

**Α.Τ.Ε.Ι. ΠΑΤΡΩΝ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΕ ΘΕΜΑ:**

**ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΠΟΣΙΜΟ**

**Καθηγητής:**  
**Κος Καμπουρίδης**

**Σπουδαστές:**  
**Αστερήs Ν. Ηλίας**  
**Αστερήs Ιων. Ηλίας**

Πάτρα 2005



**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	6
1.1 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΝΕΡΟΥ ΣΤΙΣ ΑΝΥΔΡΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ .....	6
1.2 Η ΔΙΕΘΝΗΣ ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ .....	8
1.3 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΟΥ .....	11
1.4 ΒΑΣΙΚΗ ΟΡΟΛΟΓΙΑ .....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	15
ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΣΤΙΣ ΟΠΟΙΕΣ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΑΛΛΑΓΗ ΦΑΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ .....	15
2.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	15
2.2 ΑΠΟΣΤΑΞΗ (DISTILLATION) .....	18
2.2.1 ΑΠΛΗ ΑΠΟΣΤΑΞΗ (SIMPLE DISTILLATION) .....	18
2.2.2 ΕΞΑΤΜΙΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΔΡΑΣΕΩΝ (MULTIPLE- EFFECT EVAPORATION) .....	19
2.2.2 ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑ ΣΤΙΓΜΙΑΙΑ ΑΠΟΣΤΑΞΗ .....	24
2.2.4 ΑΠΟΣΤΑΞΗ ΜΕ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΑΤΜΟΥ .....	29
2.2.5 ΑΠΟΣΤΑΞΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	32
2.3 ΨΥΞΗ (FREEZING ή FREEZE SEPARATION) .....	36
2.4 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑ ΕΝΥΔΡΩΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ .....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	42
ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ .....	42
3.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	42
3.2 ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΠΙΔΥΣΗ .....	43
3.3 ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ .....	45
3.3.1 ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ .....	45
3.3.2 ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΥΠΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ .....	48
3.3.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΚΑΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ .....	51
3.4 ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ .....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	58
ΜΟΝΑΔΕΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ- (ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ) –ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ ..	58
4.1 Είδη μεμβρανών- υλικό κατασκευής .....	58
4.2 ΤΥΠΟΙ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ .....	59
4.2.1 ΤΥΠΟΣ ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΩΝ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑΤΩΝ .....	60
4.2.2 ΣΩΛΗΝΩΤΟΣ ΤΥΠΟΣ .....	62
4.2.3 ΤΥΠΟΣ ΚΟΙΛΩΝ ΙΝΩΝ Η ΤΡΙΧΟΕΙΔΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ .....	64
4.2.4 ΕΠΙΠΕΔΟΣ ΤΥΠΟΣ .....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....	68
ΡΟΗ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΜΙΑΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΚΑΙ ΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ Σ' ΑΥΤΗ .....	68

5.1 ΡΟΗ ΤΟΥ ΚΑΘΑΡΟΥ ΝΕΡΟΥ (ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ).....	68
5.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΤΗ ΡΟΗ .....	69
5.3 ΡΥΠΑΝΣΗ ΑΙΤΙΑ ΚΑΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ .....	71
5.4 Η ΡΟΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΤΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ.....	79
5.5 ΑΠΟΡΡΙΨΗ ΤΩΝ ΑΛΑΤΩΝ.....	82
5.6 ΔΙΑΡΡΟΕΣ ΤΩΝ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ .....	83
5.7 ΠΟΛΩΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ.....	86
5.7.1 ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ .....	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 .....	92
ΤΕΧΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ ΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΠΙΔΥΣΗ .....	92
6.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	92
6.2 Αντίστροφη Ωσμωση.....	93
6.3 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΠΙΔΥΣΗ .....	104
6.4 ΠΡΟΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ .....	108
6.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΕΚΛΟΓΗ ΜΙΑΣ ΜΕΘΟΔΟΥ .....	112
6.6 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ .....	120
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 .....	125
Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΣΑΝ ΜΙΑ ΣΥΜΦΕΡΟΥΣΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΠΗΓΗ ΝΕΡΟΥ .....	125
7.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	125
7.2 ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ .....	127
7.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΜΙΚΡΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ.....	129
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	131

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Το ότι το νερό είναι ένα από τα πολυτιμότερα αγαθά, για να μην πούμε το πολυτιμότερο αγαθό για τη ζωή του ανθρώπου, των ζώων και των φυτών, το αισθανόμαστε κάθε φορά που επισείεται η έλλειψή του.

Σήμερα, η κατανάλωση του νερού αυξάνει συνέχεια, γιατί η συνεχιζόμενη αύξηση του πληθυσμού, οι διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες της βιομηχανίας και η εφαρμογή νεοτέρων καλλιεργητικών μεθόδων στο γεωργικό τομέα ζητούν όλο και μεγαλύτερες ποσότητες νερού, ενώ οι πηγές λήψης του παραμένουν ίδιες και υφίστανται ήδη εντατική εκμετάλλευση που τείνει σταθερά να τις εξαντλήσει.

Για τη λύση του προβλήματος αυτού, οι επιστήμονες έχουν στραφεί στην αφαλάτωση του θαλασσινού νερού.

Η πρώτη μέθοδος αφαλάτωσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν η απόσταξη, λόγω όμως του μεγάλου ενεργειακού κόστους άρχισαν να εφαρμόζονται απόσταξη με ανασυμπίεση ατμών, απόσταξη με ηλιακές στήλες κλπ. έτσι ώστε να μειωθεί το κόστος ενέργειας.

Σήμερα όμως τα βλέμματα όλων έχουν στραφεί στην αφαλάτωση με την χρήση μεμβρανών λόγω των μικρότερων ενεργειακών απαιτήσεων.

Βέβαια όχι ότι έχουν λυθεί όλα τα προβλήματα τα οποία αντιμετωπίζουν τέτοιες εγκαταστάσεις, αλλά συνεχώς βελτιώνονται με όσο το δυνατό μικρότερο κόστος εγκατάστασης.

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

- Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 επισημαίνουμε την έλλειψη του νερού και τις επιπτώσεις που παρουσιάζονται λόγω της εξάντλησης των φυσικών αποθεμάτων. Επίσης δίνονται μέσα από διαγράμματα οι εφαρμογές των μεθόδων αφαλάτωσης ανά τον κόσμο, και οι προδιαγραφές καταλληλότητας του νερού για να είναι πόσιμο.

- Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 παρουσιάζουμε τις μεθόδους αφαλάτωσης και γίνεται μια ανάλυση όλων των θερμικών μεθόδων, δηλαδή των μεθόδων που πραγματοποιούν αλλαγή φάσης του νερού, για να πάρουμε το καθαρό προϊόν (πόσιμο νερό).

- Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 παρουσιάζουμε τις μεθόδους που χρησιμοποιούν τις επιφανειακές ιδιότητες των μεμβρανών.

- Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 παρουσιάζουμε και αναλύουμε τις μονάδες διαχωρισμού- (μεμβράνες)- της αντίστροφης ώσμωσης υλικά, τύπους- διατάξεις.

- Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 παρουσιάζεται η ροή του νερού διαμέσου των μεμβρανών καθώς και οι παράγοντες που επιδρούν σε αυτή. Επίσης αναφερόμαστε στα αίτια ρύπανσης των μεμβρανών και αντιμετώπισής τους.

Επίσης, γίνεται αναφορά στην απόρριψη αλάτων και στην πόλωση συγκέντρωσης και στα αποτελέσματά της.

-Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 γίνεται μια τεχνικοοικονομική ανάλυση και σύγκριση των μεθόδων αντίστροφης ώσμωσης και ηλεκτροδιαπίδυσης.

- Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 παρουσιάζουμε τις μονάδες αφαλάτωσης στην Ελλάδα, το κόστος επένδυσης, την δυναμικότητά τους. Δίνεται επίσης η κατανάλωση ενέργειας ανά μέθοδο αφαλάτωσης.

Τέλος, γίνεται ανάλυση κόστους μικρής μονάδας αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με αντίστροφη ώσμωση.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

### **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

#### **1.1 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΝΕΡΟΥ ΣΤΙΣ ΑΝΥΔΡΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ**

Σύμφωνα με μια πρόσφατη έκθεση της Διεθνούς Τράπεζας το ένα τρίτο του πληθυσμού της γης δεν έχει πρόσβαση σε καθαρό πόσιμο νερό. Ίσως όσοι δεν έχουν ποτέ αισθανθεί έλλειψη αυτού του τόσο βασικού αγαθού να μην μπορούν εύκολα να εκτιμήσουν τις επιπτώσεις της έλλειψης αυτής στην υγεία, στην ποιότητα ζωής, αλλά και στην οικονομική ανάπτυξη των κατοίκων των άνυδρων περιοχών.

Παρόμοια όμως προβλήματα εμφανίζονται σε ολόένα και περισσότερες περιοχές, λόγω της εξαντλησιμότητας των εκμεταλλεύσιμων φυσικών αποθεμάτων, της ρύπανσης των επιφανειακών νερών και της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης από την αύξηση του πληθυσμού και από την επέκταση δραστηριοτήτων όπως η μεταποίηση και ο τουρισμός. Είναι αναγκαία συνεπώς σήμερα μια πολιτική διαχείρισης του νερού που θα βασίζεται στα παραπάνω στοιχεία και θα έχει στόχο να εξασφαλίζει, μετά από την κατάλληλη επεξεργασία, την απαιτούμενη ποσότητα και ποιότητα φρέσκου ή ανακυκλωμένου νερού για τις διάφορες ανάγκες μας (πόσιμο, νερό άρδευση, νερό για την βιομηχανία κλπ.).

Το πρόβλημα της έλλειψης του νερού αφορά πολλές περιοχές και στην Ελλάδα που χαρακτηρίζονται ως άνυδρες. Τέτοιες περιοχές είναι κυρίως τα νησιά αλλά και πολλές απομακρυσμένες κοινότητες και οικισμοί.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1**

**Ανάγκες σε νερό και υδάτινο δυναμικό ελληνικών νησιών.**

ΝΗΣΙΑ	Ανάγκες σε νερό 1981, m <sup>3</sup> /ημέρα		Ανάγκες σε νερό 2020 m <sup>3</sup> /ημέρα		Υπάρχον υδάτινο δυναμικό m <sup>3</sup> /ημέρα
	Μόνιμες	Αιχμής	Μόνιμες	Αιχμής	
Αίγινα	1.990	4.070	4.750	7.800	2.700
Ύδρα	350	830	450	1.200	-
Σπέτσες	390	1.050	720	2.100	-
Νίσυρος	100	150	170	290	-
Λέρος	1.250	1.560	1.400	2.100	700
Πάτμος	270	780	460	2.000	1.150
Σίκινος	35	55	60	130	30
Φολέγανδρος	70	80	110	160	10
Σίφνος	240	390	370	840	720
Κίμωλος	110	130	190	260	-
Ίος	150	440	230	1.100	340
Λήμνος	2.750	2.950	3.900	6.500	3.200
Αλόνησος	160	420	260	970	200
Σκόπελος	400	1.000	750	2.100	1.600
Σύμη	270	360	390	700	-

Ενδεικτικά για ορισμένα νησιά δίνονται στον πίνακα οι ανάγκες σε νερό για το 1981 και η πρόβλεψη για το 2020 και το υπάρχον υδάτινο δυναμικό από τα στοιχεία της ΕΥΔΑΠ.

Η αφαλάτωση του θαλασσινού και του υφαλμυρού νερού παρουσιάζεται σήμερα, τόσο από άποψη ποιότητας, όσο και με τεχνο-οικονομικά κριτήρια, ως η πιο κατάλληλη λύση για τις περιοχές εκείνες

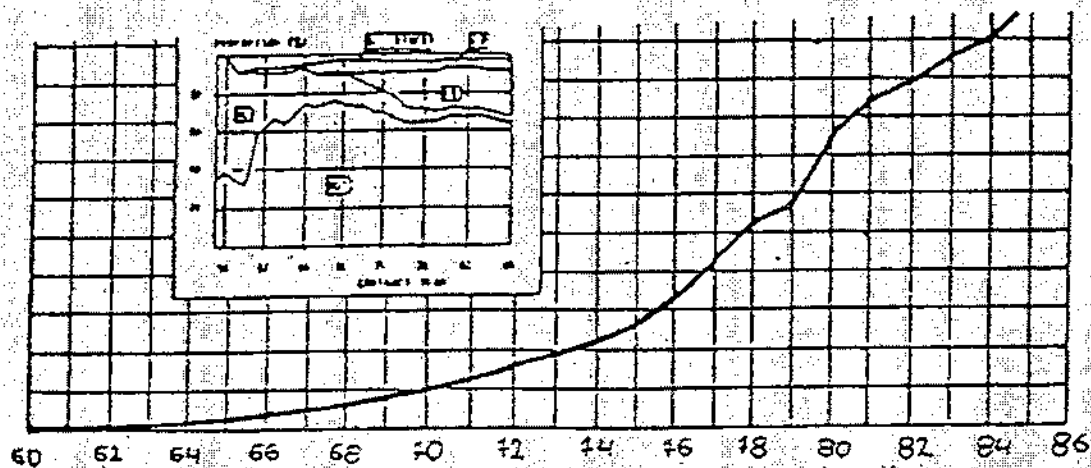


όπου δεν μπορούν να εφαρμοστούν οι κλασικές μέθοδοι υδροδότησης όπως είναι:

Η μεταφορά με αγωγούς, οι γεωτρήσεις, τα φράγματα κ.α.

## 1.2 Η ΔΙΕΘΝΗΣ ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Οι εφαρμογές της αφαλάτωσης θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού για την παραγωγή κυρίως πόσιμου νερού επεκτάθηκε ραγδαία τα τελευταία χρόνια (Σχήμα 1), σαν αποτέλεσμα και της έντονης ερευνητικής προσπάθειας για την ανάπτυξη και βελτίωση των διαφόρων μεθόδων. Έτσι η παγκόσμια παραγωγή αφαλατωμένου νερού από μεγάλες μονάδες (πάνω από 100 m<sup>3</sup>/day) ήταν 11,5 εκατομμύρια m<sup>3</sup>/d στο τέλος το 1986 και προέρχεται από 5.704 μονάδες παραγωγής.



Σχήμα 1: Παγκόσμια παραγωγή πόσιμου νερού με αφαλάτωση

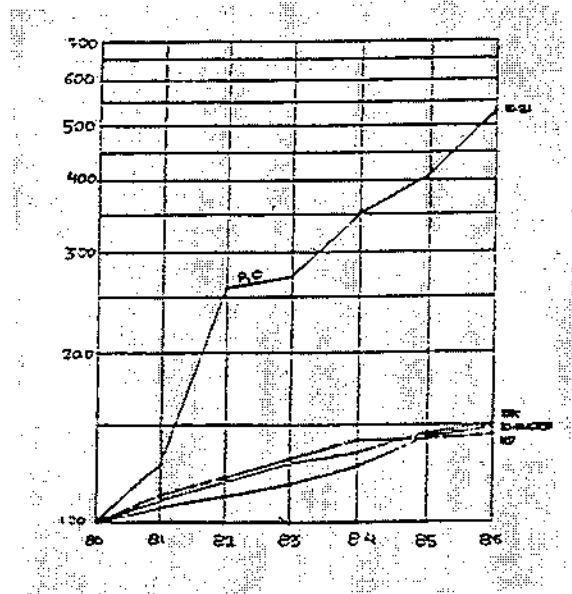
Η κατανομή των μονάδων αυτών με βάση τις χρησιμοποιούμενες μεθόδους παραγωγής εμφανίζεται στο σχήμα 2.



Σχήμα 2: Κατανομή των μονάδων αφαλάτωσης νερού.

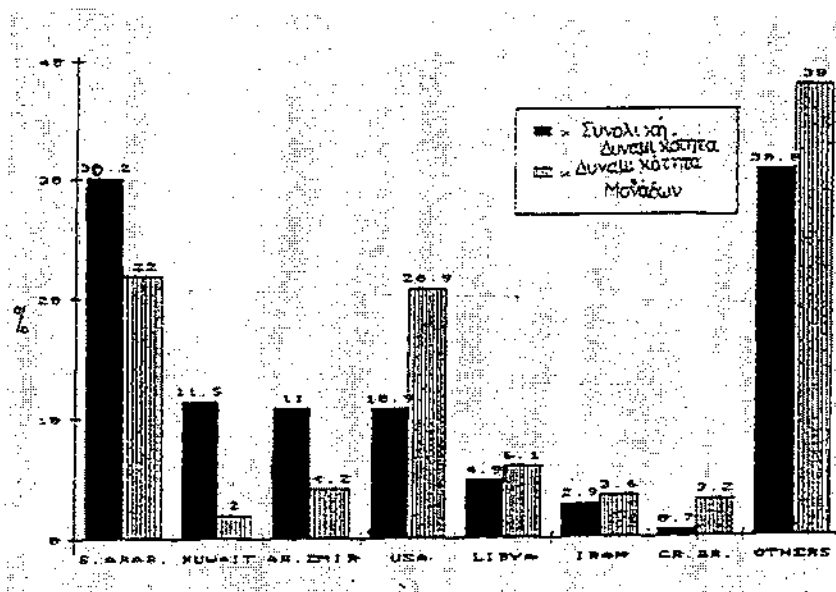
Η μέθοδος της πολυβάθμιας στιγμιαίας εξάτμισης (MSF), παρά το ότι εφαρμόζεται στο 18,1% των μονάδων, καλύπτει το 64,5% της συνολικής δυναμικότητας, επειδή περιλαμβάνει μεγάλες κυρίως μονάδες, όπου και εμφανίζει οικονομικά πλεονεκτήματα. Αντίθετα η αντίστροφη όσμωση (R.O) που πλεονεκτεί στις μονάδες χαμηλότερης δυναμικότητας (πρόσφατα όμως κατασκευάστηκαν και μεγάλες μονάδες R.O 50.000 m<sup>3</sup>/day) καταλαμβάνει τη δεύτερη θέση με το 47,4% των μονάδων και το 23,4% της δυναμικότητας.

Η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης (R.O) εμφανίζει ραγδαία αύξηση των ποσοστών της μετά το 1980 (σχήμα 3) λόγω των νεότερων τεχνολογικών εξελίξεων και βελτιώσεων της μεθόδου με την καθιέρωση νέων τύπων μεμβρανών και τη μείωση του κόστους λειτουργίας.



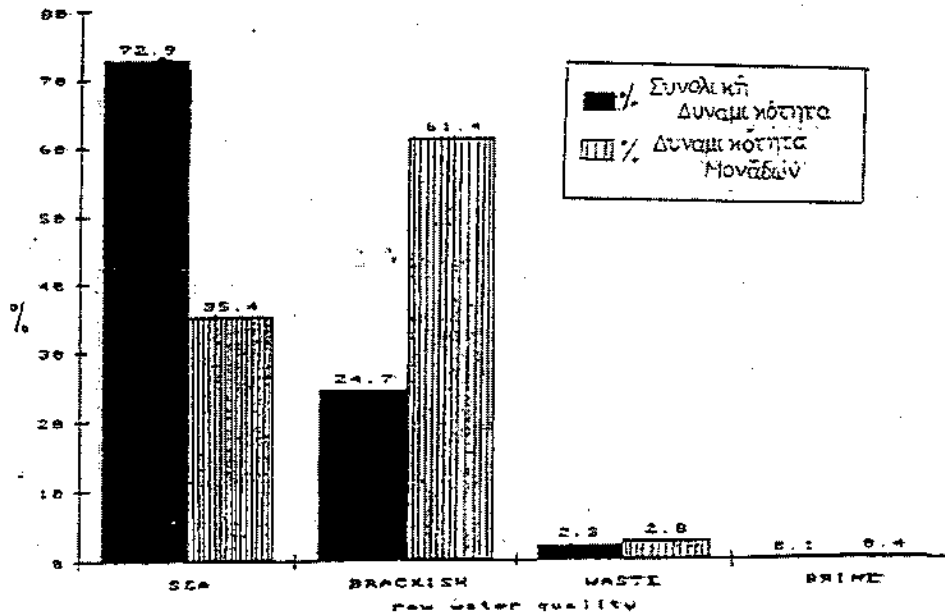
Σχήμα 3: Φαίνεται η αύξηση της Αντίστροφης Ώσμωσης μετά το 1980.

Στο σχήμα 4 εικονίζεται η γεωγραφική κατανομή μονάδων που εμφανίζει μια συγκέντρωση στο χώρο της μέσης Ανατολής και της Αφρικής, αλλά ένα σημαντικό μέρος των μονάδων είναι εγκατεστημένες σε πάρα πολλές χώρες.



Σχήμα 4: Φαίνεται η γεωγραφική κατανομή των μονάδων αφαλάτωσης.

Η κατανομή των μονάδων με βάση την πρώτη ύλη εικονίζεται στο σχήμα 5 όπου είναι εμφανής η υπεροχή του θαλασσινού νερού.



Σχήμα 5

### 1.3 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΟΥ

Η βασική ανάγκη για την αφαλάτωση του νερού παρουσιάζεται εξαιτίας του ουσιαστικού ρόλου που αυτό διαδραματίζει σε όλη την οργανική ζωή, μέσα από τις διαδικασίες του μεταβολισμού. Αποτέλεσμα αυτών των διαδικασιών είναι ο υποβιβασμός της ποιότητας του νερού, πράγμα που συνεπάγεται την ανάγκη ανανέωσής του, που γίνεται με την διέλευση του, μέσα από μεμβράνες οι οποίες αποκλείουν τα διαλυμένα υλικά.

Παρ'όλα αυτά, λόγω της μεγάλης διαλυτικής ικανότητας του νερού υπάρχει η τάση σε ορισμένες περιπτώσεις να διαλύει τόσο μεγάλες

ποσότητες χημικών συστατικών, ώστε να καθίσταται ακατάλληλο για την οργανική ζωή. Η συγκέντρωση αυτών διαλυμένων συστατικών (στερεών-κυρίως) προσδιορίζει την ποιότητα, την «καταλληλότητά» του.

Η ποιότητα του νερού, που είναι αποδεκτή για την μέση ανθρώπινη κατανάλωση έχει καθοριστεί συγκεκριμένα από φορείς (π.χ υπηρεσίες που το αντικείμενό τους είναι η δημόσια υγεία) όπως η UNITED STATES PUBLIC HEALTH SERVICE "USPHS" τις οποίες οι προδιαγραφές φαίνονται στον Πίνακα 2.

**Σημείωση:** Οι μερικές συγκεντρώσεις αθροιζόμενες δεν δίνουν τη συγκέντρωση TDS κάθε στήλης. Αυτό προφανώς γίνεται γιατί κάθε τιμή αντιπροσωπεύει τη βέλτιστη ή μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση κάθε ιόντος χωριστά.

Ας σημειωθεί ότι υπάρχουν επιπρόσθετες απαιτήσεις για το πόσιμο νερό. Αυτές καθορίζουν το όριο στη συγκέντρωση μικροβίων και άλλων ειδών που μπορεί να επιδράσουν άμεσα στην υγεία του καταναλωτή, δεν επηρεάζουν όμως την χημική ποιότητα του νερού η οποία μας ενδιαφέρει εδώ.

