986	Περί προστασίας του περιβάλλοντος
Οδηγία 75/440/ΕΟΚ	ΚΥΑ 46399/1352/27.6/3.7.1986, ΦΕΚ Β 438/1986	Περί απαιτούμενης ποιότητας επιφανειακών υδάτων που προορίζονται για πόσιμα
Οδηγία 76/464/ΕΟΚ	ΠΥΣ 144/11.11.1987, ΦΕΚ Α 197/1987, ΚΥΑ 18186/271/24.2/3.3.1988, ΦΕΚ Β 126/1988	Περί ρυπάνσεως από ορισμένες επικίνδυνες ουσίες που χύνονται στο υδάτινο περιβάλλον
Οδηγία 79/869/ΕΟΚ	ΚΥΑ 46399/1352/27.6/3.7.1986, ΦΕΚ Β 438/1986	Περί μεθόδων μέτρησης, συχνότητας δειγματοληψιών, ανάλυσης επιφανειακών υδάτων που προορίζονται για πόσιμα

Οδηγία 80/68/ΕΟΚ	ΚΥΑ 26857/553/4.4/6.4.1988, ΦΕΚ Β 196/1988	Περί προστασίας υπογείων υδάτων από την ρύπανση ορισμένων επικίνδυνων ουσιών
Οδηγία 80/778/ΕΟΚ	ΚΥΑ Α5/288/23.1/20.2.1986, ΦΕΚ Β 53/1986, ΦΕΚ Β 379/1986	Περί της ποιότητας του πόσιμου νερού (παλαιά οδηγία)
Οδηγία 82/176/ΕΟΚ	ΠΥΣ 144/11.11.1987, ΦΕΚ Α 197/1987, ΚΥΑ 18186/271/24.2/3.3.1988, ΦΕΚ Β 126/1988	Περί οριακών τιμών και ποιοτικών στόχων των απορρίψεων υδραργύρου από τον βιομηχανικό τομέα ηλεκτρόλυσης χλωριούχων αλάτων αλκαλίων
Οδηγία 83/513/ΕΟΚ	ΠΥΣ 144/11.11.1987, ΦΕΚ Α 197/1987, ΚΥΑ 18186/271/24.2/3.3.1988, ΦΕΚ Β 126/1988	Περί οριακών τιμών και ποιοτικών στόχων των απορρίψεων καδμίου
Οδηγία 84/491/ΕΟΚ	ΠΥΣ 144/11.11.1987, ΦΕΚ Α 197/1987, ΚΥΑ 18186/271/24.2/3.3.1988, ΦΕΚ Β 126/1988	Περί οριακών τιμών και ποιοτικών στόχων των απορρίψεων εξαχλωροεξανίου
Οδηγία 86/85/ΕΟΚ	-	Περί καθιέρωσης κοινοτικού συστήματος πληροφόρησης για τον έλεγχο και την μείωση της ρύπανσης από την απόρριψη υδρογονανθράκων και άλλων επικίνδυνων ουσιών στην θάλασσα
Οδηγία 91/271/ΕΟΚ	ΥΑ 673/400/1997, ΦΕΚ Β 192/1997	Περί επεξεργασίας αστικών λυμάτων
Οδηγία 91/676/ΕΟΚ	ΚΥΑ 16190/1335/1997, ΦΕΚ Β 519/1997	Περί προστασίας των υδάτων από την νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης



Οδηγία 93/75/ΕΟΚ	-	Περί ελαχίστων απαιτούμενων προδιαγραφών για πλοία που κατευθύνονται ή αποπλέουν από κοινοτικούς λιμένες μεταφέροντας επικίνδυνα ή ρυπογόνα εμπορεύματα
Οδηγίες 96/61/ΕΚ, 97/11/ΕΚ	Ν. 1650/1986, Ν. 3010/2002	Περί ολοκληρωμένης πρόληψης και ελέγχου της ρύπανσης
-	Ν. 1739/1987, ΦΕΚ Α 201/1987	Περί διαχείρισης των υδατικών πόρων και άλλες διατάξεις
-	Π.Δ. 55/1998, ΦΕΚ Α 58/1998	Περί προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος
-	ΚΥΑ Ε1β. 221/1965, ΦΕΚ Β 138/1965	Περί διαθέσεως λυμάτων και βιομηχανικών αποβλήτων
-	ΚΥΑ 55648/2210/1991, ΦΕΚ Β 323/1991	Περί προστασίας του υδάτινου περιβάλλοντος και καθορισμού οριακών τιμών των επικίνδυνων ουσιών στα υγρά απόβλητα
Οδηγίες 78/319/ΕΟΚ, 76/403/ΕΟΚ	ΚΥΑ 72751/3054/1985, ΦΕΚ Β 665/1985	Περί τοξικών και επικίνδυνων αποβλήτων και εξάλειψης πολυχλωροδιαφαινυλίων και πολυχλωροτριφαινυλίων
-	ΚΥΑ 98012/2001/1995, ΦΕΚ Β 40/1996	Περί διαχείρισης των χρησιμοποιούμενων ορυκτελαίων
-	ΚΥΑ 19396/1546/1997, ΦΕΚ Β 604/1997	Περί διαχείρισης επικίνδυνων αποβλήτων