## ΠΙΝΑΚΑΣ 2

### Πρότυπες συγκεντρώσεις ιόντων στο πόσιμο νερό κατά USPHS.

Χημικά συστατικά	Μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση (ppM)
Μόλυβδος	0,1
Χαλκός	3,0
Ψευδάργυρος	15,0

Σίδηρος- μαγγάνιο	0,3
Θετικά	250,0
Χλωριούχα	-
Μαγνήσιο	125,0
Φθοριούχα	1,5
Ολικά διαλελυμένα στερεά (TDS)	1500,0

#### **1.4 ΒΑΣΙΚΗ ΟΡΟΛΟΓΙΑ**

##### **ΜΕΡΗ ΣΤΟ ΕΚΑΤΟΜΜΥΡΙΟ (PPM):**

Εκφράζει περιεκτικότητα διαλυμένης ουσίας. Για παράδειγμα περιεκτικότητα σε διαλυμένα άλατα 1000 ppm σημαίνει ότι σε 1.000.000 gr. διαλύματος (νερό+ άλατα) περιέχονται διαλυμένα 1,000 gr άλατα ή διαφορετικά 0,1% κατά βάρος (κ.β).

##### **ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ (SEA WATER):**

Περιέχει ολικά διαλυμένα στερεά (TDS) με μέση συγκέντρωση 35.000 ppm.

##### **ΥΦΑΛΜΥΡΟ ΝΕΡΟ (BRACKISH WATER):**

Περιέχει ολικά διαλελυμένα στερεά (TOTAL DISSOLVED SOLIDS. TDS) σε συγκεντρώσεις από 1000ppm έως 6000 ppm.

##### **ΑΛΜΥΡΟ ΝΕΡΟ (SALINE WATER):**

Νερό που περιέχει διαλελυμένα στερεά που υπερβαίνουν τα όρια του πόσιμου (π.χ θαλασσινό νερό, υφαλμυρό νερό, ορυκτό νερό κλπ).

##### **ΠΟΣΙΜΟ ΝΕΡΟ (POTABLE WATER):**

### Αφαλάτωση Θαλασσινού Νερού σε Πόσιμο

---

Νερό κατάλληλο για πόση που περιέχει TDS σε ποσοστό μικρότερο ή ίσο με 500 ppm με απουσία πιθανών μολυσματικών ουσιών.

#### **ΑΙΜΗ (BRINE):**

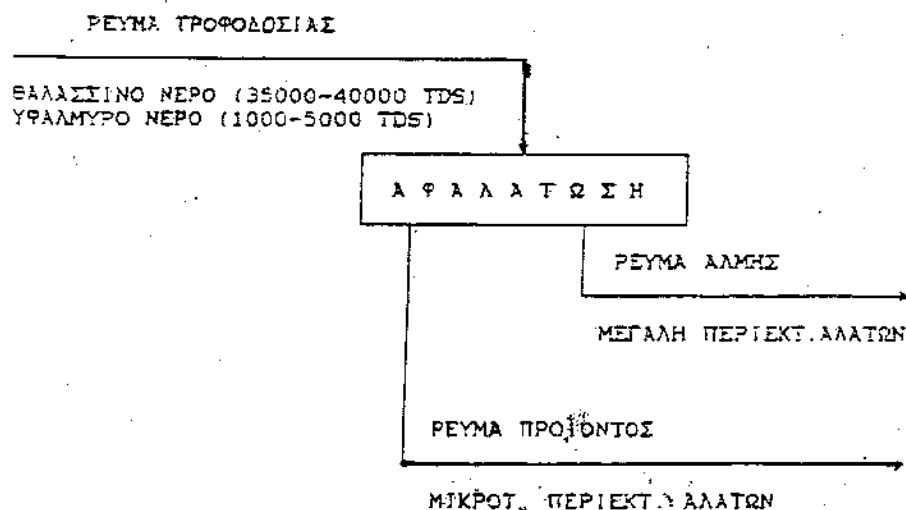
Το τρίτο ρεύμα (παραπροϊόν), της διεργασίας αφαλάτωσης εκτός του νερού τροφοδοσίας και του προϊόντος νερού (FRESHWATER), προφανώς η περιεκτικότητά του σε TDS είναι μεγαλύτερης του νερού τροφοδοσίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΣΤΙΣ ΟΠΟΙΕΣ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΑΛΛΑΓΗ ΦΑΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

#### 2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η αφαλάτωση είναι μια διεργασία απομάκρυνσης των αλάτων από το νερό σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα 6.



Σχήμα 6

Μέρος του τροφοδοτούμενου θαλασσινού νερού ή υφαλμυρού νερού ανακτάται ως προϊόν σε καθαρή σχετικά μορφή (οι σχετικές απαιτήσεις είναι για μεν το πόσιμο νερό  $TDS < 500 \text{ppm}$ , για το νερό άρδρευσης  $TDS < 1000 \text{ppm}$  και για ορισμένες βιομηχανικές χρήσεις ακόμη και κάτω από  $1 \text{ppm}$ ) και μέρος απορρίπτεται με αυξημένη περιεκτικότητα αλάτων (άλμη).



Οι κυριότεροι μέθοδοι αφαλάτωσης που εφαρμόζονται σήμερα σε βιομηχανική κλίμακα για την παραγωγή πόσιμου νερού μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες.

### **A) ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ**

#### 1) Απόσταξη:

- i. Απλή απόσταξη
- ii. Απόσταξη πολλαπλών δράσεων (ME)
- iii. Απόσταξη με ανασυμπίεση ατμών (VC)
- iv. Πολυβάθμια στιγμιαία απόσταξη (MSF)
- v. Απόσταξη με χρήση ηλιακής ενέργειας.

#### 2) Διαχωρισμός με ψύξη

#### 3) Διαχωρισμός δια ένυδρων κρυστάλλων.

### **B) ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ**

#### 1) Αντίστροφη όσμωση (RO)

#### 2) Ηλεκτροδιάλυση (ED)

Οι μέθοδοι που όπως αναφέραμε χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι: η MSF και η R.O.

Όλες οι θερμικές μέθοδοι βασίζονται στη μερική εξάτμιση του νερού τροφοδοσίας και στη συμπύκνωση των παραγόμενων ατμών, ενώ το μεγαλύτερο μέρος των αλάτων παραμένουν στην απορριπτόμενη άλμη. Το βασικότερο στοιχείο κόστους των μεθόδων αυτών αφορά την απαιτούμενη ενέργεια που αποτελεί το 50+ 60% του κόστους λειτουργίας.

Για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης έχουν εισαχθεί οι τεχνικές των πολλών βαθμίδων, η ανακύκλωση της άλμης και άλλες βελτιώσεις.

Η αντίστροφη όσμωση είναι μια σχετικά καινούργια μέθοδος αφαλάτωσης, που άρχισε να χρησιμοποιείται μετά το 1973, για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού. Χρησιμοποιούνται μεμβράνες διαφόρων τύπων (σωληνωτές, σπιδάλ, ινώδεις) με κατασκευαστικό υλικό οξική κυτταρίνη, αρωματικά πολυαμίδια ή πολυσουλφόνες. Η διεργασία γίνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και πίεση 800-1,200 PSI. Το υψηλής πίεσης ρεύμα της άλμης κινεί, πριν την απόρριψή του, υδροτουρμπίνα συνδεδεμένη με την αντλία υψηλής πίεσης, ώστε να ανακτά ενέργεια και να μειώνεται το λειτουργικό κόστος.

Η ηλεκτροδιάλυση χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για την αφαλάτωση υφαλμυρών νερών. Οι μεμβράνες εδώ, είναι δύο διαφορετικών τύπων, από τις οποίες διέρχονται και απομακρύνονται αντίστοιχα τα αρνητικά και θετικά ιόντα, με την εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος υψηλής τάσεως.

Σε πειραματικό στάδιο η υπό περιορισμένη εφαρμογή βρίσκονται διάφορες άλλες μέθοδοι αφαλάτωσης, από τις οποίες η πιο γνωστή είναι η ψύξη.

Ας σημειωθεί ότι άλλη κατάταξη μπορεί να γίνει με βάσει τις διάφορες μορφές ενέργειας που χρησιμοποιείται δηλαδή, θερμότητα, μηχανική, ηλεκτρική, ή χημική ενέργεια.

Η χρησιμότητα μιας τέτοιας κατάταξης φαίνεται από την σύγκριση του ενεργειακού κόστους κάθε διαδικασίας, καθώς για παράδειγμα, η θερμική ενέργεια είναι η φθηνότερη ενώ η χημική η ακριβότερη. Η

απόσταξη μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση είτε θερμικής είτε μηχανικής ενέργειας. Η αντίστροφη όσμωση απαιτεί μηχανική ενέργεια, η ηλεκτροδιάλυση ηλεκτρική, η ιονοεναλλαγή χημική.

## **2.2 ΑΠΟΣΤΑΞΗ (DISTILLATION)**

Η απόσταξη σαν διαδικασία αφαλάτωσης είναι αποτελεσματική επειδή τα περισσότερα από τα χημικά συστατικά που περιέχονται στα αλμυρά νερά είναι μη πτητικά στις εφαρμοζόμενες θερμοκρασίες και κατά συνέπεια παραμένουν στην άλμη.

### **2.2.1 ΑΠΛΗ ΑΠΟΣΤΑΞΗ (SIMPLE DISTILLATION)**

Η διαδικασία περιλαμβάνει τρία διακεκριμένα στάδια:

- α) Σχηματισμός ατμού λόγω της πρόσδωσης θερμότητας, σε μια μάζα αλμυρού νερού.
- β) Απομάκρυνση του ατμού από το υγρό, από το οποίο προήλθε.
- γ) Συμπύκνωση του ατμού λόγω της απομάκρυνσης της θερμότητας, συνήθως με επαφή του με ψυχόμενη επιφάνεια.

Το βασικό κόστος της απόσταξης, που είναι μια από τις αρχαιότερες μεθόδους αφαλάτωσης, εντοπίζεται στην ενέργεια που απαιτείται για την εξάτμιση του νερού.

Τρόποι την ελάττωση αυτού του κόστους, έχουν οδηγήσει σε πολυβάθμια λειτουργία και πολλαπλές προσπάθειες για ανάκτηση θερμότητας.

Ένα από τα βασικά προβλήματα της απόσταξης είναι η δημιουργία – αποθέσεων στην επιφάνεια των εναλλακτών θερμότητας. Το θαλασσινό

νερό, περιέχει σημαντικές ποσότητες αλάτων ασβεστίου και μαγνησίου, που εναποτίθενται στα τοιχώματα των δοχείων και των σωληνώσεων.

Το νερό τροφοδοσίας πρέπει να υποστεί μια προκατεργασία με οξέα ή άλλα μέσα αποβλέποντας στην ελάττωση των αποθέσεων.

Όπως προαναφέρθηκε η προσπάθεια για μείωση του κόστους έχει οδηγήσει στις παρακάτω παραλλαγές.

### **2.2.2 ΕΞΑΤΜΙΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΔΡΑΣΕΩΝ (MULTIPLE- EFFECT EVAPORATION).**

Έχει βρεθεί ότι είναι δυνατό να πολλαπλασιαστεί το ποσό του ατμού που παράγεται από ένα δεδομένο ποσό αρχικού ατμού θέρμανσης, με τοποθέτηση μερικών εξατμιστήρων στη σειρά. Η δράση που πραγματοποιείται είναι η εξάτμιση λεπτής στιβάδας, σε οριζόντιους ή κατακόρυφους σωλήνες. Στους οριζόντιους σωλήνες (HORIZONTAL TUBE EVAPORATORS, H.T.E) με κατάλληλες διατάξεις διανομής του υγρού στο εσωτερικό της, δημιουργείται μια λεπτή στιβάδα που ρέει προς το κατώτερο σημείο αυτών.

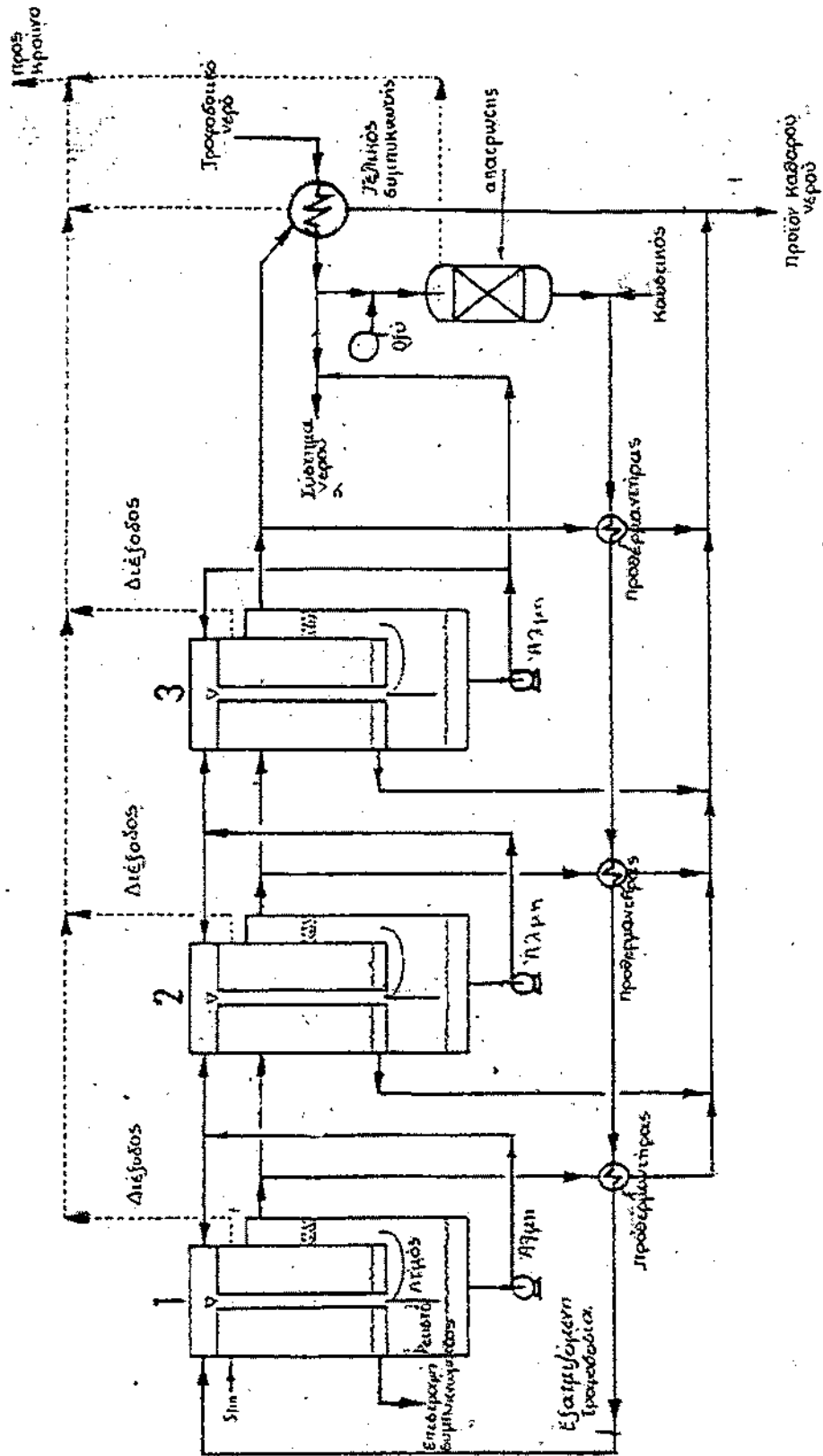
Ένα διάγραμμα ροής μιας παρόμοιας εγκατάστασης τριών (3) εξατμιστήρων VT φαίνεται στο σχήμα 7.

Ο πρώτος εξατμιστήρας παραλαμβάνει την απαιτούμενη θερμότητα από ένα ξεχωριστό απόθεμα ατμού. Ο ατμός που παράγεται σ' αυτόν συμπυκνώνεται στον εναλλακτή του δεύτερου εξατμιστήρα. Όμοια ο ατμός του δεύτερου συμπυκνώνεται στον εναλλάκτη του τρίτου κ.ο.κ. Έτσι η εξοικονόμηση ατμού είναι πολύ σημαντική.

Για να εξασφαλιστεί αυτή η ροή θερμότητας από το ρεύμα ατμού στο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό των σωλήνων, είναι προφανές ότι η

θερμοκρασία του νερού πρέπει να είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία του ατμού θέρμανσης. Ο παραγόμενος ατμός έχει την ίδια θερμοκρασία με το νερό, έτσι ο ατμός αυτός στην δεύτερη βαθμίδα θα έχει θερμοκρασία και πίεση μικρότερες από το δημιουργημένο ατμό στην πρώτη, διότι η τάση ατμών είναι αύξουσα συνάρτηση της θερμοκρασίας.

Αφαλάτωση Θαλασσινού Νερού σε Πόσιμο



*Σχήμα 7: Διάγραμμα ροής εγκατάστασης τριών εξατμιστήρων VT.*

Το ποσό του νερού που εξατμίζεται από τη μονάδα του ατμού, είναι ανάλογο του αριθμού των δράσεων (βαθμίδων εξάτμισης) π.χ. μιλώντας για την ίδια παροχή καθαρού νερού, ένας τέτοιος εξατμιστήρας τεσσάρων (4) δράσεων χρειάζεται το ένα τέταρτο του ατμού από ένα εξατμιστήρα απλής δράσεως. Γενικά για μονάδες αφαλάτωσης σπάνια χρησιμοποιούνται εξατμιστήρες μιας δράσεως και αυτό συμβαίνει κυρίως όταν πρόκειται για μικρές μονάδες με ενδιαφέρον στο μικρό κόστος εγκατάστασης.

- Όταν η επιφάνεια των εναλλακτών καλυφθεί από αποθέσεις, η δυναμικότητα του συστήματος πέφτει.

Για να διατηρηθεί η υψηλή θερμική απόδοση του συστήματος, που είναι και το βασικό του πλεονέκτημα, πρέπει να ρυθμιστούν προσεκτικά οι λειτουργικές παράμετροι και να διατηρηθούν στην περιοχή ρύθμισης.

-Μια από αυτές τις παραμέτρους είναι και η πτωτικώς μεταβαλλόμενη πίεση κατά «μήκος» του όλου συστήματος. Για να εκπληρωθεί αυτή η προϋπόθεση χρησιμοποιούνται αντλίες κενού οι οποίες έχουν τη διπλή αποστολή να απομακρύνουν αέρα από το σύστημα και να «παράγουν» μια πτώση πίεσης κατά «μήκος» του συστήματος ώστε να διακινείται η άλμη και ο ατμός ανάμεσα στις βαθμίδες. Ο συνολικός αριθμός των αντλιών είναι σημαντικά μεγαλύτερος από των μονάδων πολυβάθμιας στιγμιαίας απόσταξης, που θα περιγραφεί παρακάτω, αλλά είναι μικρές και λειτουργούν σε μικρά μανομετρικά ύψη. Έτσι η ενέργεια που καταναλώνουν μπορεί να είναι χαμηλότερη από εκείνη των αντλιών της δεύτερης μεθόδου, που είναι μεν λιγότερες αλλά διακινούν μεγάλα ποσά άλμης για ανακυκλοφορία.

Ένας από τους δείκτες που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της οικονομίας ατμού αυτών των εγκαταστάσεων είναι “GAINED OUTPUT RATIO” GOR (σε ελεύθερη μετάφραση «συντελεστής αποκτημένης απόδοσης»), που ορίζεται σαν ο λόγος του προϊόντος αποστάγματος κατά μάζα προς το ποσό του ατμού θερμάνσεως που χρησιμοποιείται στον υψηλής πίεσης (πρώτο) εξατμιστήρα.

Ας σημειωθεί ότι γενικά για εγκαταστάσεις μιας δράσεως η οικονομία ατμού E ορίζεται από τη σχέση:

$$E = \frac{KG.εξατμιζόμενου...νερού}{KG.καταναλισκόμενου...ατμού}$$

Ακόμα, η οικονομία ατμού μπορεί να εκφραστεί μέσω του συντελεστή λειτουργίας (“PERFOMANCHE RATIO” PR”) που ορίζεται σαν ο αριθμός lb του παραγόμενου αποστάγματος ανά 1000 BTU παρεχόμενης θερμότητας.

Υψηλοί συντελεστές λειτουργίας απαιτούν μεγάλο αριθμό σταδίων, με μεγάλες επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας και συνεπώς ψηλό πάγιο κόστος. Παράλληλα όμως, επιτυγχάνεται κέρδος από το σχετικά χαμηλότερο λειτουργικό κόστος. Αντίθετα, κάθε επέμβαση που αποβλέπει στην αύξηση του θερμοκρασιακού δυναμικού (διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ατμού και νερού), συντελεί στη μείωση των επιφανειών εναλλαγής θερμότητας και κατά συνέπεια του πάγιου κόστους σε βάρος όμως του λειτουργικού κόστους. Οι μέγιστες επιτρεπτές θερμοκρασίες της άλμης εξαρτώνται από την τάση που έχει το νερό, για δημιουργία αποθέσεων και είναι περίπου 132°C (270° F) όταν έχει προηγηθεί κατεργασία με οξέα. Επίσης, και ο συντελεστής συγκέντρωσης (που ισούται με το λόγο της συγκέντρωσης της άλμης



προς τη συγκέντρωση του νερού τροφοδοσίας) περιορίζεται από τις προαναφερθείσες ιδιότητες απόθεσης του νερού. Το κόστος του ατμού καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος του λειτουργικού κόστους (ένα μέρος καλύπτεται και από το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για την κίνηση των αντλιών). Κατά συνέπεια, στις περιπτώσεις εκείνες που η λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης μπορεί να συνδυαστεί με τη λειτουργία κάποιας άλλης παραπλήσιας μονάδας που χρησιμοποιεί ατμό (π.χ. για ατμοστρόβιλους) τότε το κόστος είναι δυνατό να μειωθεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

### **2.2.2 ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑ ΣΤΙΓΜΙΑΙΑ ΑΠΟΣΤΑΞΗ**

#### **(MULTISTAGE FLASH DISTILLATION)**

Μια άλλη μέθοδος που επιδρά θερμικά στην οικονομία της αφαλάτωσης με απόσταξη είναι η λειτουργία εγκαταστάσεων στιγμιαίας απόσταξης. Είναι μια μέθοδος ευρύτατα διαδεδομένη και εφαρμόζεται σε διάφορες μονάδες για σειρά ετών.

- «Στιγμιαία» εξάτμιση είναι η δημιουργία ατμού με ξαφνική μείωση της πίεσης πάνω από ένα ζεστό υγρό, το οποίο βρίσκεται αρχικά κοντά στη θερμοκρασία βρασμού του. η μείωση της πίεσης έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας βρασμού του ατμού.

- Οι μονάδες στιγμιαίας απόσταξης αυτού του τύπου, είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε το νερό τροφοδοσίας να θερμαίνεται κάτω από συνθήκες πίεσης οι οποίες δεν επιτρέπουν τη δημιουργία ατμού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας θέρμανσης. Αφού η μέγιστη επιθυμητή θερμοκρασία έχει επιτευχθεί, το νερό τροφοδοσίας (συνήθως θαλασσινό) διοχετεύεται για να εκτονωθεί αδιαβατικά σε μια σειρά βαθμίδων (θαλάμων) κάθε μια από τις οποίες βρίσκεται σε χαμηλότερη

πίεση από την προηγούμενή της. Σε κάθε βαθμίδα εξατμίζεται τόσο νερό ώστε η θερμοκρασία της άλμης να έρθει σε ισορροπία με την επικρατούσα πίεση στη βαθμίδα για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Ο ατμός συμπυκνώνεται πάνω σε σωλήνες που διέρχονται από την κάθε βαθμίδα. Το συμπύκνωμα που συγκεντρώνεται από όλες τις βαθμίδες, είναι το καθαρό προϊόν νερό.