## 4.2 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ

### 4.2.1 Ευρωπαϊκή νομοθεσία

Η Οδηγία 98/83/ΕΚ αφορά την ποιότητα του νερού για ανθρώπινη κατανάλωση και στοχεύει στην προστασία της ανθρώπινης υγείας καθορίζοντας αυστηρά πρότυπα ποιότητας. Τα Κράτη Μέλη πρέπει να επιτηρούν την ποιότητα του πόσιμου νερού και να παίρνουν τα απαραίτητα μέτρα για τη συμβατότητα του με τα υποχρεωτικά πρότυπα. Η Οδηγία καθορίζει παραμέτρους και όρια, συχνότητα δειγματοληψιών και αναλύσεων και μεθόδους αναφοράς για τις αναλύσεις.

Η εφαρμογή των παραπάνω συνεπάγεται ότι τα Κράτη Μέλη πρέπει:

- να καθιερώσουν σύστημα δειγματοληψιών και αναλύσεων για το πόσιμο νερό, συμπεριλαμβανομένων του εμφιαλωμένου και του νερού των δικτύων ύδρευσης καθώς και του νερού που χρησιμοποιείται στην παραγωγή τροφίμων. Ωστόσο, επαφίεται στη διακριτική ευχέρεια των Κρατών Μελών αν αυτό θα οργανωθεί σε εθνικό, περιφερειακό ή τοπικό επίπεδο,
- να προσδιορίσουν τα συστήματα παροχής πόσιμου νερού που δεν πληρούν τις προδιαγραφές και να αναπτύξουν προγράμματα μέτρων για την αντιμετώπιση των προβλημάτων όπως εύρεση και εξάλειψη της ρύπανσης, αλλαγή της πηγής ύδρευσης, επεξεργασία του νερού πριν τη διάθεση στο δίκτυο ύδρευσης,
- να αναπτύξουν αναλυτικές επενδυτικές στρατηγικές προκειμένου να αντιμετωπίσουν τις απαιτούμενες δαπάνες για την βελτίωση, αντικατάσταση ή κατασκευή νέων δικτύων και μονάδων επεξεργασίας,
- να δώσουν ιδιαίτερο βάρος στην αντιμετώπιση του προβλήματος των νιτρικών λιπασμάτων που προέρχονται από αγροτικές χρήσεις και του μολύβδου που προέρχεται από δίκτυα διανομής,
- να εκτιμήσουν το κόστος για τους καταναλωτές και να αναπτύξουν πολιτική ανάκτησης του κόστους,
- να εκτιμήσουν την ανάγκη για εκπαίδευση προσωπικού συντήρησης και λειτουργίας δικτύων ύδρευσης και εγκαταστάσεων επεξεργασίας νερού καθώς και στελεχών στην οικονομική διοίκηση και προγραμματισμό τέτοιων συστημάτων.