Το νερό τροφοδοσίας χρησιμοποιείται σαν ψυκτικό υγρό των σωλήνων συμπύκνωσης. Έτσι ένα μεγάλο μέρος από το ενεργειακό περιεχόμενο του ατμού ανακτάται σ' αυτή τη φάση,

Το σχήμα 8 απεικονίζει ένα διάγραμμα της μεθόδου που περιγράφηκε. Μεγάλες μονάδες του τύπου αυτού μπορούν να έχουν 30 ή 40 βαθμίδες.

Η προκατεργασία του θαλασσινού νερού έγκειται –όπως και στην περίπτωση της εξάτμισης πολλαπλών δράσεων- στην προσθήκη οξέως. Αν και αυτός είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος, συγχρόνως είναι και ο πιο δύσκολος στον έλεγχο και τείνει να δημιουργήσει προβλήματα διάβρωσης στις σωληνώσεις και στα άλλα μεταλλικά εξαρτήματα της μονάδας.

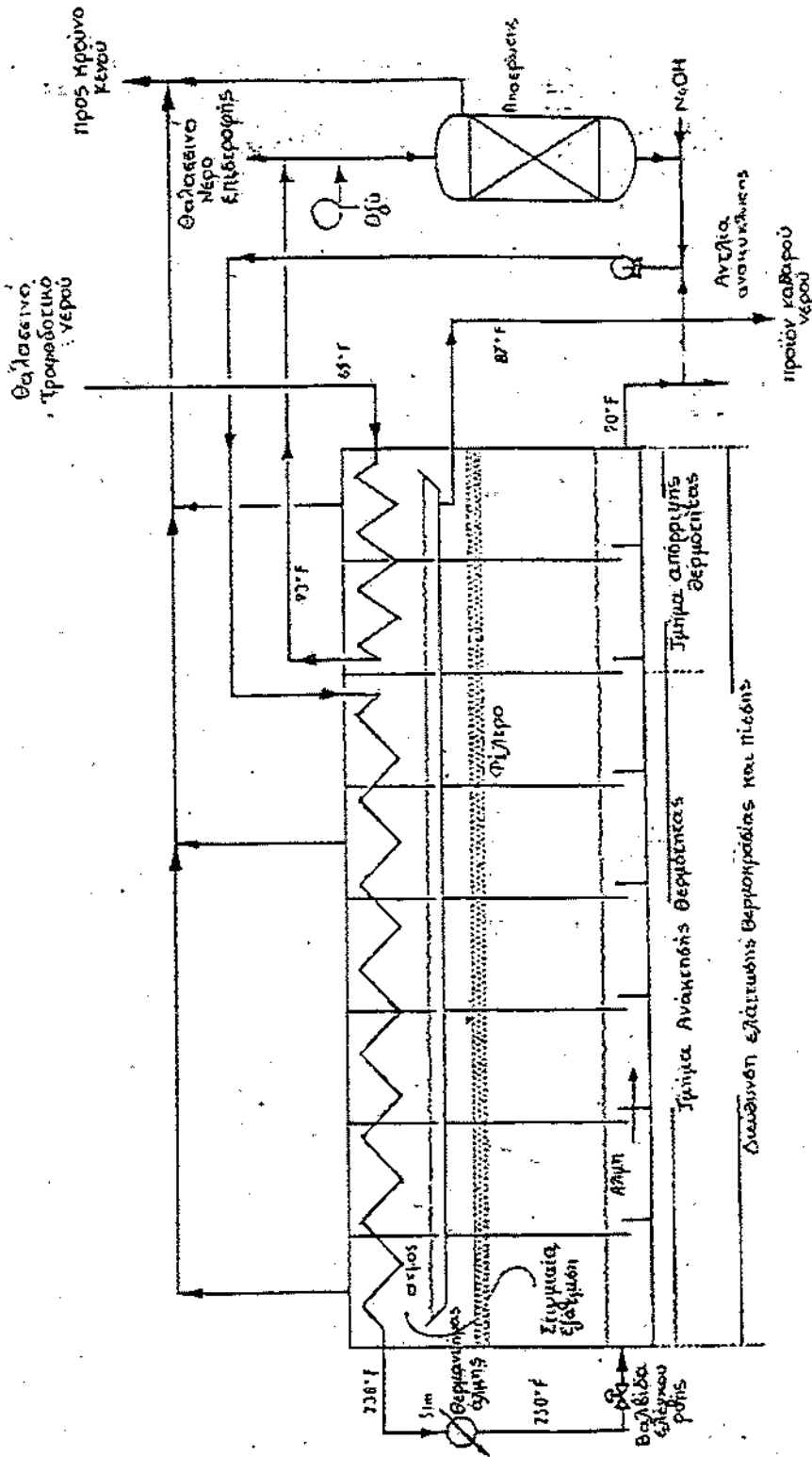
- Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι οι αποθέσεις έχουν μικρή επίδραση στο ρυθμό παραγωγής της μονάδας. Και αυτό γιατί ελαττώνεται η θερμική απόδοση και απαιτείται περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα φρέσκου νερού που παράγεται, αλλά εφόσον η απαιτούμενη ποσότητα νερού μπορεί να εξατμιστεί μέσα σε θερμοκρασιακά όρια σχεδιασμού και η παροχή σχεδιασμού, μπορεί να διατηρηθεί σταθερή, η αξιοπιστία του συστήματος σε παραγωγή

πόσιμου νερού είναι υψηλή και αυτός είναι ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας.

Σε σχέση με την εξάτμιση πολλαπλών δράσεων οι μονάδες στιγμιαίας απόσταξης διαφέρουν ως προς την ποσότητα της τροφοδοσίας σε δύο βασικές απόψεις:

α) το ποσό του νερού που ρέει σε μια εγκατάσταση στιγμιαίας απόσταξης είναι πολλές φορές μεγαλύτερο από το παραγόμενο απόσταγμα. Και αυτό γιατί οι αποθέσεις περιορίζουν την πτώση θερμοκρασίας με αποτέλεσμα ενώ στην περίπτωση της απλής διέλευσης ο λόγος (απόσταγμα/τροφοδοσία) είναι περίπου με 1: 2 , εδώ –και μάλιστα σε περίπτωση ανακύκλωσης της άλμης –να κυμαίνεται μεταξύ 1:6, και 1: 10 ανάλογα με την επιτρεπτή πτώση θερμοκρασίας.

Αφαλάτωση Θαλασσινού Νερού σε Πόσιμο



Σχήμα 8: Διάγραμμα πολυβάθμιας στιγμιαίας απόσταξης.

Για το λόγο αυτό σε μεγάλες μονάδες η ισχύς που απαιτείται για την ανακυκλοφορία της άλμης μπορεί να είναι σημαντική και να απαιτηθεί να χρησιμοποιηθούν πολυβάθμιες αντλίες.

β) Η τιμή GOR είναι σχετικά ανεξάρτητη από τον αριθμό των βαθμίδων, όπου για τον ορισμό του GOR «χρησιμοποιείται» στη θέση του ατμού θερμάνσεως της πρώτης βαθμίδας του εξατμιστήρα, εξωτερικά προστιθέμενος για θέρμανση της τροφοδοσίας, ο ατμός στην πρώτη βαθμίδα της μονάδας στιγμιαίας απόσταξης. Ο λόγος που παρατηρείται αυτό το γεγονός εξηγείται με θερμοδυναμική θεώρηση, και ερμηνεύεται και βάσει των συνθηκών που εφαρμόζονται στην πράξη.

Οι μονάδες στιγμιαίας απόσταξης έχουν επίσης σε σχέση με αυτές της εξάτμισης πολλαπλών δράσεων, μεγαλύτερο αριθμό βαθμίδων. Συγκεκριμένα, η πρακτική αυτή εφαρμόζεται για αύξηση της οικονομικής απόδοσης αν και η σχέση οικονομίας- αριθμού βαθμίδων δεν είναι ευθέως ανάλογη. Λόγοι οικονομίας επίσης επιβάλλουν την εφαρμογή της πρακτικής ανακυκλοφορίας της άλμης, ώστε με αυτό τον τρόπο να εξοικονομείται θερμική ενέργεια από τη θερμή ακόμα άλμη και να μειώνεται έτσι η εξωτερικώς προσφερόμενη θερμότητα, για την θέρμανση της τροφοδοσίας μέχρι την επιθυμητή θερμοκρασία.

Επανερχόμενοι λοιπόν στην ανάγκη χρησιμοποίησης πολυβάθμιων αντλιών, πρέπει να σημειώσουμε ότι οι απαιτήσεις είναι αρκετά υψηλότερες από τη μέθοδο της εξάτμισης πολλαπλών δράσεων, παρά το γεγονός ότι στην τελευταία χρησιμοποιείται αριθμός αντλιών σαφώς μεγαλύτερος από την περίπτωση που εξετάζουμε.

Οι σημερινές αξιολογήσεις υποδεικνύουν ότι η εξάτμιση με πολλαπλές δράσεις είναι οικονομικά πλεονεκτικότερη από την πολυβάθμια απόσταξη, αν και οι τεχνολογικές εξελίξεις προχωρούν τόσο γρήγορα σε όλες τις μεθόδους αφαλάτωσης, και η εικόνα αυτή, είναι δυνατό να ανατραπεί στο μέλλον.

Γενικά, οι προοπτικές εντοπίζονται στην ελάττωση του επενδυτικού κόστους, στον περιορισμό των ενεργειακών απαιτήσεων και στην απλοποίηση της λειτουργίας και της συντήρησης. Ακόμη, ας σημειωθεί ότι ο συνδυασμός των δύο αυτών μεθόδων αφαλάτωσης φαίνεται να έχει ενδιαφέρον αποτέλεσμα από αυτή τη σκοπιά.

#### **2.2.4 ΑΠΟΣΤΑΞΗ ΜΕ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΑΤΜΟΥ.**

(VAPOR COMPRESSION DISTILLATION, VC)

Οι αποστακτικές διαδικασίας που περιγράφηκαν ήδη, είναι βασισμένες πάνω στη σταδιακή υποβάθμιση της θερμικής ενέργειας από κάποια υψηλή αρχική θερμοκρασία στην τελική θερμοκρασία του νερού ψύξεως που κυκλοφορεί στους διάφορους εναλλάκτες και συμπυκνωτήρες. Αντίθετα η απόσταξη με συμπίεση ατμού, είναι μια διαδικασία στην οποία μια «αντλία θερμότητας» χρησιμοποιείται για να ανακυκλώσει τη λανθάνουσα θερμότητα από το τμήμα εξάτμισης της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας στο τμήμα (πλευρά) συμπύκνωσης της ίδιας επιφάνειας.

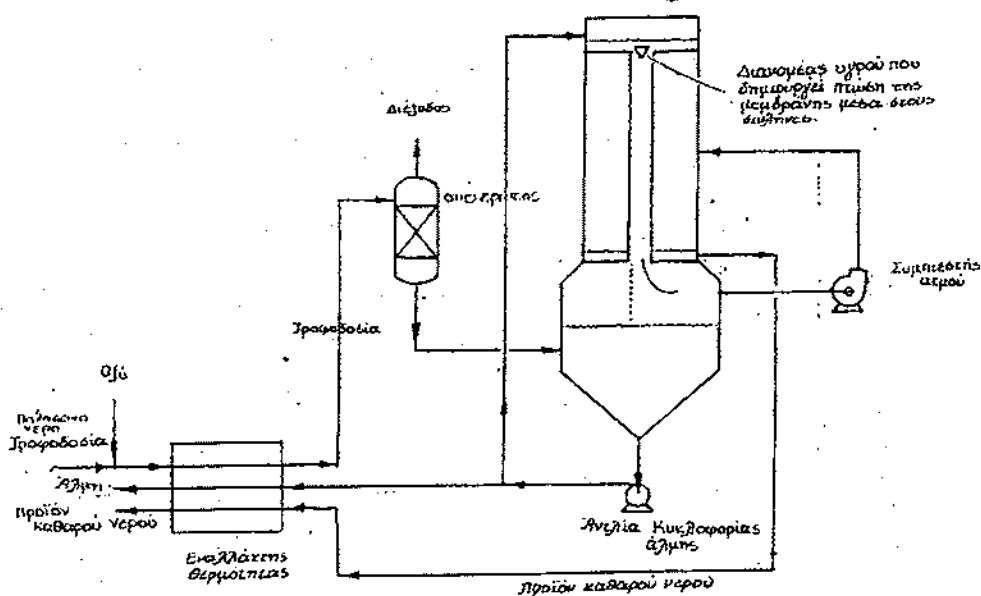
Διάγραμμα της διεργασίας δίνεται στο σχήμα 9

Η ενέργεια παράγεται στο σύστημα με ένα συμπιεστή του οποίου ο άξονας μπορεί να περιστρέφει ένας ηλεκτρικός κινητήρας, ένας αεροστρόβιλος ή μια νηζελομηχανή. Ο ατμός που προέρχεται από το

χώρο του εξατμιστήρα διερχόμενος από το συμπιεστή, γίνεται υπέρθερμος (το ποσοστό της θέρμανσης του, εξαρτάται από το λόγο συμπίεσης). Στη συνέχεια διαβιβάζεται στον εναλλάκτη του εξατμιστήρα (εξατμιστήρα- συμπυκνωτήρα καλύτερα) όπου συμπυκνώνεται αποδίδοντας το θερμικό του περιεχόμενο, στην εξάτμιση επιπλέον ποσού νερού από την ίδια «πηγή».

Εξυπακούεται ότι, η πίεση στην οποία συμπιέζεται ο ατμός του συμπιεστή είναι αρκετά υψηλή ώστε η συμπύκνωσή του να παράγει αρκετή θερμότητα.

Η θερμοκρασία συμπύκνωσης του ατμού είναι πάντα ψηλότερη από εκείνη του υγρού του εξατμιστήρα.



Σχήμα 9: Διάγραμμα εγκατάστασης απόσταξης με συμπίεση ατμού.

Αυτή η θερμοκρασιακή διαφορά είναι εξ' άλλου το δυναμικό μεταφοράς της θερμότητας και είναι γι' αυτό το λόγο που συμπιέζεται ο ατμός. Ας σημειωθεί ακόμα ότι ένας συμπληρωματικός εναλλάκτης θερμότητας παρέχεται στο σύστημα για περαιτέρω ψύξη του

αποστάγματος και της άλμης και για να προθερμάνει το θαλασσινό νερό- νερό τροφοδοσίας.

Οι μονάδες απόσταξης με συμπίεση ατμού έχουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών που εκτείνεται από φορητές συσκευές αφαλάτωσης μέχρι μεγάλες μονάδες με χαμηλό κόστος ενέργειας και υψηλό βαθμό ανάκτησης.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα προκειμένου για μικρές μονάδες είναι η αυτοδυναμία τους και η ανεξαρτησία τους από άλλες πηγές ατμού ηλεκτρικής ισχύος ή νερού ψύξης. Ακόμα, σ'αυτές τις περιπτώσεις ο συντελεστής συγκέντρωσης λαμβάνεται μικρότερος ή ίσος με 2 ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι ανάγκες προκατεργασίας και τα προβλήματα των αποθέσεων.

Μιλώντας για ίσες δυναμικότητες μπορεί κανείς να πει ότι το ενεργειακό κόστος της υπό εξέτασης μεθόδου τείνει να είναι χαμηλότερο από των άλλων δύο μεθόδων. Αν επιπλέον υπάρχει πρόβλεψη ώστε τα ρεύματα άλμης και αποστάγματος να βρίσκονται σε θερμοκρασία λίγων βαθμών υψηλότερη από τη θερμοκρασία του εισερχόμενου θαλασσινού νερού, ώστε να γίνεται πλήρης –κατά το δυνατό- εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας που ουσιαστικά παρέχεται από το συμπίεστή με μετατροπή της μηχανικής ενέργειάς του, τότε η οικονομία αυτής της διαδικασίας γίνεται ιδιαίτερα αξιόλογη.

Θα πρέπει πάντως να αναφερθεί ότι απαιτούνται για επίτευξη συγκρίσιμης δυναμικότητας –μεγάλες επιφάνειες εναλλαγής, δηλαδή αυξημένο πάγιο κόστος. Λειτουργία υπό κενό θα ελάττωνε το μέγεθος των εναλλακτών, αλλά συγχρόνως θα αύξανε τον ειδικό όγκο του ατμού και συνεπώς θα απαιτούσε μεγαλύτερο συμπίεστή. Παράλληλα, υψηλοί



λόγοι συμπίεσης ελαττώνουν το πάγιο κόστος σε βάρος του λειτουργικού.

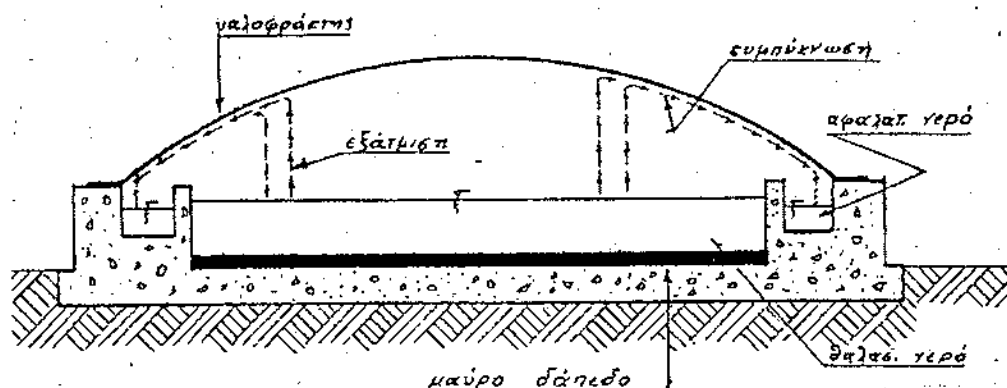
Πάντως εξεταστέα μπορεί να είναι και η προοπτική συνδυασμού αποστακτήρων με συμπίεση με μια από τις δύο προηγούμενες μεθόδους καθώς μπορεί αυτός να οδηγήσει σε εξοικονόμηση ενέργειας και αύξηση της δυναμικότητας του συστήματος.

### **2.2.5 ΑΠΟΣΤΑΞΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

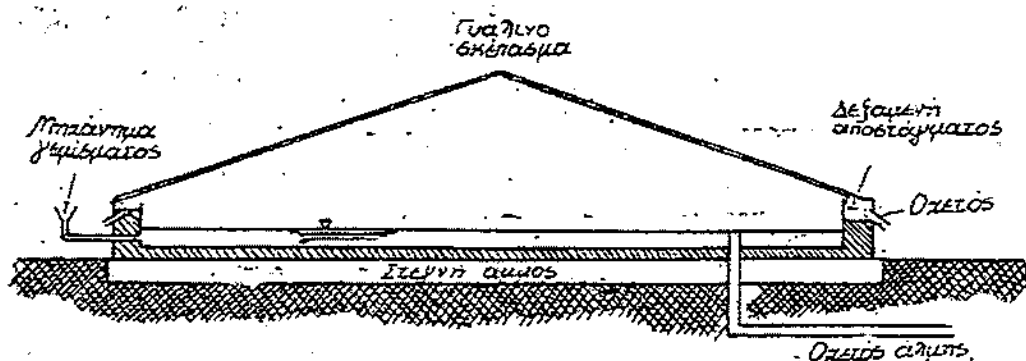
#### **(SOLAR DISTILLATION)**

Οι μέθοδοι απόσταξης που εξετάστηκαν προηγούμενους αποκτούν την απαιτούμενη θερμική ενέργεια από την καύση ενός καύσιμου υλικού. Στις περιπτώσεις πολυβάθμιας στιγμιαίας απόσταξης και εξάτμισης πολλαπλών δράσεων η θερμική ενέργεια «μεταφέρεται» στον ατμό και αυτός ο ατμός τελικά συμπυκνώνεται. Στην περίπτωση απόσταξης με συμπιεστή ατμού η ενέργεια που εισάγεται στο σύστημα παρέχεται από ένα αεροστρόβιλο, μια νηξελομηχανή ή έναν ηλεκτρικό κινητήρα. Στις περισσότερες από τις παραπάνω περιπτώσεις υπεισέρχεται ο παράγοντας κόστους καυσίμου, που αποτελεί ένα ουσιώδες κλάσμα του ολικού κόστους. Γι'αυτό κυρίως το λόγο έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες προς την κατεύθυνση της χρήσης ηλιακής ενέργειας μιας «ελεύθερης» μορφής ενέργειας αν εξαιρεθεί το κόστος συλλογής της. Η ηλιακή ενέργεια είναι μια πηγή χαμηλής, όπως λέγεται, εντάσεως (ή πυκνότητας), χρησιμοποιείται κυρίως σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά μπορεί να συγκεντρωθεί για να δώσει υψηλές θερμοκρασίες- με κάποιο συμπληρωματικό κόστος.

Η βασική συσκευή που χρησιμοποιείται συχνότερα για τη μέθοδο αυτή, είναι ο απλός ηλιακός αποστακτήρας (SIMPLE SOLAR STILL) που απεικονίζεται στα σχήματα 10,11 και 12.



Σχήμα 10: Ηλιακός αποστακτήρας



Σχήμα 12: Ηλιακός αποστακτήρας

Αποτελείται κυρίως από την λεκάνη νερού και το επικλινές διαφανές κάλυμμα, ενώ σε όλους τους τύπους αποστακτήρων υπάρχουν οι συλλέκτες αποστάγματος.

Η ηλιακή ακτινοβολία παίρνεται μέσα από τα καλύμματα απορροφάται από το νερό και την επιφάνεια της λεκάνης, η οποία

καλύπτεται από ένα αδιαφανές (μαύρο συνήθως) υλικό. Αυτή η ακτινοβολία μετατρέπεται σε θερμότητα με απορρόφηση και το θερμαινόμενο έτσι νερό εξατμίζεται μερικώς αυξάνοντας την υγρασία του αέρα πάνω από την επιφάνεια του υγρού μειώνοντας την πυκνότητά του και προκαλώντας την κυκλοφορία του προς τα πάνω.

Ο κινούμενος αέρας έρχεται σ'επαφή με την εσωτερική επιφάνεια του ψυχρότερου διαφανούς καλύμματος και μέρος της υγρασίας συμπυκνώνεται μ'αυτό τον τρόπο σ'αυτό το σημείο. Το υγρό που συμπυκνώνεται δημιουργεί έτσι ένα λεπτό στρώμα και ρέει προς τη βάση του καλύμματος, από όπου συλλέγεται στους συλλέκτες αποστάγματος και απομακρύνεται από το σύστημα.

Παράλληλα, ο αέρας που ψύχθηκε με αυτό τον τρόπο επιστρέφει στην επιφάνεια του θερμού νερού για να επαναλάβει τη διαδικασία ύγρανσης.

Η κίνηση του αέρα οφείλεται κατά συνέπεια αποκλειστικά σε φυσική κυκλοφορία.

Είναι προφανές, με βάσει όσα αναφέρθηκαν σχετικά με την διαδικασία, ότι θα πρέπει να πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- Η λεκάνη του νερού θα πρέπει να είναι υδατοστεγής και να καλύπτεται από υλικό με μικρό συντελεστή διαβιβάσεως (τα) της ακτινοβολίας.

- Το διαφανές κάλυμμα (συνήθως από γυαλί, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις και από πλαστικό) πρέπει να εφαρμόζεται αεροστεγώς στα άκρα του για να αποφεύγεται απώλεια ατμού και πρέπει να έχει την κατάλληλη κλίση ώστε το σχηματιζόμενο στην εσωτερική του επιφάνεια συμπύκνωμα να ρέει υπό την επίδραση της βαρύτητας στους συλλέκτες αποστάγματος παρά να πέφτει πίσω στη λεκάνη. Οι συλλέκτες αυτοί θα

πρέπει ακόμη να είναι έτσι σχεδιασμένοι ώστε να συλλέγουν όλο το ρέον συμπύκνωμα και να το μεταφέρουν στο εξωτερικό του συστήματος. Όλοι οι μεγάλοι ηλιακοί αποστακτήρες είναι κτισμένοι στο έδαφος είτε με κάποιο μονωτικό υλικό, για να περιοριστούν οι απώλειες θερμότητας.

Τα χρησιμοποιούμενα υλικά για την κατασκευή του σκελετού υπήρξαν και είναι, ξύλο, μπετόν, μέταλλα και πλαστικά.

Τα βασικά προβλήματα για την εφαρμογή μεθόδου που χρησιμοποιεί ηλιακή ενέργεια για αφαλάτωση προέρχονται από τη φύση της «πηγής». Συγκεκριμένα, η μέγιστη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι περίπου  $1.000 \text{ W/m}^2 \text{ H}_2$  (καλύτερα: «μέγιστη πυκνότητα ροής») σε μια επιφάνεια κάθετη στις ηλιακές ακτίνες το μεσημέρι. Η μεγάλη όμως διακύμανση της εντάσεως αυτής, τόσο ημερήσια όσο και ετήσια επιβάλλει ότι κάθε συσκευή που θα χρησιμοποιεί ηλιακή ενέργεια για απόσταξη νερού πρέπει να είναι ικανή να λειτουργεί σε μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος. Προφανές είναι ότι η φύση της ηλιακής ακτινοβολίας θέτει μια εντελώς διαφορετική σειρά προβλημάτων. Η παραγωγή μιας τέτοιας εγκατάστασης κυμαίνεται από το μηδέν για το μεγαλύτερο μέρος της νύχτας σε ένα μέγιστο το μεσημέρι μιας ηλιόλουστης μέρας. Επίσης, οι ρυθμοί ημερήσιας παραγωγής κατά το χειμώνα και το καλοκαίρι διαφέρουν κατά ένα συντελεστή μέχρι 4 ή και περισσότερο (αντίστοιχες ημερήσιες πυκνότητες ακτινοβολίας περίπου  $1200 \text{ BTU/FT}^2$  και  $2500 \text{ BTU/FT}^2$ ).

Κάθε προσπάθεια για χρήση αυτής της πηγής ενέργειας αντιμετωπίζει κατά συνέπεια το πρόβλημα αυτό σε αντίθεση με τους σταθερούς

ρυθμούς παραγωγής που απαιτούνται σε εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν καύσιμα προερχόμενα από απολιθώματα.

Ας σημειωθεί ακόμη το σημαντικό πάγιο κόστος καθώς και αυτό της επίβλεψης και της συντήρησης. Παρ' όλα αυτά, τέτοιο κόστος, δεν είναι απαράδεκτο για μονάδες μικρής δυναμικότητας οι οποίες εγκαθίστανται σε απομακρυσμένες άνυδρες και σε νησιώτικες περιοχές, όπου απαιτούνται μικροί ρυθμοί παραγωγής- παρά τη χαμηλή τιμή PR (για τυπική τέτοια τιμή για μονάδες παραγωγής 0,14 GPD/FT<sup>2</sup> που λειτουργεί υπό πυκνότητα ακτινοβολίας 2500 BTU/FT<sup>2</sup> είναι η 0,47 LB προϊόντος νερού/1000BTU). Επιπλέον, η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσω του ηλιακού θερμικού συλλέκτη (SOLAR HEAT COLLECTOR) ο οποίος θερμαίνει νερό μέχρι μια θερμοκρασία, όπου δεν εμφανίζεται εξάτμιση, και το προθερμανθέν νερό μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί από μια συμβατική εγκατάσταση εξάτμισης πολλαπλών δράσεων, ή πολυβάθμιας στιγμιαίας απόσταξης προσφέροντας μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική πιθανότητα χρησιμοποίησης της ενεργειακής αυτής πηγής.

### **2.3 ΨΥΞΗ (FREEZING ή FREEZE SEPARATION)**

Η διαδικασία αυτή κάνει χρήση του δεδομένου ότι κρύσταλλοι πάγου οι οποίοι παράγονται από αλατούχα διαλύματα δεν περιέχουν κανένα από τα διαλυμένα αυτά άλατα.

Αν τέτοιοι κρύσταλλοι είναι δυνατό να διαχωριστούν από την παραμένουσα άλμη και μετά να λειώσουν, το παραγόμενο νερό θα είναι σχεδόν απόλυτα καθαρό. Το βασικό πρόβλημα στην ανάπτυξη αυτής της μεθόδου είναι ο διαχωρισμός των κρυστάλλων από την άλμη.

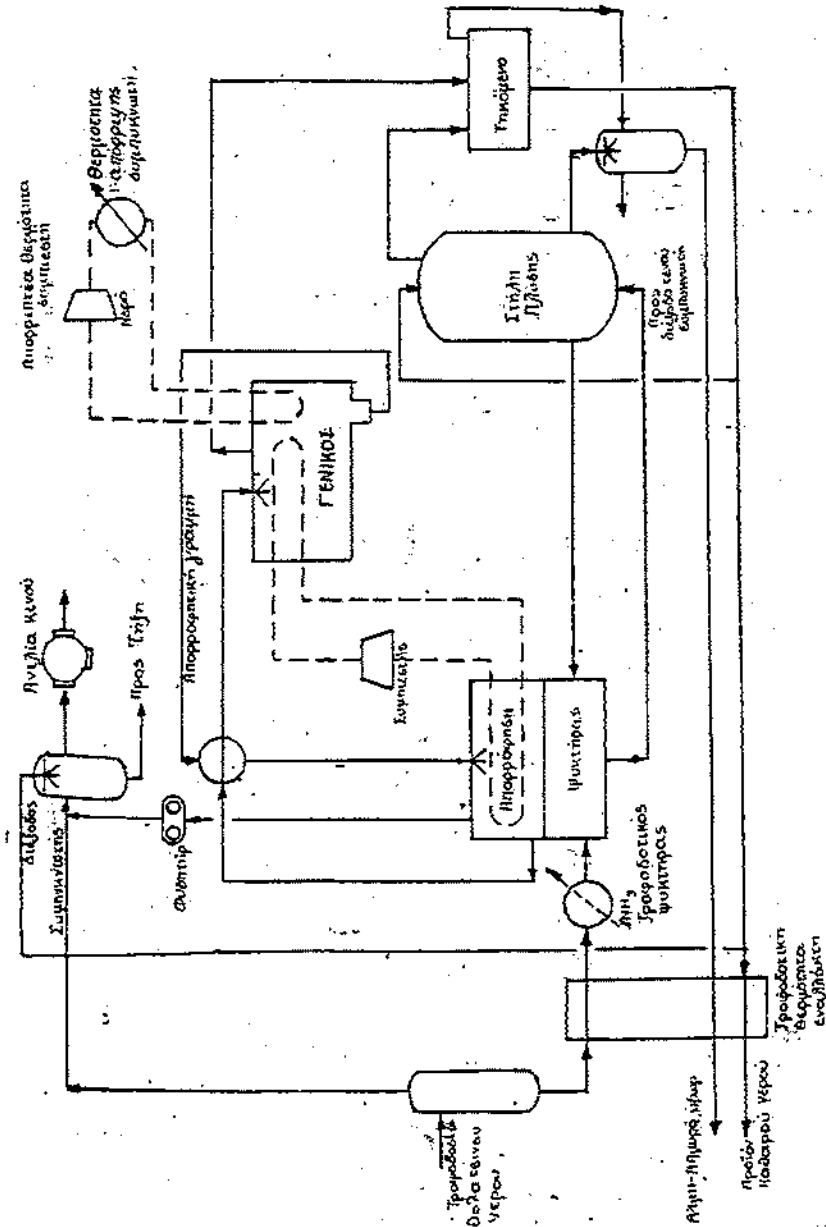
Η διαδικασία του ψυκτικού διαχωρισμού περιλαμβάνει τρία διακεκριμένα στάδια:

α) Σχηματισμός κρυστάλλων μέσω απομάκρυνσης θερμότητας από το αλμυρό διάλυμα.

β) Απομάκρυνση των σχηματισμένων κρυστάλλων από το αλατούχο νερό.

γ) Τήξη του πάγου με προσθήκη θερμότητας.

Η ψύξη σαν μέθοδος αφαλάτωσης έχει πολλά τεχνολογικά και οικονομικά πλεονεκτήματα, όπως μικρή –από πρώτη ματιά- ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με την απόσταξη, και ανυπαρξία προβλημάτων αποθέσεων ή διαβρώσεων. Παρά όμως τα θεωρητικά της πλεονεκτήματα η μέθοδος δεν έχει εφαρμοσθεί σε καμία περίπτωση σε βιομηχανική κλίμακα.



Σχήμα 13: Διάγραμμα εγκατάστασης αφαλάτωσης με ψύξη

Η OWRT έχει εγκαταστήσει μια πειραματική μονάδα (PILOT PLANT) επίδειξης όπου γίνεται ψύξη με απορρόφηση και συμπίεση ατμών, και πιστεύει να την επεκτείνει σε βιομηχανική κλίμακα. Σε αυτή τη διεργασία απαερωμένο νερό τροφοδοσίας, ψύχεται αρχικά σε ένα εναλλάκτη που χρησιμοποιεί 2 NH<sub>3</sub> για ψυκτικό υγρό και στη συνέχεια

εισέρχεται σε ένα δοχείο όπου η πίεση είναι αρκετά χαμηλή ώστε να προκαλέσει εξάτμιση ενός μέρους από το νερό. Ο ατμός απορροφάται από ένα κεκορεσμένο αλατοδιάλυμα και η λανθάνουσα θερμότητα απορρόφησης απομακρύνεται με ένα ψυκτικό σύστημα. Η εξάτμιση μέρους του νερού τροφοδοσίας αφαιρεί θερμότητα από αυτό με αποτέλεσμα τον σχηματισμό κρυστάλλων πάγου. Το ρεύμα αυτό διοχετεύεται ακολούθως σε μια στήλη έκπλυσης όπου οι κρύσταλλοι στραγγίζονται, πλένονται με καθαρό νερό και τέλος τήκονται για να σχηματίσουν το προϊόν.

Εφ' όσον η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού είναι περίπου 7 φορές μεγαλύτερη από τη θερμότητα κρυστάλλωσης, συμπεραίνει κανείς ότι περίπου 7 KG πάγου θεωρητικά δημιουργούνται για κάθε KG νερού που εξατμίζεται.

Ακριβώς γι' αυτό, φαίνεται από πρώτη ματιά ότι πολύ λίγη ενέργεια θα απαιτείτο για τη λειτουργία μονάδας με ικανοποιητική δυνατότητα. Στην πράξη όμως οι ενεργειακές απαιτήσεις αυξάνουν λόγω των συμπιεστών και της αντλίας κενού που όπως φαίνεται στο σχήμα 13 συνδέεται με το ρεύμα αερίων (που προήλθε από την απαερίωση του νερού τροφοδοσίας), καθώς και από την απαιτούμενη ισχύ για την κυκλοφορία του νερού και της άλμης μέσω του συστήματος.

Η σπουδαιότερη εφαρμογή της ψύξης, σαν μεθόδου αφαλάτωσης μπορεί να είναι στην κατεργασία νερού αποβλήτων η ανάκτηση χρήσιμων προϊόντων.

Επίσης, η μέθοδος της ψύξης μπορεί να εφαρμοστεί το ίδιο καλά στην αφαλάτωση και θαλασσινού και υφάλμυρου νερού. Οι σχετικά μικρές ενεργειακές απαιτήσεις της μεθόδου την κάνουν ιδιαίτερα ελκυστική για



περαιτέρω διερεύνηση στο μέλλον με την προϋπόθεση μείωσης των συμπληρωματικών απαιτήσεων που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

#### **2.4 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑ ΕΝΥΔΡΩΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ**

##### **(HYDRATE SEPARATION)**

Η μέθοδος αυτή είναι πιθανόν αποτελεσματικότερη από την ψύξη, καθώς ένυδροι κρύσταλλοι σχηματίζονται σε θερμοκρασίες πλησιέστερες στις συνθήκες του περιβάλλοντος από αυτές στις οποίες σχηματίζεται ο πάγος. Η διαδικασία είναι παρόμοια με τη διαδικασία του ψυκτικού διαχωρισμού αν και ο χώρος ψύξεως (FREEZER ή FREEZE CHAMBER) έχει αντικατασταθεί από έναν αντιδραστήρα (REACTOR CHAMBER) όπου η πίεση και η θερμοκρασία είναι τέτοια ώστε να σχηματιστούν οι ένυδροι κρύσταλλοι.

Ουσίες όπως μεθυλοβρωμίδιο, προπάνιο και FREON -12 οι οποίες σχηματίζουν κρυστάλλους με μεγάλη αναλογία νερού (π.χ. C<sub>3</sub> H<sub>8</sub>-13 H<sub>2</sub>O Cl<sub>2</sub> F<sub>2</sub> 12 H<sub>2</sub> O) έχουν χρησιμοποιηθεί σε στάδιο πειραματικής μονάδας για παραγωγή φρέσκου νερού. Σε αυτές τις εγκαταστάσεις η τελική απομόνωση του νερού –συνίσταται στην τήξη του ένυδρου συστατικού που προέρχεται από την τήξη διαχωρίζεται με μεθόδους βασισμένες στη βαρύτητα.

Η δυσκολία εφαρμογής της μεθόδου σε βιομηχανική κλίμακα και από οικονομική άποψη, έγκειται στις σχετικές υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις της, οι οποίες μειώνονται με κατάλληλες τροποποιήσεις της μονάδας, που γίνεται όμως τότε εξαιρετικά πολύπλοκη. Άμεση συνέπεια αυτού είναι αύξηση του πάγιου κόστους καθώς και του κόστους επίβλεψης και συντήρησης. Ας σημειωθεί ακόμα, ότι λόγω του πολύ

μικρού μεγέθους των ένυδρων κρυστάλλων που σχηματίζονται κατ' αυτή τη διαδικασία απαιτείται φιλτράρισμα το οποίο δεν είναι παρόν στον ψυκτικό διαχωρισμό, ενώ αρκετά τεχνικά προβλήματα πρέπει ακόμα να λυθούν πριν αυτή η μέθοδος να μπορέσει να χαρακτηριστεί σαν πλήρως ανεπτυγμένη.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

### **ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ**

#### **3.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Οι διεργασίες που αναφέρθηκαν μέχρι τώρα το διαχωρισμό «φρέσκου» νερού από το αλατούχο διάλυμα μέσω αλλαγών φάσεων του νερού, δηλαδή νερό σε στερεά ή αέρια κατάσταση διαχωρίζεται από το υγρό διάλυμα. Η απαιτούμενη ενέργεια θα είναι σχετικά ανεξάρτητη της περιεκτικότητας της τροφοδοσίας σε άλατα. Σε αντίθεση, υπάρχουν ορισμένες διεργασίες στις οποίες είτε τα ανεπιθύμητα άλατα είτε το καθαρό νερό απομακρύνονται από το αλατούχο διάλυμα με τη χρήση χημικών ουσιών ή μεμβρανών. Αυτές οι τελευταίες μέθοδοι είναι περισσότερο εφαρμόσιμες με νερά χαμηλής αλατότητας, όπου η απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή ορισμένης ποσότητας πόσιμου νερού είναι μικρότερη από την ενέργεια για αφαλάτωση μέσω μεθόδου αλλαγής φάσης.

Ειδικά για τις μεθόδους που χρησιμοποιούν μεμβράνες τώρα: στην ηλεκτροδιάλυση η απαιτούμενη ενέργεια είναι ανάλογη των απομακρυνόμενων ιόντων, ενώ στην αντίστροφη ώσμωση μεταβάλλεται με την ωσμωτική πίεση του διαλύματος που είναι ανάλογη της περιεκτικότητας.

Είναι χρήσιμο πριν την αναλυτικότερη περιγραφή κάθε μιας από αυτές τις δύο μεθόδους να προσδιορίσουμε τους όρους ώσμωσης και διάλυσης. Κάθε ένας από αυτούς τους όρους αναφέρεται σε κατάσταση

όπου μια μεμβράνη, δηλαδή ένα συνθετικό λεπτό ημιπερατό στρώμα διαχωρίζει δύο υδατικά διαλύματα διαφορετικών συγκεντρώσεων.

Ωσμωση είναι η διάχυση νερού, μέσα από την μεμβράνη από το αραιότερο προς το πυκνότερο διάλυμα.

Διάλυση είναι η διάχυση μέσα από τη μεμβράνη των διαλελυμένων αλάτων από το πυκνότερο προς το αραιότερο διάλυμα.

Η τάση και στις δύο περιπτώσεις είναι η εξίσωση των δύο συγκεντρώσεων. Ο βαθμός στον οποίο γίνονται αυτές οι διαχύσεις διαφέρει ανάλογα με τις χρησιμοποιούμενες μεμβράνες αλλά σε γενικές γραμμές, οι οσμωτικές μεμβράνες επιτρέπουν τη μεταβίβαση σχετικά λίγων διαλελυμένων ιόντων και οι μεμβράνες της διάλυσης επιτρέπουν την μεταφορά μικρού μόνο ποσού καθαρού νερού.

### **3.2 ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΠΙΔΥΣΗ**

Εδώ ο διαχωρισμός νερού από το διάλυμα γίνεται δια μέσου μεμβρανών που εκλεκτικά επιτρέπουν τη διέλευση θετικών/ αρνητικών ιόντων και απαγορεύουν τη διέλευση των αρνητικών /θετικών ιόντων με εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης.

Κατά αυτή τη μέθοδο το θαλασσινό νερό οδηγείται μέσα σε θάλαμο, ο οποίος διαιρείται σε διαμερίσματα (κελιά) με την παρεμβολή διαφραγμάτων (μεμβρανών).

Τα διαφράγματα αυτά είναι κατάλληλα, ώστε να επιτρέπουν ανάλογα με το είδος τους τη διέλευση μόνο θετικών ή μόνο αρνητικών ιόντων. Αν τα δύο άκρα διαμερίσματα (κελιά) του θαλάμου τεθούν υπό συνεχή ηλεκτρική τάση, σχήμα 14, τότε το εντός του θαλασσινού νερού αλάτι διασπάται σε ιόντα Na και ιόντα Cl τα οποία, αφού περάσουν τις

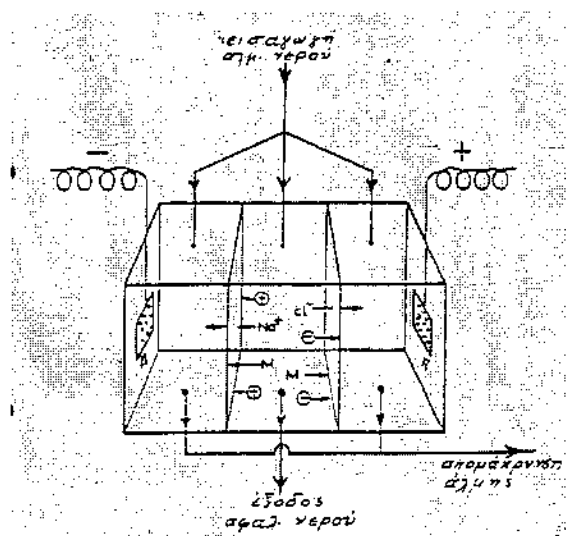
## Αφαλάτωση Θαλασσινού Νερού σε Πόσιμο

αντίστοιχες μεμβράνες (M) κατευθύνονται προς τους πόλους (Π) της ηλεκτρικής πηγής. Αποτέλεσμα της κίνησης αυτής των ιόντων προς τα ακραία διαμερίσματα του θαλάμου, είναι να απομένει στο μεσαίο διαμέρισμα το αφαλατωμένο νερό. Η πλήρης αφαλάτωση δεν επιτυγχάνεται συνήθως σε ένα μόνο στάδιο, αλλά σε περισσότερα «εν σειρά».

Σε κάθε στάδιο το κατεργαζόμενο νερό χάνει το 40-50 % των περιεχόμενων αλάτων. Το απομακρυνόμενο συμπυκνωμένο νερό των ακραίων διαμερισμάτων αποτελεί περίπου το 60% της αρχικής ποσότητας.

Όπως και στην αντίστροφη ώσμωση, η λειτουργία της μεθόδου επηρεάζεται από το φαινόμενο της πόλωσης συγκεντρώσεως. Άμεση επίδραση αυτού είναι η αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης της συσκευής με αποτέλεσμα μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Για την ελάττωση των συνεπειών χρησιμοποιούνται κατάλληλες διατάξεις μεμβρανών και ροής του νερού.

Το ανώτερο όριο πίεσης και θερμοκρασίας κατά τη λειτουργία είναι 2 atm και 40°C.



Σχήμα 14: Σχηματική παράσταση μεθόδου αφαλάτωσης με ηλεκτροδιαπίδυση.

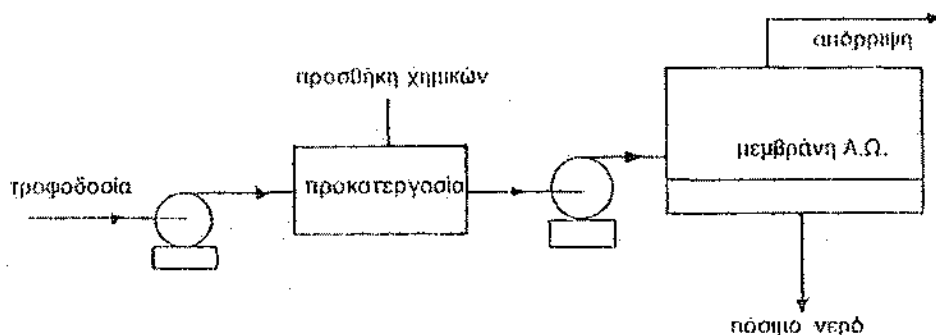
### 3.3 ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ

#### 3.3.1 ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

Αφαλάτωση με Αντίστροφη Ωσμωση (Α.Ω): είναι ο διαχωρισμός του διαλύτη (νερού) από ένα διάλυμα (νερά +άλατα) δια μέσου ημιπερατής μεμβράνης με εφαρμογή μηχανικής πίεσης. Οι μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης συγκρατούν εκλεκτικά το μεγαλύτερο μέρος των διαλυμένων μορίων και ιόντων (άλατα) και επιτρέπουν τη διέλευση του διαλύτη (νερού).

Στην πράξη υπάρχουν μεμβράνες που συγκρατούν το 99% των αλάτων.

Στο επόμενο σχήμα (σχήμα 15) δίνεται μια απλοποιημένη εγκατάσταση αντίστροφης ώσμωσης.