#### 4.2.2 Ελληνική Νομοθεσία

Η αντίστοιχη Ελληνική νομοθεσία σε συμμόρφωση και εναρμόνιση με την Ευρωπαϊκή οδηγία 98/83/ΕΚ περί ποιότητας του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης, βρίσκεται στην Κοινή Υπουργική Απόφαση Υ2/2600/2001 και στο ΦΕΚ Β 892/2001. Σύμφωνα με την προαναφερθείσα νομοθεσία, ως νερό ανθρώπινης κατανάλωσης νοείται:

- Το νερό στην φυσική του κατάσταση ή μετά από επεξεργασία που προορίζεται για την οποιαδήποτε άμεση ή έμμεση επαφή με τον ανθρώπινο οργανισμό, ανεξάρτητα από την προέλευσή του και από το εάν παρέχεται από δίκτυο διανομής, από βυτίο ή σε φιάλες.
- Το νερό που χρησιμοποιείται στις επιχειρήσεις παραγωγής τροφίμων για την παρασκευή, επεξεργασία, συντήρηση ή εμπορία προϊόντων ή ουσιών που προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση.

Από τα ύδατα ανθρώπινης κατανάλωσης εξαιρούνται:

- το φυσικό μεταλλικό νερό,
- το νερό που θεωρείται φαρμακευτικό ιδιοσκεύασμα
- και το νερό ανθρώπινης κατανάλωσης που λαμβάνεται από συγκεκριμένη ατομική πηγή με παροχή κάτω των 10 m<sup>3</sup> ημερησίως κατά μέσο όρο,

εξυπηρετεί λιγότερα από 50 άτομα και δεν υπόκειται σε κάποια εμπορική ή δημόσια δραστηριότητα.

Το νερό ανθρώπινης κατανάλωσης είναι υγιεινό και καθαρό εφόσον είναι απαλλαγμένο από μικροοργανισμούς, παράσιτα και οποιεσδήποτε ουσίες, σε αριθμούς και συγκεντρώσεις, που αποτελούν ενδεχόμενο κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία και εφόσον πληρούν τις απαιτήσεις του παραρτήματος Ι (μέρη Α και Β) του ΦΕΚ Β 892/2001 (Πίν. 4.2). Επίσης, συνεπάγεται ότι τα μέτρα που λαμβάνονται για την εφαρμογή της παρούσας Απόφασης δεν οδηγούν, σε καμία περίπτωση, σε άμεση ή έμμεση υποβάθμιση της σημερινής ποιότητας του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης ως προς την προστασία της ανθρώπινης υγείας, ούτε σε αύξηση της ρύπανσης του νερού που χρησιμοποιείται για την παραγωγή πόσιμου νερού.

**Πίνακας 4.2:** Παράρτημα Ι (Μέρη Α και Β) του ΦΕΚ Β 892/2001

Παράμετροι και Παραμετρικές Τιμές	
ΜΕΡΟΣ Α - Μικροβιολογικές Παράμετροι	
Παράμετρος	Παραμετρική Τιμή
Escherichia Coli	0/100 ml
Εντερόκοκκοι	0/100 ml
Για το νερό σε φιάλες:	
Escherichia Coli	0/250 ml
Εντερόκοκκοι	0/250 ml
Pseudomonas Aeruginosa	0/250 ml
Αριθμός αποικιών στους 22 °C	100/ml
Αριθμός αποικιών στους 37 °C	20/ml
ΜΕΡΟΣ Β - Χημικές Παράμετροι	
Παράμετρος	Παραμετρική Τιμή
Ακρυλαμίδιο	0.1 µg/l
Αντιμόνιο	5 µg/l
Αρσενικό	10 µg/l
Βενζόλιο	1 µg/l
Βενζο-α-πυρένιο	0.01 µg/l
Βόριο	1 mg/l
Βρωμικά	10 µg/l
Κάδμιο	5 µg/l
Χρώμιο	50 µg/l
Χαλκός	2 mg/l
Κυανιούχα	50 µg/l
1,2-διχλωροαιθάνιο	3 µg/l
Επιχλωρυδρίνη	0.1 µg/l
Φθοριούχα	1.5 mg/l
Μόλυβδος	10 µg/l
Υδράργυρος	1 µg/l
Νικέλιο	20 µg/l

Νιτρικά	50 mg/l
Νιτρώδη	0.5 mg/l
Παρασιτοκτόνα	0.1 µg/l
Σύνολο παρασιτοκτόνων	0.5 µg/l
Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες	0.1 µg/l
Σελήνιο	10 µg/l
Τετραχλωροαιθέριο και Τριχλωροαιθέριο	10 µg/l
Ολικά τριαλογονομεθάνια	100 µg/l
Βινυλοχλωρίδιο	0.5 µg/l