Σχήμα 15: Απλοποιημένη εγκατάσταση αντίστροφης ώσμωσης

Για να καταλάβουμε πως λειτουργεί η αντίστροφη ώσμωση θα πρέπει να ξεκινήσουμε από τη φυσική ώσμωση κατά την οποία το καθαρό νερό ρέει μέσω μιας ημιπερατής μεμβράνης από ένα αραιό διάλυμα σε ένα

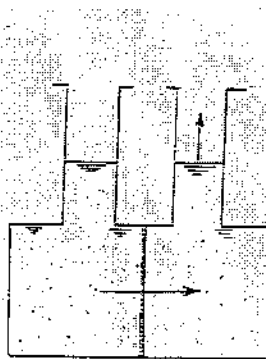
πιο πυκνό προκαλώντας αραίωση του τελευταίου. Η ροή αυτή του νερού λαμβάνει χώρα μέχρι να εξισωθεί η πίεση στις δύο πλευρές της μεμβράνης.

Η αντίστροφη του αυθόρμητου αυτού φαινομένου η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια ροή από ένα πυκνό προς ένα αραιότερο διάλυμα, είναι δυνατή εφ'όσον υπερνικηθεί η διαφορά πίεσεως μεταξύ των δύο διαλυμάτων, η γνωστή σαν ωσμωτική πίεση.

Έτσι, με την εξάσκηση μιας εξωτερικής πίεσεως κατά τι μεγαλύτερης της ωσμωτικής σε ένα διάλυμα νερού μπορούμε να προκαλέσουμε ροή των μορίων του νερού μέσω της μεμβράνης, έτσι ώστε το μεν πέρασμα από την μεμβράνη να είναι καθαρό νερό ενώ στο συμπύκνωμα να συγκρατούνται οι ανεπιθύμητες εν διαλύσει ουσίες. Όταν η άσκηση της πίεσεως μέσω μιας αντλίας υψηλής πίεσης στο ρεύμα τροφοδοσίας είναι συνεχής, τότε η ροή τόσο του περάσματος που αποτελεί το καθαρό προϊόν, όσο και του συμπυκνώματος που αποτελεί το απορριπτόμενο υποπροϊόν, είναι επίσης συνεχής.

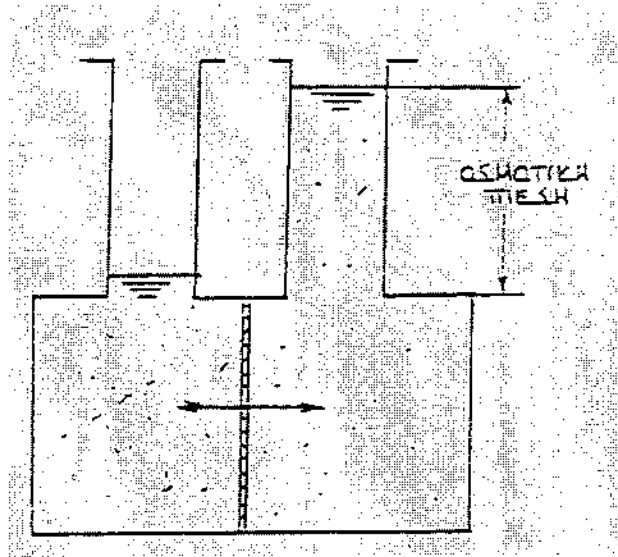
Στην πραγματικότητα το συμπύκνωμα περιέχει εν διαλύσει στερεά σε μεγάλη συγκέντρωση ενώ το προϊόν εξακολουθεί να περιέχει μια μικρή συγκέντρωση.

Για να γίνει πιο κατανοητή η αρχή της αντίστροφης ώσμωσης παραθέτουμε τα ακόλουθα σχήματα:



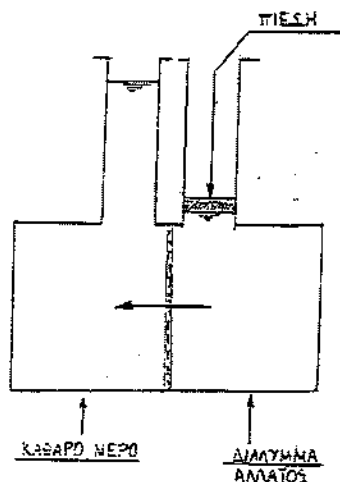
Σχήμα 16: Φαινόμενο φυσικής  
ώσμωσης

Η ημιπερατή μεμβράνη χωρίζει ένα υδατικό διάλυμα άλατος (δεξιά) από το καθαρό νερό (αριστερά). Παρατηρείται μια ροή καθαρού νερού προς την πλευρά του υδατικού διαλύματος.



Σχήμα 17: Αποκατάσταση ωσμωτικής ισορροπίας- Ωσμωτική πίεση

Όταν η πίεση στις δύο πλευρές εξισωθεί αποκαθίσταται η ωσμωτική ισορροπία, η δε ανύψωση της στάθμης στην πλευρά του υδατικού διαλύματος μας δείχνει την ωσμωτική πίεση του διαλύματος.





*Σχήμα 18: Αντίστροφη ώσμωση*

Αν εξασκήσουμε μια εξωτερική πίεση μεγαλύτερη από την ωσμωτική τότε προκαλούμε αντίστροφη της ροής, δηλαδή, μορίων νερού από την περιοχή του διαλύματος προς την περιοχή του καθαρού νερού.

**3.3.2 ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ  
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΥΠΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ**

Η αντίστροφη ώσμωση είναι μια καινούργια σχετικά μέθοδος αφαλάτωσης αλμυρού νερού, που διακρίνεται για την απλότητα της (τουλάχιστον σε θεωρητικό επίπεδο) και ιδιαίτερα για το χαμηλό κόστος.

Αρχή της μεθόδου είναι ότι με την εφαρμογή κατάλληλου μεγέθους πίεσης στο αλμυρό νερό επιτυγχάνεται η διάχυση των μορίων του νερού διαμέσου ημιπερατής μεμβράνης. Η εφαρμοζόμενη πίεση είναι μεγαλύτερη της ωσμωτικής πίεσης του αλμυρού νερού, επειδή, καθώς το νερό διαπερνά τη μεμβράνη, η τροφοδοσία εμπλουτίζεται σε άλατα με αποτέλεσμα να αυξάνει η ωσμωτική πίεση του αλμυρού νερού που βρίσκεται κοντά στη μεμβράνη. Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι η εφαρμοζόμενη πίεση καθορίζεται όχι μόνο από τη συγκέντρωση του νερού τροφοδοσίας, αλλά και από την ανάκτηση του προϊόντος\*, ενώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση λειτουργίας τόσο μεγαλύτερη είναι και η καθαρότητα του παραγόμενου νερού. Στην πράξη, η πίεση λειτουργίας ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης κυμαίνεται μεταξύ 800 και 1.500 PSI.

---

\* Σαν «λόγος ανάκτησης προϊόντος» αναφέρεται ο λόγος της ροής του παραγόμενου καθαρού νερού προς τη ροή του νερού τροφοδοσίας εκφρασμένος επί τοις εκατό (%).

Οι ημιπερατές μεμβράνες της αντίστροφης ώσμωσης μπορεί να είναι κατασκευασμένες από οξική κυτταρίνη, αρωματικά πολυαμίδια ή πολυσουλφόνες. Παράγοντα σε διάφορα σχήματα όπως σε φύλλα, σωλήνες ή λεπτές κοίλες ίνες, και συναρμολογούνται με διάφορους τρόπους στο εσωτερικό μακρόστενων κυλινδρικών δοχείων πίεσης. Αριθμός τέτοιων κυλινδρικών δοχείων πίεσης, συνδεδεμένων μεταξύ τους σε σειρά ή παράλληλα, δημιουργεί διάφορες διατάξεις που είναι κατάλληλες για την παραγωγή νερού ορισμένης ποσότητας και ποιότητας.

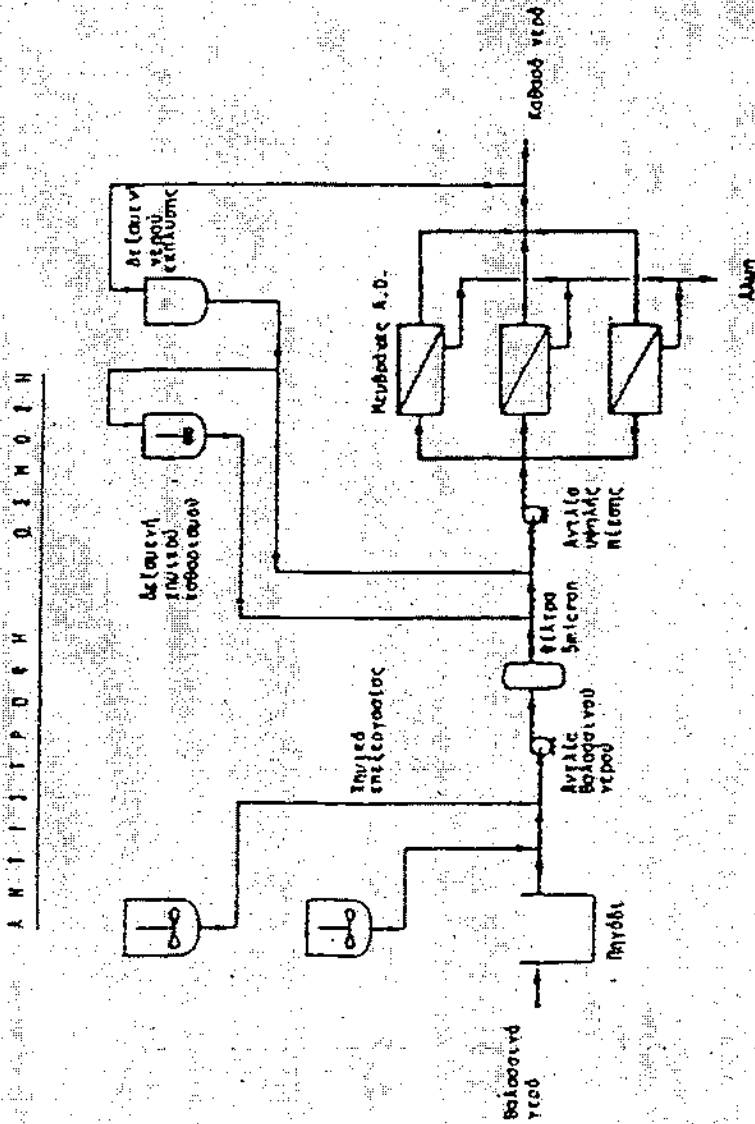
Εξαιτίας της ευαισθησίας, που παρουσιάζουν οι μεμβράνες στη δημιουργία αποθέσεων είναι αναγκαία μια επεξεργασία του αλμυρού τροφοδοτικού νερού που εξαρτάται από την ίδια του την σύσταση αλλά και από το είδος των χρησιμοποιούμενων μεμβρανών. Συνήθως η προεπεξεργασία περιορίζεται στο φιλτράρισμα του νερού, της τροφοδοσίας, αλλά προστίθεται και μια χημική επεξεργασία του τροφοδοτικού νερού αν αυτό κριθεί απαραίτητο.

Στο σχήμα 19 παρουσιάζεται το διάγραμμα μιας τυπικής εγκατάστασης αντίστροφης ώσμωσης.

Το αλμυρό νερό της τροφοδοσίας οδηγείται στη δεξαμενή τροφοδοσίας, αφού προηγουμένως έχει απαλλαχθεί από τα μεγάλα αιωρούμενα σωματίδια, όπου χλωριώνεται και προστίθεται σ' αυτό η κατάλληλη ποσότητα οξέως για ρύθμιση του ΡΗ, που επιτυγχάνεται (η ρύθμιση του ΡΗ) διαμέσου ενός συστήματος.

Στη συνέχεια το νερό τροφοδοσίας φιλτράρεται και μετά την απαέρωση που υφίσταται απαερωτή, κατευθύνεται προς την αντλία υψηλής πίεσης που το διοχετεύει υπό πίεση στο συγκρότημα των

μεμβρανών όπου συντελείται ο διαχωρισμός του καθαρού νερού από την άλμη. Το παραγόμενο καθαρό νερό συλλέγεται σε ατμοσφαιρική πίεση σε μια δεξαμενή από όπου μπορεί να δοθεί στην κατανάλωση.



Σχήμα 19: Διάγραμμα αντίστροφης ώσμωσης

Το μεγαλύτερο μέρος της απαιτούμενης ενέργειας σε μια εγκατάσταση αντίστροφης ώσμωσης καταναλώνεται για να ανεβάσει την πίεση στα 800+ 1.500 PSI. Μέρος αυτής της ενέργειας παραμένει σαν ενέργεια πίεσης στην απορριπτόμενη άλμη, που συνήθως

επανέρχεται στην ατμοσφαιρική πίεση, διερχόμενη από μια στραγγαλιστική βαλβίδα. Σε μεγάλες μονάδες θα μπορούσε να δικαιολογηθεί η χρήση στροβίλου, που θα επανακτούσε ένα μέρος της απορριπτόμενης, υπό μορφής πίεσης και έτσι θα αυξάνονταν η συνολική ενεργειακή απόδοση της μονάδας. Για μικρές μονάδες όμως κάτι τέτοιο είναι οικονομικά ασύμφορο.

Η τεχνολογική εξέλιξη στον τομέα των μεμβρανών και γενικότερα στη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης ακολουθεί γρήγορο ρυθμό έτσι ώστε το πάγιο και ενεργειακό κόστος της μεθόδου να μειώνεται συνεχώς.

Αποτέλεσμα αυτής της τεχνολογικής εξέλιξης είναι ότι η μέθοδος θεωρείται οικονομικότερη όλων των άλλων μεθόδων αφαλάτωσης του αλμυρού νερού για μικρές μονάδες και υπάρχει η πεποίθηση ότι γρήγορα θα είναι οικονομική για μονάδες κάθε δυναμικότητας.

### **3.3.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΚΑΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ**

Από την άποψη της χημικής, μηχανικής η αντίστροφη ώσμωση μπορεί να θεωρηθεί σαν μια φυσική διεργασία, σαν ένα UNIT OPERATION, που ανήκει στην κατηγορία των διεργασιών ροής ρευστών δια μέσου ενός μέσου (στην περίπτωση μας είναι η ημιπερατή μεμβράνη) όπου η δρώσα δύναμη ως γνωστόν είναι μια διαφορά πίεσεως.

Πράγματι, στην αντίστροφη ώσμωση δρώσα δύναμη είναι η διαφορά μεταξύ της επιβαλλόμενης εξωτερικής πίεσεως και της οσμωτικής πίεσεως της αρχικής παροχής του νερού του οποίου πρόκειται να απομακρύνουμε τα διαλυμένα συστατικά.

Εφαρμόζοντας τη θεμελιώδη αρχή της κινητικής των διεργασιών:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{\Delta F}{R} \quad (1)$$

όπου:

G: η διακινούμενη ποσότητα

$\Delta F$ : η ωθούσα δύναμη,

$t$ : ο χρόνος και

R: η αντίσταση

Παίρνουμε την ακόλουθη μορφή για αντίστροφη ώσμωση:

$$Q_w = \frac{\Delta P - \Delta \pi}{R_w} \quad (2)$$

όπου:

$Q_w$  η ροή του νερού μέσω της μεμβράνης

$\Delta P$  η εφαρμοζόμενη διαφορική πίεση

$\Delta \pi$  η διαφορική ωσμωτική πίεση και

$R_w$  η αντίσταση

Η εξίσωση αυτή συγκρίνεται τώρα με την σχέση που βρέθηκε πειραματικά ότι ισχύει για αντίστροφη ώσμωση:

$$F_{H_2O} = \frac{K_w \cdot (\Delta P - \Delta \pi) \cdot A}{d} \quad (3)$$

όπου:

$K_w$ : συντελεστής διαπερατότητας του νερού μέσω της μεμβράνης.

Παρατηρούμε δηλαδή ότι αντίσταση στο φαινόμενο της αντίστροφης ώσμωσης είναι ανάλογη του πάχους της μεμβράνης ( $d$ ) και αντιστρόφως

ανάλογη προς την επιφάνεια της μεμβράνης (A). Τα συμπεράσματα αυτά τα παίρνουμε υπ'οψη μας στο πρόβλημα του σχεδιασμού της μεμβράνης όπου για να υπερνικήσουμε την αντίσταση στο φαινόμενο προσπαθούμε να πετύχουμε μεμβράνη μεγαλύτερης δυνατής επιφάνειας και ταυτόχρονα μικρότερου δυνατού πάχους.

Ας δούμε τώρα τη ροή των διαλυμένων αλάτων μέσω της μεμβράνης.

Η ροή αυτή είναι ένα φαινόμενο μεταφοράς μάζας διαμέσου ενός μέσου (στην περίπτωση μας πάλι της μεμβράνης και μπορεί να περιγραφεί επίσης από την σχέση) όπου τώρα τον ρόλο της ωθούσας δύναμης παίζει η διαφορά συγκεντρώσεων του διαλυτού μέσου πριν και μετά την ημιπερατή μεμβράνη.

$$F_{SALT} = \frac{K_s \cdot \Delta c \cdot S}{d} \quad (5)$$

όπου:

$F_{salt}$  η ροή του άλατος

$K_s$  ο συντελεστής διαπερατότητας μέσω της μεμβράνης για τα άλατα

$\Delta c$  η διαφορά συγκεντρώσεων

Η αντίσταση  $R_s$  προκύπτει και εδώ ανάλογη του πάχους  $d$  και αντιστρόφως ανάλογη προς την επιφάνεια  $S$  της μεμβράνης

$$R_s = \frac{d}{K_s \cdot A} \quad (6)$$

Συγκρίνοντας τις εξισώσεις (4) και (6) βρίσκουμε ότι:

$$\frac{R_w}{R_s} = \frac{K_s}{K_w} \quad (7)$$

κι αυτό δείχνει ότι η επιλογή της μεμβράνης πρέπει να γίνει με τέτοιον τρόπο ώστε  $K_s$  να είναι κατά το δυνατόν ελάχιστο, το δε  $K_w$  κατά το δυνατό μέγιστο.

Έτσι, θα έχουμε την μικρότερη αντίσταση του νερού στο πέρασμα του μέσω της μεμβράνης και αντίστοιχα τη μεγαλύτερη αντίσταση στο πέρασμα των διαλυμένων ουσιών μέσω της μεμβράνης.

Για την πληρέστερη κατανόηση του φαινομένου πρέπει να εξετάσουμε ακόμη δύο όρους την «μετατροπή» και το «πέραςμα» του άλατος. Η μετατροπή ή η ανάκτηση όπως μερικές φορές αποκαλείται ορίζεται σαν:

$$Y = \frac{\Omega_p}{\Omega F} \times 100 \quad (8)$$

όπου:

$Y$  η μετατροπή επί τοις εκατό (%)

$\Omega_p$  η ροή του καθαρού νερού του προϊόντος δηλαδή,

ή του περάσματος όπως επίσης αποκαλείται, και

$\Omega F$  η ροή του νερού τροφοδοσίας.

Αυτή η εξίσωση σημαίνει ότι αν π.χ δουλεύουμε με μετατροπή 75% από 100 λίτρα τροφοδοσίας θα πάρουμε 75 λίτρα καθαρού νερού και 25 λίτρα παραπροϊόντος δηλαδή του συμπυκνώματος που περιέχει τα διαλυμένα στερεά.

Προφανώς είναι επιθυμητή μια υψηλή μετατροπή καθ'όσον οι απώλειες νερού είναι μικρότερες και το κόστος της αντλίας επίσης μικρότερο.

Τα περισσότερα συστήματα αντιστρόφου οσμώσεως λειτουργούν σε μια περιοχή μετατροπής 75-80%. Μερικές φορές όμως επιβάλλεται μια χαμηλή μετατροπή γιατί αλλιώς λόγω μεγάλου γινομένου διαλυτότητας υπάρχει κίνδυνος καταβυθίσεως ορισμένων στερεών.

Σε αυτές τις περιπτώσεις η μετατροπή μπορεί να φθάσει μέχρι 40-50%.

Το πέρασμα του άλατος δίνεται από τη σχέση:

$$SP = (C_p / C_r) \times 100 \quad (9)$$

Όπου:

SP= πέρασμα άλατος επί τοις εκατό (%)

C<sub>p</sub>= η συγκέντρωση άλατος (σε TDS ή σε PPM οποιουδήποτε ιόντος στο προϊόν

C<sub>r</sub>= η συγκέντρωση άλατος στο ρεύμα τροφοδοσίας

Ενδιαφέρει βέβαια το πέρασμα του άλατος να είναι όσο γίνεται μικρό για να έχουμε το καθαρότερο δυνατό προϊόν. Το πέρασμα του άλατος μεγαλώνει όσο μικραίνει η πίεση τροφοδοσίας του νερού κι αυτό διότι η ροή του νερού μέσω της μεμβράνης επίσης μικραίνει (εξίσωση 2) προκαλώντας μικρότερη αραιώση στο διάλυμα που έχει περάσει την μεμβράνη.

Το πέρασμα του άλατος επίσης επιβάλλει και μια Optimum τιμή για την μετατροπή.

Πράγματι έχει βρεθεί ότι για τιμές της μετατροπής από 75% και πάνω αρχίζει και αυξάνει αισθητά το πέρασμα του άλατος. Τούτο οφείλεται στο ότι όσο η μετατροπή είναι πολύ υψηλή, τόσο πιο πυκνό είναι το διάλυμα πριν από την μεμβράνη κι αυτό έχει σαν συνέπεια να αυξάνει η



ωσμωτική πίεση αυτού του διαλύματος, η οποία μειώνει τη δρώσα δύναμη του φαινομένου (εξίσωση 2).

### **3.4 ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ**

Το κύριο πλεονέκτημα των μεθόδων αφαλάτωσης που χρησιμοποιούν μεμβράνες είναι το μικρό ενεργειακό κόστος.

Ο παρακάτω πίνακας δίνει την κατανάλωση ενέργειας ανά παραγόμενο κυβικό μέτρο νερό σε μεθόδους αφαλάτωσης.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ Kwh/m <sup>3</sup>
Απόσταξη σε πολλαπλές βαθμίδες M.E.D	23
Απόσταξη με συμπίεση ατμού V.C	14
Διαχωρισμός με ψύξη	11
Μέθοδος M.S.F	10
Ηλεκτροδιαπίδυση θαλασσινού νερού E.D	17
Αντίστροφη ώσμωση θαλασσινού νερού A.Q	9
Αντίστροφη ώσμωση A.Q θαλασσινού νερού με ανάκτηση ενέργειας	6
Ηλεκτροδιαπίδυση υφαλμυρού νερού 5.000ppm	9
Ηλεκτροδιαπίδυση υφαλμυρού νερού 3.600ppm	5
Ηλεκτροδιαπίδυση υφαλμυρού νερού 1.800ppm	2
Αντίστροφη ώσμωση υφαλμυρού νερού 6.000ppm	3
Αντίστροφη ώσμωση υφαλμυρού νερού 2.000-5.000ppm	2

Όπως φαίνεται από τον πίνακα η αντίστροφη ώσμωση πλεονεκτεί σημαντικά από άποψη ενεργειακής κατανάλωσης όλων των άλλων μεθόδων. Μόνο η ηλεκτροδιαπίδυση για υφαλμυρό νερό 2.000 ppm είναι ανταγωνιστική της αντίστροφης ώσμωσης.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **ΜΟΝΑΔΕΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ- (ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ) – ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ**

#### **4.1 Έδη μεμβρανών- υλικό κατασκευής.**

Στις εφαρμογές αντίστροφης ώσμωσης εφαρμόζονται κυρίως μεμβράνες οξικής κυτταρίνης (Ο.Κ), αρωματικά πολυαμίδια (NYLON), ή πολυσουλφόνες. Από αυτές οι περισσότερες χρησιμοποιούμενες μεμβράνες είναι οξικής κυτταρίνης. Αποτελούνται από ένα λεπτό πυκνό, μικροπορώδες επιφανειακό στρώμα, την επιδερμίδα πάχους 0,25μm, και πόρων που στηρίζεται σε μακροπορώδες υπόστρωμα πάχους 99.75μm.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεμβράνης οξικής κυτταρίνης είναι:

- α) Καλή εκλεκτικότητα
- β) Η χημική σύνθεση που επιδέχεται μεταβολές
- γ) Η διαθεσιμότητα πρώτων υλών στο εμπόριο και
- δ) Το χαμηλό κόστος (σε σύγκριση με το κόστος άλλων μεμβρανών).

Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι ο ρυθμός ροής του παραγόμενου καθαρού νερού μέσα από την ανισοτροπική μεμβράνη οξικής κυτταρίνης ελαττώνεται με το χρόνο για σταθερή πίεση λειτουργίας, ιδίως στις υψηλές πιέσεις.

Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται σαν συμπίεση της μεμβράνης.

Κατά την χρησιμοποίηση των μεμβρανών οξικής κυτταρίνης παρατηρείται μερικές φορές αύξηση της ροής του καθαρού νερού και ελάττωση της απόρριψης αλάτων με την πάροδο του χρόνου. Έχει

αποδειχθεί ότι το γεγονός αυτό συνδέεται και με την υδρόλυση της οξικής κυτταρίνης που το γεγονός είναι ασταθές στο νερό, όπου υδρολύεται μερικώς προς οξικό οξύ και λιγότερο προς υποκατεστημένη οξική κυτταρίνη. Η ταχύτητα υδρόλυσης ελαχιστοποιείται για  $\text{PH}=4,5 \div 5$  και επομένως θα αυξάνει η διάρκεια ζωής των μεμβρανών με ρύθμιση του  $\text{PH}$  μέσα σ'αυτά τα όρια.

Η διάρκεια ζωής είναι συνάρτηση κυρίως της σύνθεσης του νερού τροφοδοσίας και του υλικού κατασκευής της μεμβράνης. Οι μεμβράνες οξικής κυτταρίνης, παρά την καλή λειτουργικότητα τους είναι ευπαθείς στη συμπίεση, την υδρόλυση και τα βακτηρίδια, έτσι η διάρκεια ζωής τους κυμαίνεται από ένα έως δύο χρόνια.

Οι μεμβράνες των πολυαμιδίων είναι πιο ανθεκτικές και παρουσιάζουν μια διάρκεια ζωής τριών έως πέντε χρόνων.

#### **4.2 ΤΥΠΟΙ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ**

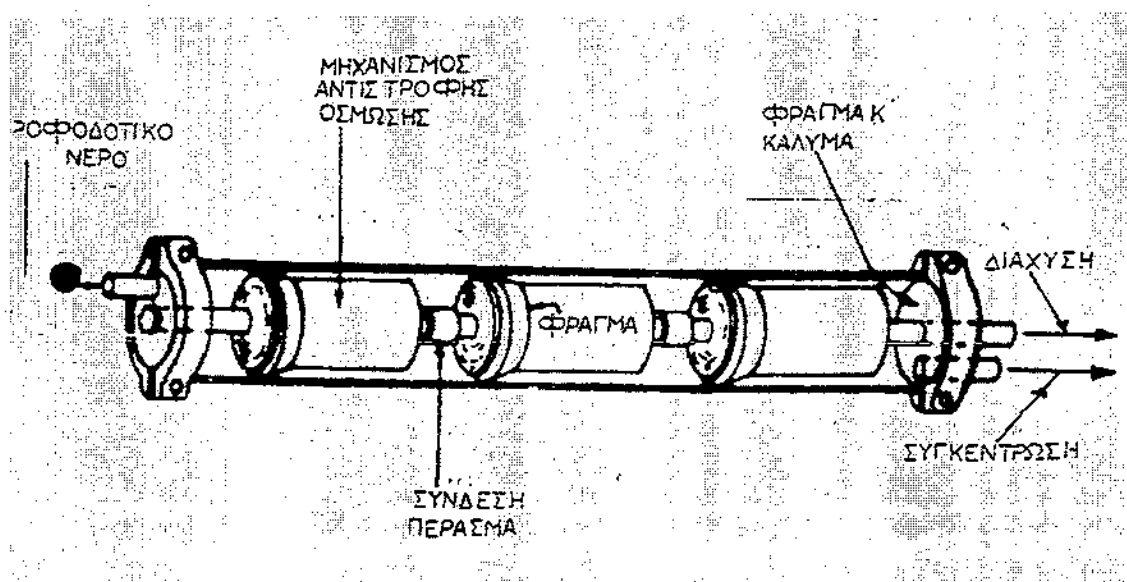
Με βάση τη δόμηση και τη στήριξη των μεμβρανών μπορούμε να διακρίνουμε τους παρακάτω τύπους μεμβρανών που χρησιμοποιούνται σαν μονάδες διαχωρισμού σε εγκαταστάσεις αντίστροφης όσμωσης. Οι τύποι αυτοί είναι:

1. Τύπος σπειροειδών περιβλημάτων
2. Σωληνωτός τύπος
3. Τύπος κοίλων ινών ή τριχοειδών σωλήνων
4. Επίπεδος τύπος

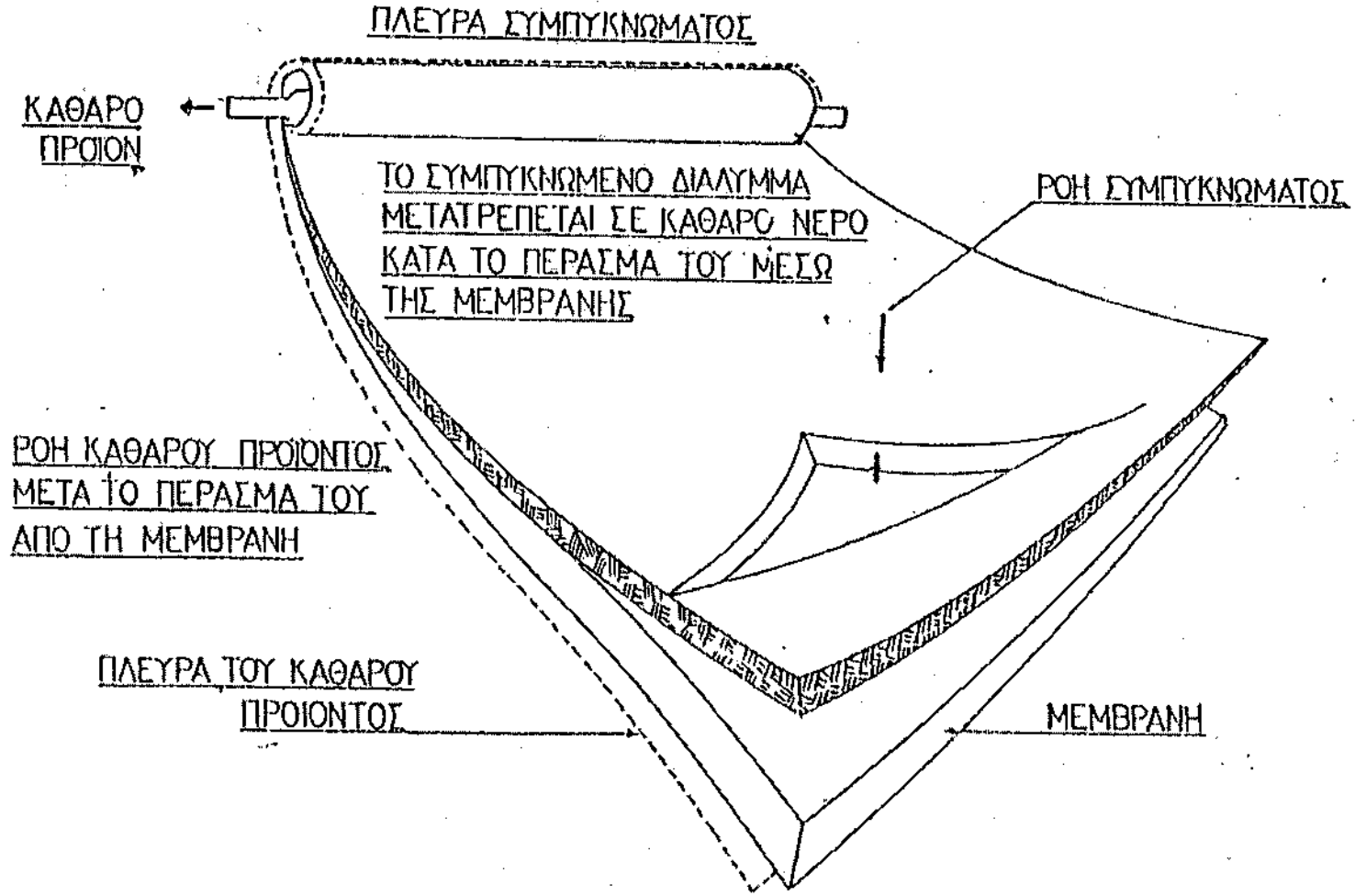
Παρακάτω θα αναλύσουμε όσο μπορούμε τους τύπους των μονάδων διαχωρισμού (μεμβράνες).

#### 4.2.1 ΤΥΠΟΣ ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΩΝ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑΤΩΝ

Στον τύπο σπειροειδών περιβλημάτων δύο μεμβράνες τοποθετούνται σε επαφή με ένα πορώδες εύκαμπτο υλικό στήριξης και το «σάντουιτς» αυτό τυλίγεται γύρω από ένα διάτρητο σωλήνα, μαζί με ένα διαχωριστικό υλικό που χρησιμεύει για το διαχωρισμό των δύο μεμβρανών όταν είναι τυλιγμένες γύρω από το διάτρητο σωλήνα. Το νερό τροφοδοσίας ρέει διαμέσου της διόδου που έχει προβλεφθεί στο διαχωριστικό υλικό, ενώ το παραγόμενο καθαρό νερό ρέει σπειροειδώς προς το διάτρητο σωλήνα. Το υλικό κατασκευής της μεμβράνης είναι οξική κυτταρίνη. Βλέπε στο σχήμα 20 και 21.



Σχήμα 20: Μεμβράνες σπειροειδούς διάταξης.



Σχήμα 21: Τύπος σπειροειδούς διατάξεως.

#### **4.2.2 ΣΩΛΗΝΩΤΟΣ ΤΥΠΟΣ**

Στο σωληνωτό τύπο οι μεμβράνες τοποθετούνται μέσα σε διάτρητους μεταλλικούς σωλήνες ή σε πορώδεις σωλήνες στήριξης από FIBREGLASS, ο οποίος είναι τέτοιας κατασκευής ώστε να αντιστέκεται στην εφαρμοζόμενη πίεση λειτουργίας. Το νερό προς καθαρισμό τροφοδοτείται υπό πίεση στο ένα άκρο του σωλήνα. Η διάμετρος του σωλήνα είναι (0,5 + 1 INCH). Το καθαρό νερό περνάει από τη μεμβράνη και συλλέγεται στο εξωτερικό μέρος του σωλήνα. Το απορριπτέο συμπύκνωμα βγαίνει από το άλλο μέρος του σωλήνα. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιεί σαν υλικό κατασκευής της μεμβράνης την οξική κυτταρίνη και έχει τα εξής χαρακτηριστικά γνωρίσματα:

##### **Πλεονεκτήματα:**

Ρυπαίνεται πιο δύσκολα,

Καθαρίζεται πιο εύκολα και μάλιστα με μηχανικά μέσα

##### **Μειονεκτήματα:**

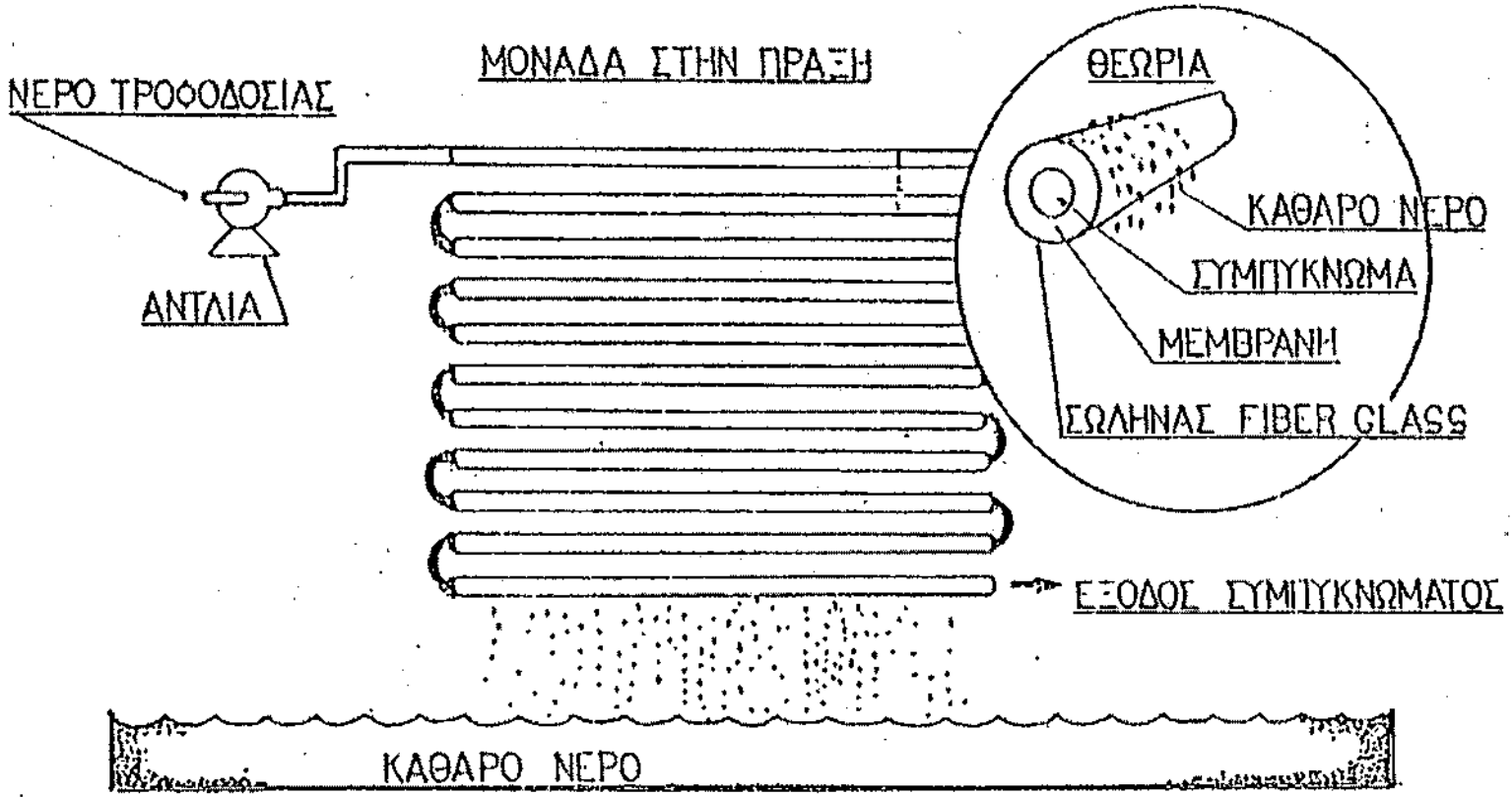
Είναι λιγότερο συμπαγής διάταξη,

Έχει τις μικρότερες ανοχές θερμοκρασίας και ΡΗ.

Οι περιοχές λειτουργίας της είναι:

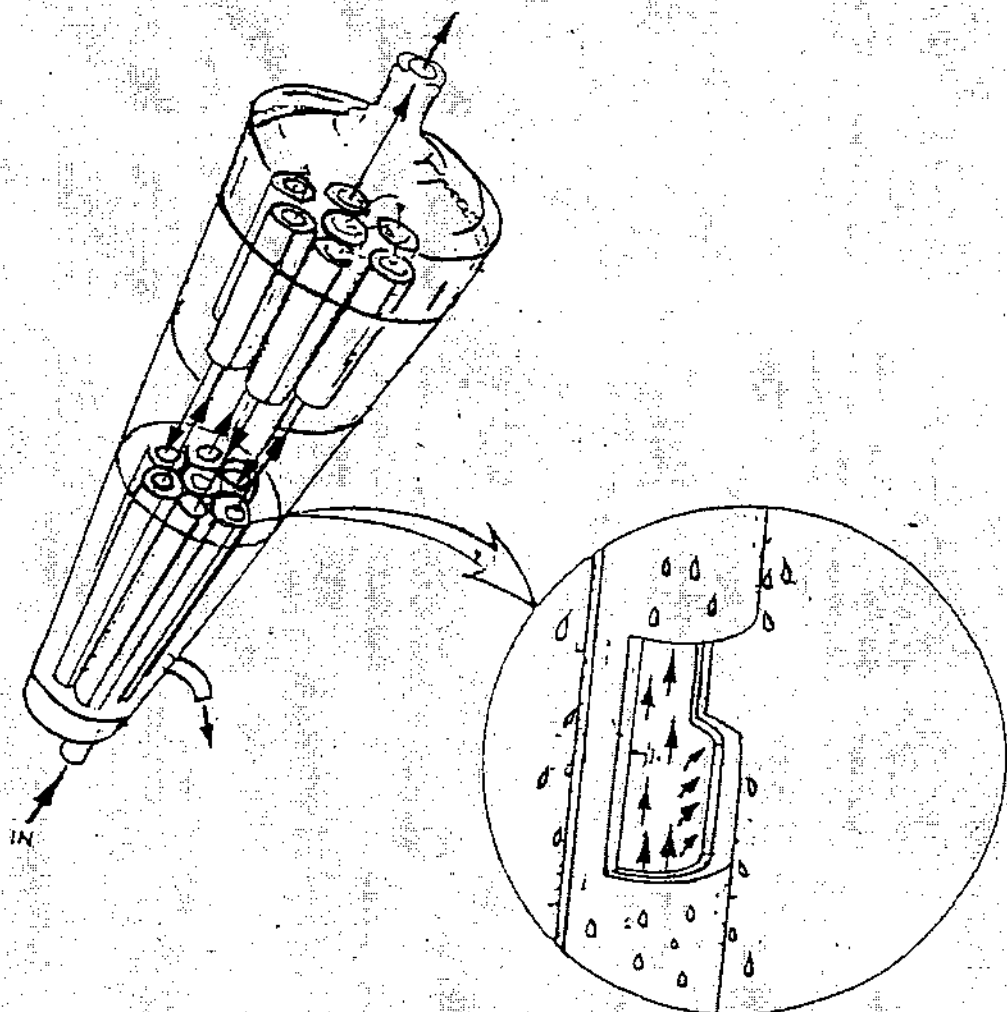
ΡΗ 2 ÷ 8 μέχρι 15°C και ΡΗ 3 ÷ 6 μέχρι 30°C

Βλέπε στα σχήματα 22,23.



Σχήμα 22: Μονάδα αντιστροφού οσμώσεως με μεμβράνη Σοληνωειδούς Διάταξης





Σχήμα 23: Σωληνωτός τύπος

#### 4.2.3 ΤΥΠΟΣ ΚΟΙΛΩΝ ΙΝΩΝ Η ΤΡΙΧΟΕΙΔΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

Αποτελεί την πιο συμπαγή διάταξη από όλες, χρησιμοποιώντας ίνες εσωτερικής διαμέτρου 42 μικρών και εξωτερικής διαμέτρου 85 μικρών. Σε ένα σωλήνα 4 ιντσών περιέχονται ένα εκατομμύριο τέτοιες ίνες, πολλαπλασιάζοντας την ανά μονάδα όγκου της συσκευής, την επιφάνεια

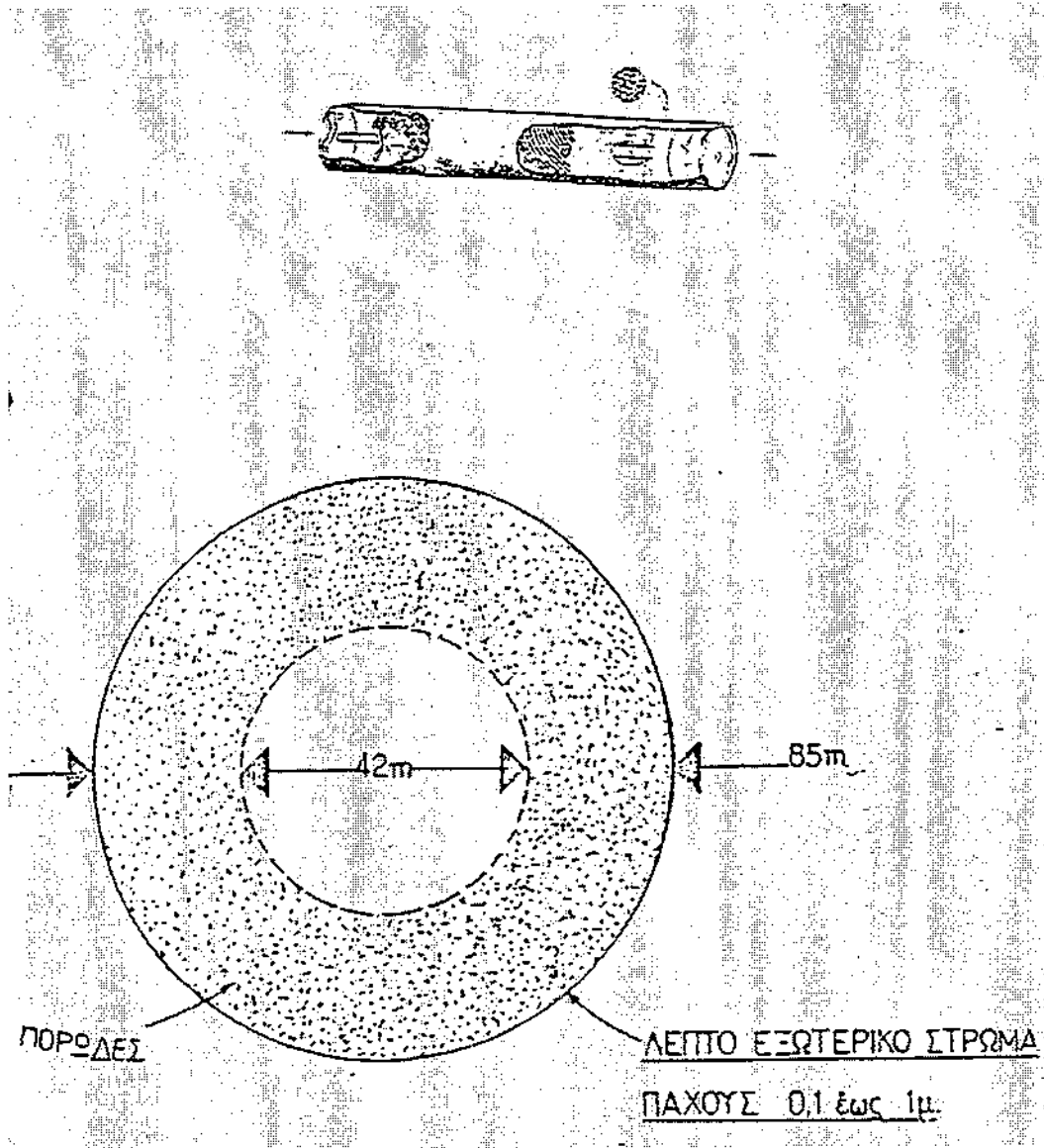
της μεμβράνης, κατά 50 φορές σε σχέση με σωληνοειδή διάταξη και κατά 15 περίπου φορές σε σχέση με την σπειροειδή διάταξη.