#### 4.3 ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΙΔΡΥΣΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Οι εγκαταστάσεις και μονάδες αφαλάτωσης εντάσσονται στην κατηγορία των «Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων». Η ίδρυση και λειτουργία τους βασίζεται στον Νόμο 3325/2005 (ΦΕΚ Α 68/2005) - «Περί Ίδρυσης και Λειτουργίας των Βιομηχανικών - Βιοτεχνικών Εγκαταστάσεων στο πλαίσιο της αειφόρου ανάπτυξης και άλλες διατάξεις». Οι βιομηχανικές και βιοτεχνικές εγκαταστάσεις κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον, σε δύο κατηγορίες (Α και Β) και σε τρεις βαθμίδες όχλησης (υψηλή, μέση, χαμηλή). Η κατηγορία Α περιλαμβάνει έργα και δραστηριότητες που λόγω της φύσης τους, μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η κατηγορία Β περιλαμβάνει έργα και δραστηριότητες που δεν προκαλούν σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αλλά υποβάλλονται για την προστασία του περιβάλλοντος σε γενικές προδιαγραφές. Τα κριτήρια για την κατάταξη αυτή είναι τα εξής:

- Το είδος και το μέγεθος του έργου ή της δραστηριότητας.
- Το είδος και η ποσότητα των εκπεμπόμενων ρύπων, καθώς και κάθε άλλη επίδραση στο περιβάλλον.
- Η δυνατότητα πρόληψης από την εφαρμοζόμενη παραγωγική διαδικασία της παραγωγής ρύπων.
- Ο κίνδυνος σοβαρού ατυχήματος και η ανάγκη επιβολής περιορισμών για την προστασία του περιβάλλοντος.

Συνοψίζοντας λοιπόν, για την ανάπτυξη μιας εγκατάστασης και μονάδας αφαλάτωσης απαιτούνται τα εξής δικαιολογητικά:

- Βεβαίωση χρήσης γης
- Άδεια εγκατάστασης
- Άδεια λειτουργίας
- Έγκριση περιβαλλοντικών όρων
- Πιστοποιητικό πυροπροστασίας (εφόσον απαιτείται)
- Άδεια διάθεσης υγρών βιομηχανικών αποβλήτων (εφόσον απαιτείται)

- Άδεια δόμησης (εφόσον απαιτείται)
- Άδεια χρήσης νερού (εφόσον απαιτείται)

Λοιπές άδειες (αν συντρέχει περίπτωση)

- Ειδική άδεια εγκατάστασης
- Ανανέωση άδειας λειτουργίας
- Απαλλαγή από άδεια εγκατάστασης και άδεια λειτουργίας

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ανδρικόπουλος Νικόλαος, Τροφογνωσία, Το Νερό, Εκδόσεις Κάλλιπος, Αθήνα, 2015.
2. Καλογερόπουλος Νίκος, Νομοθεσία Νερού (διαφάνειες), 2007.
3. Κοινή Υπουργική Απόφαση Υ2/2600/2001 - ΦΕΚ Β 892/2001, Εθνικό Τυπογραφείο, Αθήνα, 2001.
4. Λιάλιος Γιώργος, Το Ισραήλ πρωτοπορεί στην αφαλάτωση, Η Καθημερινή, 19/3/2016.
5. Μαθιουδάκης Β., Τσάνης Ι., Νερό από αφαλάτωση για αντιμετώπιση προβλημάτων λειψυδρίας, Χανιώτικα Νέα, 7/12/2011.
6. Νόμος 3325/2005 - ΦΕΚ Α 68/2005, Εθνικό Τυπογραφείο, Αθήνα, 2005.
7. Σκληβανιώτης Μάρκος, Ποιότητα Πόσιμου Νερού, Νομοθεσία, Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης - Αποχέτευσης Πάτρας, Πάτρα, 2004.
8. A. Barak, B. Oukili, B. Tatah, B.J. Csik, B.M. Misra, G. Woite, J. Kupitz, J.R. Humphries, M.F. Barakat, Moon-Hee Chang, N.A. Masriera, P. Gowin, R.W. Schleicher, S.B. Abdel-Hamid, T. Konishi, Yuri D. Baranaev, Zongxin Wu, Introduction of Nuclear Desalination A Guidebook (Technical Reports Series No. 400), International Atomic Energy Agency, Vienna, 2000.
9. Amy Childress, Abhishek Roy, Manish Kumar, Tyler Culp, Yuexiao Shen, Christopher M. Stafford, Baoxia Mi, Kevin L. Alexander, Frontiers of Engineering, Water Desalination and Purification, The National Academies Press, Washington DC, 2017.
10. E. Funari, T. Kistemann, S. Herbst, A. Rechenburg, Technical guidance on water-related disease surveillance, World Health Organization (Regional office for Europe), Copenhagen, 2011.
11. Hanaa M. Salem, Eweida A. Eweida, Azza Farag, Heavy Metals in Drinking Water and their Environmental Impact on Human Health, Cairo University, Egypt, 2000.
12. Jane Kucera, Joachim Gebel, Mark Wilf, Christopher Bellona, Jeff McCutcheon, Nhu-Ngol Bui, Hong-Joo Lee, Seung-Hyeon Moon, Jonathan Wood, Joseph Gifford, Xing Yang, Anthony G. Fane, Rong Wang, Prakash Narayan Govindan, John H. Lienhard V, Mohammad Shafiur Rahman, Mohamed Al-Khusaibi, William E. Bornak, Pei Xu, Yogi Goswami, Elias K. Stefanakos, Mohammad Abutayeh, Chennan Li, Patrick V. Brady, Michael Hightower, Desalination Water from Water, Scrivener Publishing LLC Massachusetts, John Wiley & Sons Inc. New Jersey, 2014.
13. Mohamed A. Dawoud, Mohamed M. Al Mulla, Environmental Impacts of Seawater Desalination: Arabian Gulf Case Study, International Journal of Environment and Sustainability Volume 1, Science Target Inc., United Arab Emirates, 2012.