Το υλικό κατασκευής των ινών είναι πολυαμίδια η δε φύση τους είναι ασύμμετρη με την έννοια ότι στην εξωτερική επιφάνεια έχουν ένα λεπτό ανθεκτικό στρώμα πάχους μόλις ενός μικρού που εμποδίζει το πέρασμα των αλάτων ενώ εύκολα επιτρέπει το πέρασμα των μορίων του νερού, κάτω δε από αυτό το στρώμα υπάρχει ένα παχύτερο πορώδες στρώμα για την στήριξη του εξωτερικού στρώματος.

Λόγω του πορώδους το νερό περνάει προς την εσωτερική οπή της ίνας. Πολλές τέτοιες ίνες μαζί αποτελούν το υλικό πληρώσεως του σωλήνα της συσκευής από ένα σημείο του οποίου τροφοδοτείται το νερό. Από το ένα άκρο βγαίνει το καθαρό προϊόν (το πόσιμο νερό) και από το άλλο άκρο το απορριπτόμενο συμπύκνωμα.

Η συσκευή αντιστρόφου ωσμώσεως δια πορώδων ινών προσομοιάζει προς ένα εναλλάκτη θερμότητας αν κανείς φανταστεί τις πορώδεις ίνες σαν σωληνώσεις του εναλλάκτη και τη ροή του νερού τροφοδοσίας σαν ροή στο εξωτερικού μέρος των σωληνώσεων (κέλυφος).

Το καθαρό προϊόν κάτω από την υψηλή πίεση λειτουργίας, περνάει τα τοιχώματα των σωληνώσεων και ρέει μέσα στους σωλήνες προς την μια έξοδο ενώ το απορριπτόμενο προϊόν ρέει μέσω του κελύφους προς την άλλη έξοδο δια μιας ειδικής διαμορφώσεως των σωληνώσεων στο σημείο αυτό. Βλέπε στα σχήματα 24 και 25.



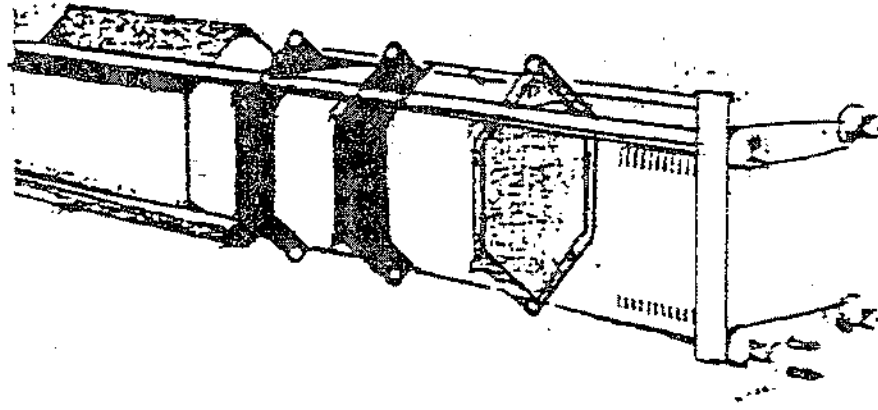
Σχήμα 24, 25: Τύποι κοίλων ινών ή τριχωειδών σωλήνων

Ασύμμετρη πορώδης ίνα.

#### 4.2.4 ΕΠΙΠΕΔΟΣ ΤΥΠΟΣ

Ο τύπος αυτός αποτελείται από ένα σύνολο πορώδων ή διάτρητων πλαισίων που βρίσκονται σε μικρή απόσταση το ένα με το άλλο και χρησιμεύουν για την στήριξη των μεμβρανών, που τοποθετούνται και από τις δύο πλευρές κάθε πλαισίου. Το τροφοδοτικό νερό ρέει στο χώρο μεταξύ δύο μεμβρανών, από όπου το καθαρό νερό διέρχεται διαμέσου

των μεμβρανών και συλλέγεται διαμέσου των ειδικών ανοιγμάτων που έχουν τα πλαίσια.



*Σχήμα 26: Επίπεδος τύπος*

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΡΟΗ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΜΙΑΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΚΑΙ ΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ Σ'ΑΥΤΗ**

#### **5.1 ΡΟΗ ΤΟΥ ΚΑΘΑΡΟΥ ΝΕΡΟΥ (ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ)**

Οι παράμετροι για τον χαρακτηρισμό μιας μεμβράνης είναι:

1) Η παροχή του παραγόμενου καθαρού νερού ανά μονάδα επιφάνειάς της, και

2) Η ποιότητα του καθαρού νερού που εξαρτάται από την εκλεκτικότητα της μεμβράνης και τις ατέλειές της.

Η παραγωγή μετράται από την ροή του καθαρού νερού, προσδιοριζόμενη σαν το ποσό του προϊόντος που ανακτά ανά ημέρα από την μονάδα επιφάνειάς της μεμβράνης. Οι αγγλικές μονάδες (GAL/DAY/SQ.FT) χρησιμοποιούνται στο πεδίο εργασίας ενώ οι μετρικές μονάδες (G/sec/SQ.cm) χρησιμοποιούνται στο εργαστήριο.

Η ροή δια μέσου μιας συγκεκριμένης μεμβράνης προσδιορίζεται από τα φυσικά της χαρακτηριστικά (π.χ. πάχος, χημική σύσταση, πορώδες), και από τις συνθήκες του συστήματος (π.χ. θερμοκρασία, πίεση, συγκέντρωση άλατος των διαλυμάτων που έρχονται σε επαφή με την μεμβράνη, και ταχύτητα του διαλύματος τροφοδοσίας), βλ. εξίσωση (3).

Στην πράξη, οι ιδιότητες της μεμβράνης και των διαλυμάτων είναι σχετικά σταθερές και απλοποιώντας την εξίσωση (3) μπορεί να θεωρηθεί μια απλή συνάρτηση της πίεσης. Ποσοστιαία περιγράφεται από την εξίσωση:

$$FH_2O = A \cdot (\Delta P - \Delta \Pi) = A \cdot (P_p - P_p) - (\Pi_p - \Pi_p) \quad (10)$$

Όπου:

$P_p$  = πίεση του αλμυρού νερού τροφοδοσίας

$\Pi_p$  = ωσμωτική πίεση του αλμυρού νερού τροφοδοσίας

$P_p$  = πίεση του παραγόμενου καθαρού νερού

$\Pi_p$  = ωσμωτική πίεση του παραγόμενου καθαρού νερού

Περιλαμβάνει τις φυσικές μεταβλητές της μεμβράνης και είναι ανεξάρτητος της διαλυμένης ουσίας

$\Delta P = (P_F - P_p)$ : η πίεση εξασκούμενη στο διάλυμα τροφοδοσίας  $P$  μείον την πίεση του προϊόντος  $P_p$

$\Delta \Pi = (\Pi_p - \Pi_p)$ : ωσμωτική πίεση του διαλύματος τροφοδοσίας  $\Pi$  μείον την οσμωτική πίεση του προϊόντος  $\Pi_p$ .

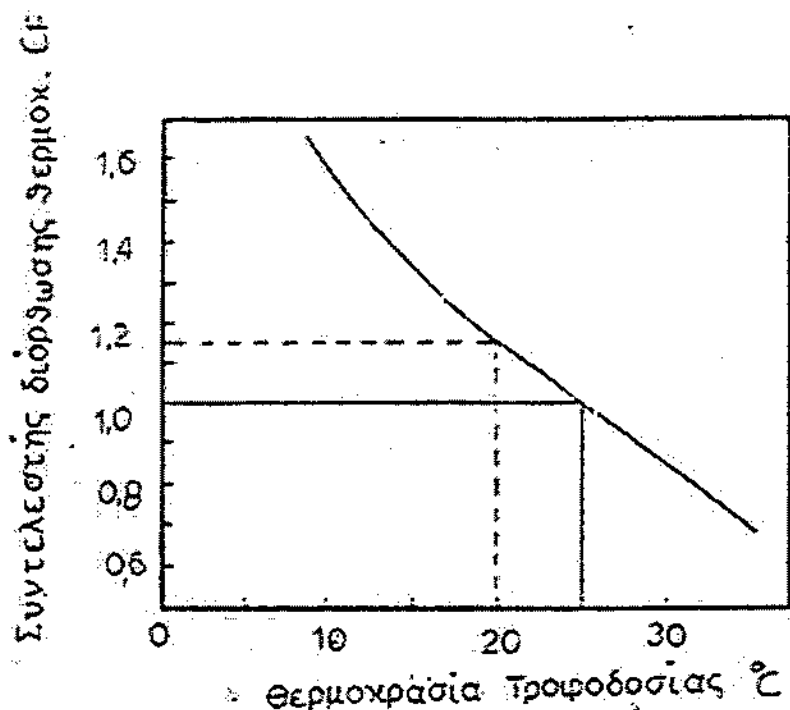
Η εξίσωση (10) μπορεί να απλοποιηθεί για υψηλές πιέσεις, γύρω στα 600 PSI (40 ATM), αθροίζοντας όλες τις σταθερές, και συσσωματώνοντάστες μέσα στον καινούργιο συντελεστή  $A'$ . Τότε, η ροή για υφάλμυρο νερό τροφοδοσίας, σε σταθερή θερμοκρασία δίνεται με προσέγγιση από την σχέση:

$$F_{H_2O} = A (P_{feed}) \quad (11)$$

## **5.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΤΗ ΡΟΗ**

Η ροή επηρεάζεται επίσης από τη θερμοκρασία διαλύματος τροφοδοσίας. Η περατότητα της μεμβράνης σε νερό αυξάνει περίπου 1,5% ανά °F. Η ροή μιας μεμβράνης δίνεται συνήθως από τον κατασκευαστή στους 77 °F. Για τις άλλες θερμοκρασίες εφαρμόζεται ένας συντελεστής διόρθωσης. Η διόρθωση μπορεί να εξαχθεί και

θεωρητικά βάσει των τιμών διαχυτότητας και ιξώδους, αλλά οι πειραματικά προσδιοριζόμενες διορθώσεις είναι πιο αξιόπιστες.



Σχήμα 27: Διάγραμμα θερμοκρασίας - συντελεστή διόρθωσης θερμοκρασίας.

Ο παράγοντας διόρθωσης είναι ένας πολλαπλασιαστής που για τις χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας λαμβάνεται από μια καμπύλη σαν την καμπύλη θερμοκρασίας συντελεστή διόρθωσης του σχήματος 28. Αυτή η καμπύλη έχει εξαχθεί από την GULF ENVIRONMENTAL SYSTEMS Co, για τις τροποποιημένες μεμβράνες οξικής κυτταρίνης (O.K).

Η εφαρμογή των δεδομένων δείχνεται στον ακόλουθο υπολογισμό επιφάνειας μεμβράνης: Είναι επιθυμητό να εξειδικεύσουμε την επιφάνεια μιας μεμβράνης για ένα σύστημα αντίστροφης ώσμωσης 100.000 GAL/DAY, για την κατεργασία υφαλμυρού νερού. Γνωρίζουμε

ότι η χαμηλότερη αναμενόμενη θερμοκρασία νερού τροφοδοσίας είναι (20°C).

Η εκλεγείσα μεμβράνη οξικής κυτταρίνης γι' αυτό το σύστημα αναμένεται να έχει μια κατά μέσο όρο ροή 15 GAL/DAY/SQ FT για 600 PSI (40 ATM και 25°C). Η επιθυμούμενη επιφάνεια μεμβράνης είναι:

Επιφάνεια μεμβράνης για ροή στους 25°C είναι:

$$\frac{\text{παραγωγή..νερού..GAL / DAY}}{\text{ροή..νερού..GAL / DAY / SQ.FT}} = \frac{100.000}{15} = 6.667 \text{ SQ.FT}$$

Ο παράγοντας διόρθωσης  $C_p$  για τροφοδοσία 20 °C προσδιορίζεται από το σχήμα 27 και είναι  $C_p=1.15$ . Τότε θα έχουμε:

Επιφάνεια για ροή στους 20°C= επιφάνεια στους 25°Cx $C$

$$= 6.667 \times 1.15 = 7.667 \text{ SQ.FT}$$

### **5.3 ΡΥΠΑΝΣΗ ΑΙΤΙΑ ΚΑΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ**

Η ρύπανση των μεμβρανών, που έχει σαν αποτέλεσμα την προοδευτική ελάττωση της ροής, προκαλείται όταν ξένα υλικά καλύπτουν την επιφάνεια των μεμβρανών και παρεμβάλλονται στην εσωτερική κίνηση των μορίων του νερού δια μέσου της μεμβράνης. Τα υλικά συσσωρεύονται, γιατί μόνο ουσίες που σχηματίζουν δεσμούς υδρογόνου (π.χ. νερό, αμωνία) μπορούν να περάσουν δια μέσου των εκλεκτικών πόρων της μεμβράνης. Οι ουσίες που δεν σχηματίζουν δεσμούς υδρογόνου, αποτίθενται στην υγρή οριακή στοιβάδα.

Η σύνθεση των αποθέσεων στην οριακή στοιβάδα αντανακλά τη σύνθεση της τροφοδοσίας. Όπως αναμένεται τα πιο συχνά απαντώμενα συστατικά είναι το  $\text{CaCO}_3$  και το  $\text{CaSO}_4$  υδροξείδια του Fe, πυριτικά άλατα του Al, διάφορες ειδικές αποθέσεις και βιολογικές ουσίες.



Βλέπε τις φωτογραφίες στις επόμενες σελίδες

Τα περισσότερα από αυτά μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με προκατεργασία της τροφοδοσίας ώστε να δεσμευτούν τα ιόντα και να ρυθμιστεί η καταλληλότερη για αποφυγή αποθέσεων τιμή του ΡΗ. Έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης χαμηλές συγκεντρώσεις Cl<sub>2</sub> στην τροφοδοσία, για να προληφθούν οι οργανικές αποθέσεις στις μεμβράνες οξικής κυτταρίνης με σχετικά καλά αποτελέσματα.

Δυστυχώς, οσοδήποτε καλή και αν είναι η προκατεργασία της τροφοδοσίας η ρύπανση πάντα συμβαίνει. Η συνηθισμένη πορεία καθαρισμού είναι να εκπλυθεί πρώτα η μεμβράνη με νερό τροφοδοσίας σε χαμηλότερες πιέσεις και με διπλάσια ή τριπλάσια ταχύτητα της κανονικής. Η τυρβώδης ροή του ρευστού συμπαρασύρει τις βρωμιές και τις απομακρύνει. Η απόπλυση με το νερό είναι ένα πρωταρχικό βήμα σε κάθε διεργασία καθαρισμού.



Κρύσταλλοι  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  πάνω στη μεμβράνη, 10min μετά την έναρξη του πειράματος. Μεγέθυνση x 140.



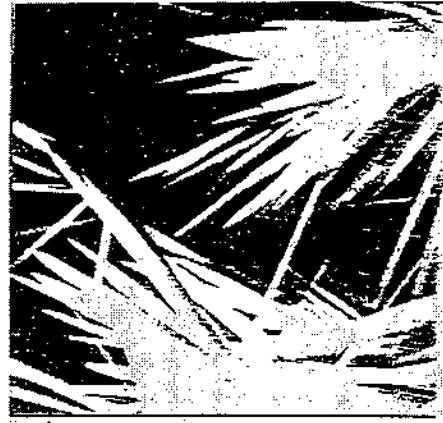
Κρύσταλλοι  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  πάνω στη μεμβράνη, 10min μετά την έναρξη του πειράματος. Μεγέθυνση x 350



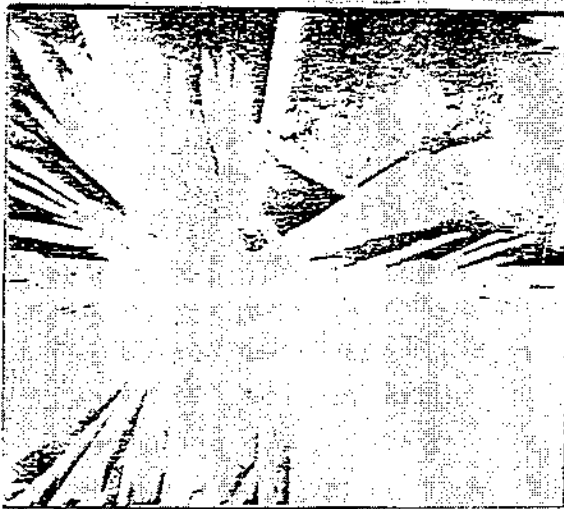
Κρύσταλλοι  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  πάνω στη μεμβράνη, 10 min μετά την έναρξη του πειράματος. Μεγέθυνση x 240



Φωτογραφία Κρύσταλλοι  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  πάνω στη μεμβράνη, 10 min μετά την έναρξη του πειράματος. Μεγέθυνση x 700



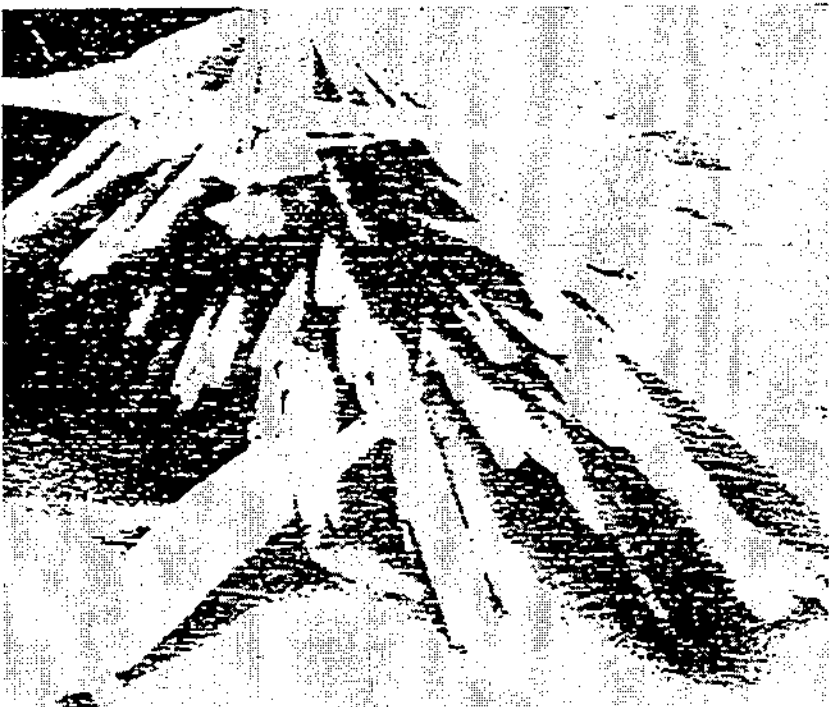
Φωτογραφία Κρύσταλλοι  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  πάνω στη μεμβράνη, 10 min μετά την έναρξη του πειράματος. Μεγέθυνση x 1200



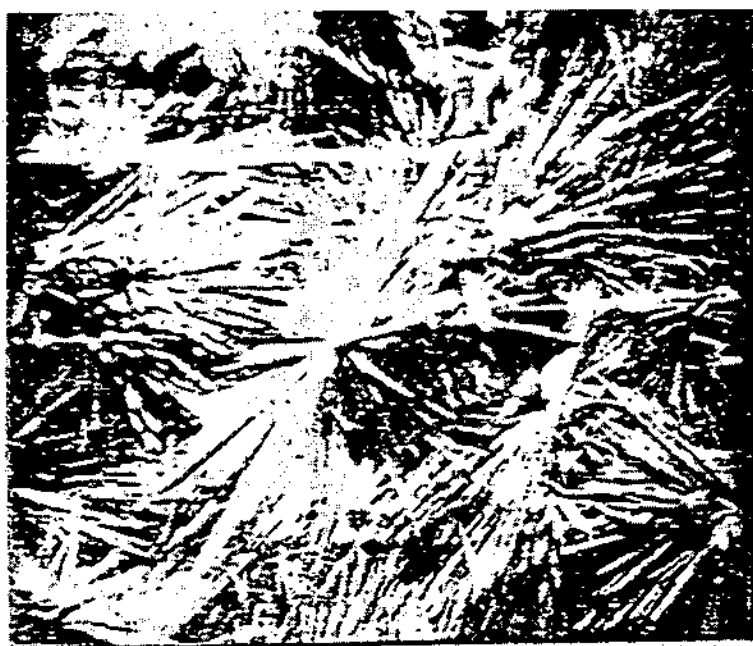
Φωτογραφία Κρύσταλλοι  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  πάνω στη μεμβράνη, 10 min μετά την έναρξη του πειράματος. Μεγέθυνση x 1200



Φωτογραφία Κρύσταλλοι  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  πάνω στη μεμβράνη, 10 min μετά την έναρξη του πειράματος. Οπτική γωνία  $45^\circ$  Μεγέθυνση x 1200



Κρύσταλλοι  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  πάνω στη μεμβράνη, 10 min μετά την έναρξη του πειράματος. Οπτική γωνία  $45^\circ$ . Μεγέθυνση x 2400



Φωτογραφία Αποθέσεις  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  σε μεμβράνη Α, Ω 30 min  
μετά την έναρξη του πειράματος. Μεγέθυνση x 1000



Φωτογραφία Τομή αποθέσεων  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  30 min μετά την  
έναρξη του πειράματος. Μεγέθυνση x 1000

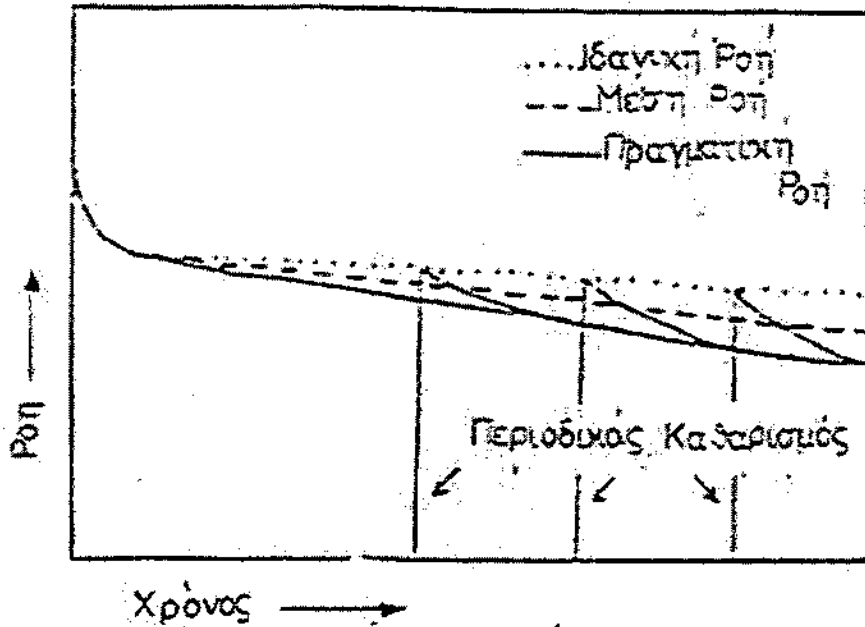


Φωτογραφία Τομή μεμβράνης Α.Ω. Στο πάνω μέρος της φωτογραφίας διακρίνεται η λεπτή ενεργός επιφάνεια της μεμβράνης και από κάτω το πορώδες υπόστρωμα. Μεγέθυνση x 600.