14. Musfique Ahmed, Rifat Anwar, An Assessment of the Environmental Impact of Brine Disposal in Marine Environment, International Journal of Modern Engineering Research Volume 2, 2012.
15. Peter H. Gleick, Dirty Water: Estimated Deaths from Water - Related Diseases 2000-2020, Pacific Institute, California, 2002.
16. Peter H. Gleick, Gary H. Wolff, Heather Cooley, Meena Palaniappan, Andrea Samulon, Emily Lee, Jason Morrison, David Katz, The World's Water 2006 - 2007, Island Press, Washington DC, 2006.
17. Peter H. Gleick, Lucy Allen, Juliet Christian - Smith, Michael J. Cohen, Heather Cooley, Matthew Heberger, Jason Morrison, Meena Palaniappan, Paul Schulte, The World's Water Volume 7, Island Press, Washington DC, 2012.
18. Peter H. Gleick, The World's Water 1998 - 1999, Island Press, Washington DC, 1998.
19. R. Stanwell Smith, Classification of Water - Related Disease (Volume I), Desalination and Water Resources, Eolss Publishers Co. Ltd., U.K., 2010.
20. Zeeshan Nawaz, Khaled Elsaid, Nasr Bensalah, Ahmed Abdel-Wahab, Advances in Chemical Engineering, Inland Desalination: Potentials and Challenges, InTech Europe, Croatia, InTech China, China, 2012.
21. Zotalis K., Dialynas E.G., Mamassis N., Angelakis A.N., Desalination Technologies: Hellenic Experience, Water Open Access Journal, 2014.

### **Ηλεκτρονικές πηγές**

<http://www.globalwaterfund.com/wp-content/uploads/2014/03/Water-Map.jpg>  
<https://el.wikipedia.org/wiki/Αφαλάτωση>  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Desalination>  
<https://el.wikipedia.org/wiki/Καθαλάτωση>  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Vapor-compression\\_evaporation](https://en.wikipedia.org/wiki/Vapor-compression_evaporation)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Vapor-compression\\_desalination](https://en.wikipedia.org/wiki/Vapor-compression_desalination)  
<http://salinityforum2014.ucr.edu>  
<https://el.wikipedia.org/wiki/Ωσμωση>  
<https://en.wikipedia.org/wiki/File:Graphen.jpg>  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum\\_distillation](https://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_distillation)  
<http://worldwater.org/water-data/>  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Ion\\_exchange](https://en.wikipedia.org/wiki/Ion_exchange)  
<http://elq.typepad.com/currents/2011/12/currents38-06-kelley-2011-1123.html>  
<http://bedrosian.usc.edu/blog/5-things-to-know-about-water-desalination/>