Αποθέσεις σκληρότητας (ανθρακικά και θειικά άλατα Ca και Mg) μπορούν μερικές φορές να αποκολληθούν με απλή εμπότιση των μεμβρανών σε αποσταγμένο νερό για αρκετό χρονικό διάστημα. Αλλά αυτό απαιτεί χρόνο, οπότε συνήθως γίνεται ανακύκλωση ενός θερμού διαλύματος 1-2% σε κιτρικό οξύ. Το οξύ διαλύει μεγάλα ποσά των μεταλλικών ιόντων και κρατώντας τα εν διαλύσει τα απομακρύνει.

Οι μικροβιολογικές αποθέσεις συμβαίνουν στα περισσότερα φυσικά νερά και είναι ένα ειδικό πρόβλημα στη δευτερογενή κατεργασία αποβλήτων. Συχνά αποκολλόνται με πλύσεις καθαριστικών ενζύμων. Οι οργανικές ρυπάνσεις σχεδόν πάντα σχηματίζονται και για να διατηρηθεί

η ροή σε ένα ψηλό επιθυμητό επίπεδο είναι απαραίτητοι περιοδικοί καθαρισμοί.



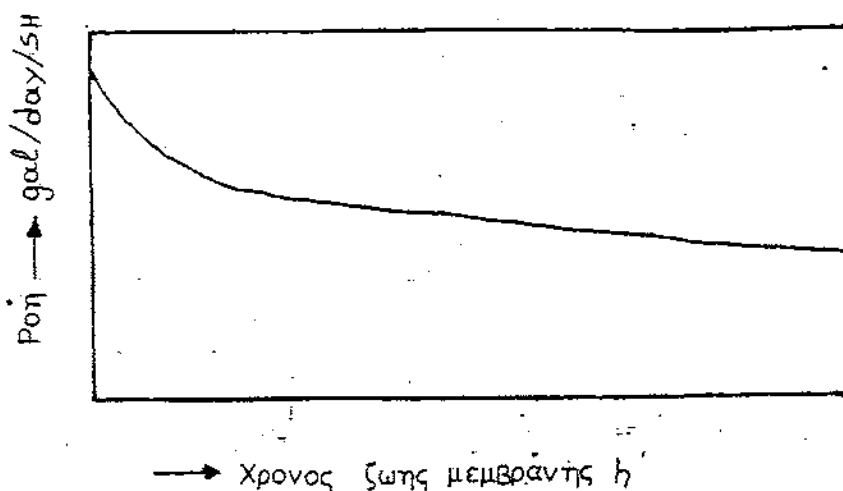
Σχήμα 28: Επίδραση του καθαρισμού μεμβράνης στη ροή.

Η αποβάθμιση της ροής εξ αιτίας της ρύπανσης είναι μια πρόσθετη απώλεια που επιπροστίθεται στις σταθερές απώλειες. Όπως φαίνεται στο σχήμα 28 η πραγματική καμπύλη ροής ακολουθεί μια φθίνουσα, πριονωτή γραμμή, όταν η μεμβράνη καθαρίζεται περιοδικά. Χωρίς καθαρισμό, η ροή θα ακολουθούσε τη χαμηλότερη καμπύλη, μια προέκταση της αρχικής ομαλής πτώσης. Η ροή μιας μεμβράνης που δεν ρυπαίνεται θεωρητικά ποτέ, δείχνεται στην ανώτερη γραμμή, η οποία είναι η καμπύλη της ιδανικής ροής που αγγίζει τις κορυφές της πριονωτής γραμμής.

### 5.4 Η ΡΟΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΤΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ

Αντίθετα με ότι συμβαίνει σε άλλες διεργασίες στις οποίες η παραγωγή βελτιώνεται μετά από μια προκαταρκτική περίοδο εξισορρόπησης, η έξοδος του νερού από ένα σύστημα αντίστροφης ώσμωσης αρχίζει να ελαττώνεται όσο η μεμβράνη συμπιέζεται και συνεχίζει να αποβαθμίζεται αργά κατά τη διάρκεια ζωής της μεμβράνης. Η απώλεια είναι αναντιστρεπτή, και αν απαιτείται περισσότερη ροή, η πίεση τροφοδοσίας πρέπει να αυξηθεί οπότε η παραγωγή περισσότερου νερού συμπιέζει επίσης τη μεμβράνη περαιτέρω και επιταχύνει τη μείωση της ροής.

Η αντιμετώπιση στην πράξη, είναι να κατασκευαστεί η επιφάνεια της μεμβράνης ελαφρώς μεγαλύτερη από τη θεωρητικά υπολογιζόμενη και να διατηρηθεί η πίεση λειτουργίας σταθερή, για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα καταφεύγοντας στην επιπρόσθετη πίεση μόνο προς το τέλος της ζωής της μεμβράνης.



Σχήμα 29: Διάγραμμα χρόνου ζωής μεμβράνης –ροής



Για να είναι χρήσιμο ένα σύστημα αφαλάτωσης, η παραγωγή του νερού πρέπει να είναι όσο το δυνατόν σταθερότερη. Μια γραφική παράσταση της ροής συναρτήσει του χρόνου σε μια ορισμένη πίεση δίνει μια καμπύλη με μια αρχική απότομη πτώση που ακολουθείται από μια αρχή προοδευτική ελάττωση (σχήμα 29).

Σε λογαριθμικές συντεταγμένες η καμπύλη γίνεται μια ευθεία γραμμή και παραμένει σχετικά σταθερή για ένα ή και δύο χρόνια. Εξ' αιτίας της σταθερής κλίσης, η ροή μπορεί να προϋπολογισθεί για όλη τη διάρκεια του χρόνου ζωής μιας μεμβράνης, αν είναι γνωστή η τιμή της αρχικής ροής. Οι κατασκευαστές δίνουν τις αρχικές τιμές μιας ροής και υπολογισμούς των κλίσεων των καμπυλών, σε διάφορες πιέσεις λειτουργίας.

Αυτές οι κλίσεις έχουν προσδιοριστεί πειραματικά για πολλά απλά διαλύματα αλάτων και μπορούν να χρησιμεύσουν σαν οδηγοί για άλλα.

Η αρχική ροή είναι η παραγωγή των πρώτων 24 ωρών, διαιρεμένη με την επιφάνεια της μεμβράνης της πειραματικής μονάδας. Η κλίση της καμπύλης υπολογίζεται ή προσδιορίζεται γραφικά από τιμές της ροής που παίρνονται σε χρονικά διαστήματα των 10, 100 ή 1000 ωρών. Ο ρυθμός πτώσης δίνεται σε κλίση μιας καμπύλης σε λογαριθμικές συντεταγμένες της ροής (σε GAL/DAY/SQ.FT) συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας σε ώρες Η. Η εξίσωση για την κλίση της καμπύλης ροής είναι:

$$m = \frac{\text{LOG}(F_i - F_x)}{\Theta_i - \Theta_x} \quad (12)$$

όπου:

$F_i$  = αρχική ροή σε GAL/DAY/SQ.FT

$F_x$  = ροή σε χρόνο  $x$  ώρες

$\Theta_i$  = χρόνος λειτουργίας σε  $x$  Hours (ώρες)

Τα χρονικά διαστήματα πολλαπλάσια του 10 συμφέρουν γιατί ο υπολογισμός απλοποιείται στον LOG της διαφοράς της ροής, εφ'όσον  $\text{LOG } 10 = 1.00$ . Έστω π.χ  $\Theta = 10 \text{ HR}$  και  $\Theta_x = 100 \text{ HR}$ .

Τότε η κλίση είναι:

$$m = \frac{\text{LOG}(F_i - F_x)}{(1.0 - 2.0)} = -\text{LOG}(F_i - F_x) \quad (13)$$

Ο προσδιορισμός της ροής καθ'ολη τη διάρκεια ζωής της μεμβράνης είναι βασικός στον σχεδιασμό του συστήματος αντίστροφης ώσμωσης, γιατί οι τιμές αυτές χρησιμεύουν για να οριστεί η απαιτούμενη επιφάνεια μεμβράνης για μια επιθυμούμενη δυναμικότητα.

Μια προσέγγιση σχεδιασμού είναι να ορισθεί η επιφάνεια της μεμβράνης από την τελική ή τη μικρότερη τιμή της ροής. Σ'αυτήν την περίπτωση, αν και το κόστος εγκατάστασης είναι ψηλότερο, χαμηλότερες τιμές της πίεσης λειτουργίας μειώνουν αισθητά το κόστος λειτουργίας.

Μια δεύτερη προσέγγιση είναι να ληφθεί η αρχική ροή σαν βάση σχεδιασμού. Έτσι, ελαχιστοποιείται η επιφάνεια της μεμβράνης και το κόστος εγκατάστασης, αλλά αυξάνεται το κόστος λειτουργίας γιατί οι πιέσεις θα πρέπει να αυξηθούν για να διατηρηθεί η παραγωγή. Αυτή είναι προτιμητέα εκλογή για εγκαταστάσεις διαλείποντος έργου και χαμηλών προδιαγραφών που το αρχικό κόστος πρέπει να ελαχιστοποιηθεί.

### 5.5 ΑΠΟΡΡΙΨΗ ΤΩΝ ΑΛΑΤΩΝ

Η ποιότητα του προϊόντος μετρείται με το ποσόν της εν διαλύσει ουσίας (άλατος) στο προϊόν. Αυτό εξαρτάται από την ελκικότητα της μεμβράνης και τις ατέλειες της θεωρητικά, το άλας που περνά δια μέσου μιας μεμβράνης (η ροή του άλατος) είναι μια συνάρτηση του συντελεστή περατότητας της μεμβράνης και της διαφοράς μεταξύ της συγκέντρωσης του άλατος στην τροφοδοσία και στο προϊόν.

Ο συντελεστής περατότητας βασίζεται στα φυσικά χαρακτηριστικά της μεμβράνης, όπως το πάχος, η διαχυτότητα του άλατος, και η κατανομή της διαλελυμένης ουσίας, βλέπε επίξωση (5).

Απλοποιώντας την εξίσωση (5) το ποσόν του άλατος που διέρχεται από την μονάδα επιφάνειας της μεμβράνης μπορεί να δοθεί από την σχέση:

$$F_{salt} = B \cdot (C_h - C_l) \quad (14)$$

όπου:

$F_{salt}$ = ροή άλατος  $G/cm^2 \cdot sec$

$B$ = συντελεστής περατότητας άλατος  $cm/sec$

$C_h$ = συγκέντρωση της εν διαλύσει ουσίας στην πλευρά υψηλής πίεσης της μεμβράνης (πλευρά συμπύκνωσης) σε  $G/cm^3$

$C_l$ = συγκέντρωση της εν διαλύσει ουσίας στην πλευρά χαμηλής πίεσης της μεμβράνης (πλευρά προϊόντος) σε  $G/cm^3$

Η σχέση (14) δείχνει ότι η διέλευση του άλατος είναι αποτέλεσμα της διαφοράς της συγκέντρωσης του άλατος στην μεμβράνη. Πιστεύεται ότι το περισσότερο άλας κινείται εξ αιτίας διάχυσης δια μέσου των ίδιων διόδων της μεμβράνης που κινείται και το νερό.

Από τη σχέση (14) φαίνεται ότι η κανονική ροή του άλατος (αντίθετα με τη ροή του νερού) είναι ανεξάρτητη της πίεσεως. Θεωρητικά αν η πίεση στο σύστημα αντίστροφης ώσμωσης αυξηθεί, το άλας θα διαχέεται σε ένα σταθερό ρυθμό, ενώ η ροή του νερού θα αυξηθεί. Το συνολικό αποτέλεσμα θα είναι μεγαλύτερη η παραγωγή καθαρότερου νερού.

Προσεχτική πειραματική δουλειά δείχνει ότι αυτές οι αρχές είναι σωστές, αλλά συχνά δεν είναι εμφανής η βελτίωση της ποιότητας του προϊόντος, γιατί οι ατέλειες της μεμβράνης αφήνουν να διαρεύσουν σημαντικά ποσά άλατος μέσα στο προϊόν.

Το μέτρο της εκλεκτικότητας της μεμβράνης είναι η απόρριψη του άλατος, που ορίζεται σαν ο λόγος του άλατος που απορρίπτεται από την μεμβράνη, προς το άλας της τροφοδοσίας. Είναι η πιο κοινή και απλή μέθοδος για να εκτιμηθεί η ικανότητα μιας μεμβράνης να διαχωρίσει το αλάτι, γιατί ο απαιτούμενος προσδιορισμός των συγκεντρώσεων του άλατος είναι απλός και αρκετά ακριβής.

Πρακτικά, η απόρριψη του άλατος υπολογίζεται διαιρώντας τη διαφορά συγκεντρώσεων του άλατος μεταξύ της πλευράς ψηλής και χαμηλής πίεσης της μεμβράνης με τη συγκέντρωση της πλευράς ψηλής πίεσης. Το αποτέλεσμα εκφράζεται επί τοις εκατό %.

$$\text{Απόρριψη} = \frac{C_h - C_l}{C_h} \quad (15)$$

## **5.6 ΔΙΑΡΡΟΕΣ ΤΩΝ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ**

Η υπολογιζόμενη απόρριψη άλατος είναι πάντα ψηλότερη από τις πειραματικές τιμές, ακόμα κι από εκείνες που προσδιορίζονται κάτω από τις πιο προσεκτικές συνθήκες. Π.χ. η θεωρητική απόρριψη του NaCl για

μια τροποποιημένη μεμβράνη οξικής κυτταρικής υπολογίζεται θεωρητικά σαν 99.7 αλλά τα πειραματικά αποτελέσματα την περιορίζουν σε 97-99%. Η διαφορά πιστεύεται ότι οφείλεται στις ατέλειες της μεμβράνης δια μέσου των οποίων η άλμη υψηλής πίεσης μπορεί να διαρρεύσει και να ρυπαίνει το προϊόν.

Όλες οι μεμβράνες έχουν «ατέλειες». Αυτές δεν είναι πιθανώς λάθη κατασκευής αλλά μια «ιδιότητα» της μεμβράνης, από την οποία μπορεί να επωφεληθεί κανείς για να χρησιμοποιήσει τις μεμβράνες σε διάφορες ειδικές χρήσεις. Έτσι, οι πολύ πορώδεις μεμβράνες χρησιμοποιούνται για τη διαλογή μεγάλων μορίων (διάμετρος 20-500 Å) και μικρών μορίων, σε εφαρμογές υπερδιηθήσεως. Οι λιγότερο πορώδεις μεμβράνες χρησιμοποιούνται για υψηλές ροές νερού και μέσες απαιτήσεις απόρριψης άλατος σαν «αποσκληρυντές», ενώ οι μεμβράνες που έχουν προκατεργασθεί θερμικά για να ελαττωθεί το πορώδες τους, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτείται υψηλή απόρριψη.

Η κατανομή των οπών διαρροών διατρέχει όλο το εύρος, από την περίπτωση πολυάριθμων οπών, με διάμετρο των 100 Å ή μικρότερες μέχρι την περίπτωση λίγων οπών με διαμέτρους της τάξης του 1 μ.

Η κύρια πηγή της «ρύπανσης» του προϊόντος είναι η διέλευση του άλατος δια μέσου των μεγαλύτερων οπών, γιατί, σύμφωνα με το νόμο του POISEUILLE για την τυρβώδη ροή η διαρροή των αλάτων αυξάνει σύμφωνα με την τέταρτη δύναμη της διαμέτρου των πόρων. Επιπρόσθετα στη ροή των αλάτων δια μέσου των μεγάλων πόρων, υπολογίσιμη ποσότητα άλατος πρέπει να περνάει δια μέσου των πολυάριθμων μικρών πόρων γιατί τα μικρού μεγέθους ιόντα  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$

εμφανίζονται πάντα στο προϊόν, ανεξάρτητα το πόσο μικρή είναι η συγκέντρωσή τους στην τροφοδοσία.

Πολλοί τρόποι δοκιμάστηκαν για το σταμάτημα των διαρροών των μεμβρανών. Η θερμική προκατεργασία της μεμβράνης και η τροποποίηση της χημικής της σύνθεσης φαίνονται να είναι οι μόνοι σταθεροί τρόποι για την βελτίωση της ημιπερατότητας. Οι μεμβράνες για το θαλάσσιο νερό, πρέπει να είναι προκατεργασμένες σε υψηλή θερμοκρασία, ώστε να παράγουν ένα φιλμ που να μπορεί να απορρύνει τα 99,5% του άλατος της τροφοδοσίας.

Η απόρριψη μπορεί να βελτιωθεί παροδικά με την προσθήκη στην τροφοδοσία μερικών χημικών ουσιών των οποίων το μόριο είναι αρκετά μεγάλο ώστε να κλείσει τους πόρους διαρροής. Ο LOEB ανακάλυψε ότι ίχνη αλάτων τα οποία βρίσκονται φυσικά στο νερό του Los Angeles φράζουν τους πόρους διαρροής της μεμβράνης και βελτιώνουν την απόρριψη άλατος. Το χλωριούχο τετρααλκυλαμμώνιο χρησιμοποιήθηκε από τους LOEB και MANZIKIAN για να παρθεί ένα παρόμοιο αλλά περισσότερο αναπαραγωγίσιμο αποτέλεσμα. Άλλα υλικά που βελτιώνουν την απόρριψη είναι ο πολυβινυλο-μεθυλο αιθέρας και το DOW-FAX.

Δυστυχώς τα πρόσθετα που σταματούν τις διαρροές έχουν σοβαρά μειονεκτήματα που περιορίζουν πολύ τη χρήση τους.

Είναι πιο αποτελεσματικά σε χαμηλές ροές, και σε STANDARD μεμβράνες οξικής κυτταρίνης από ότι σε τροποποιημένες, που σήμερα όμως χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά. Διασκορπίζονται εύκολα και πρέπει σε κανονικά χρονικά διαστήματα να αναπληρώνονται. Τα περισσότερα από αυτά μειώνουν τη ροή του νερού καθώς μειώνουν και

την διαρροή του άλατος. Και το πιο σημαντικό από όλα είναι ακριβά. Οπότε αυτά τα πρόσθετα είναι χρήσιμα σε ειδικές μόνο περιπτώσεις που το κόστος δεν είναι σημαντικός παράγοντας.

### **5.7 ΠΟΛΩΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ**

Σε όλες τις μεθόδους αφαλάτωσης υπάρχουν δυναμικές εντοπιζόμενες συγκεντρώσεις της διαλελυμένης ουσίας σε εκείνα τα σημεία στα οποία ο διαλύτης εγκαταλείπει το διάλυμα.

Στις μεθόδους απόσταξης π.χ υπάρχουν μικρές αυξήσεις της συγκέντρωσης της εν διαλύση ουσίας στην επιφάνεια του διαλύματος, από όπου φεύγει το νερό σαν ατμός, αλλά αυτές σύντομα διασκορπίζονται από τη θερμική και εν μέσω φυσαλλίδων ανάδευση του διαλύματος.

Στις μεθόδους μεμβρανών όμως, η διαλελυμένη ουσία συσσωρεύεται σε ένα αμετακίνητο σύνορο (τη μεμβράνη) σε μια σχετικά σταθερή στοιβάδα ( την οριακή στοιβάδα) και δημιουργεί ένα φαινόμενο που καλείται πόλωση συγκέντρωσης.

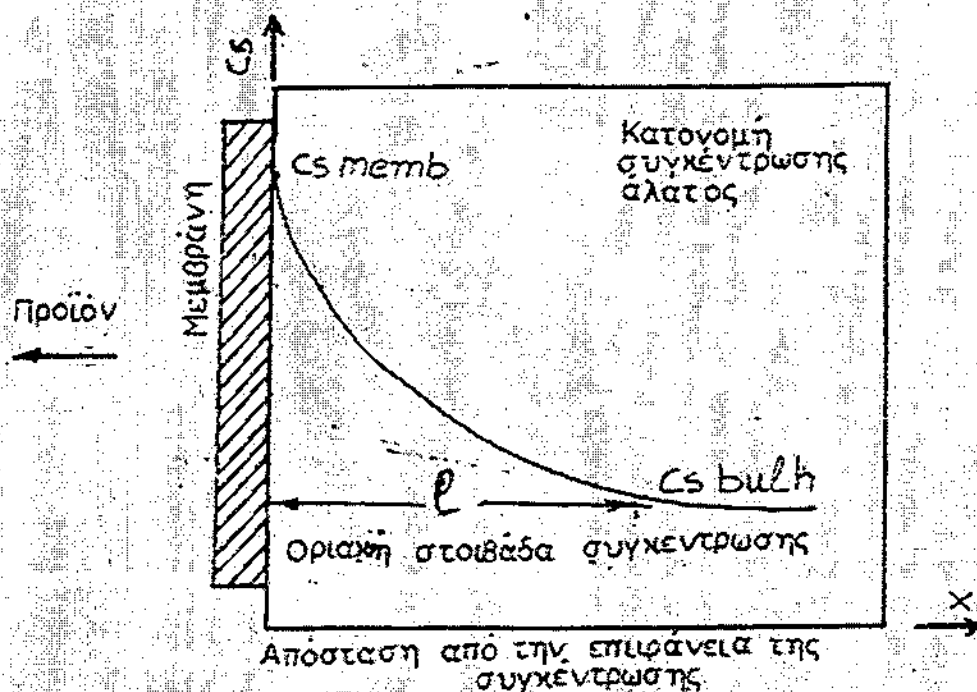
Αυτή ορίζεται σαν ο λόγος της συγκέντρωσης της διαλελυμένης ουσίας στην επιφάνεια της μεμβράνης (Cs membrane) προς την αντίστοιχη συγκέντρωση στον κύριο όγκο του διαλύματος. Εδώ λαμβάνεται βέβαια μια μέση τιμή, Cs bulk solution (σχήμα 30).

$$\text{Πόλωση} = \frac{Cs..membrane}{Cs..bulk}$$

Αρχικά, η οριακή στοιβάδα έχει την ίδια συγκέντρωση με τον κύριο όγκο του διαλύματος, αλλά εφ'όσον η μεμβράνη είναι περατή για το διαλύτη (νερό), η οριακή στοιβάδα αυξάνει σταδιακά τη συγκέντρωση

της σε διαλελυμένη ουσία (άλας), καθώς ο διαλύτης φεύγει δια μέσου των διόδων της μεμβράνης.

Η στοιβάδα γίνεται όλο και παχύτερη και η συγκέντρωση διαρκώς αυξάνεται, γιατί ο ρυθμός της διάχυσης της διαλελυμένης ουσίας της μεμβράνης προς την πλευρά του κυρίου όγκου του διαλύματος δεν μπορεί να συγκριθεί με τη ροή του διαλύτη δια μέσου της μεμβράνης σχήμα 30.



Σχήμα 30: Πόλωση συγκέντρωσης

Η στοιβάδα πάνω στο τοίχωμα μπορεί να ελαττωθεί με μεγαλύτερη ταχύτητα τροφοδοσίας και τυρβώδη ροή. Η επιπλέον ροή σε μεγαλύτερες ταχύτητες τροφοδοσίας έχει σαν αποτέλεσμα τη συνολική μικρότερη ανάκτηση προϊόντος (μικρότερος λόγος προϊόντος ως προς



την τροφοδοσία). Αυτό αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας και το ποσόν των απωλειών.

Έτσι, η δημιουργία τυρβώδους ροής απομένει ο πιο πρόσφορος τρόπος για την μείωση της οριακής στοιβάδας. Οι μονάδες με σωληνωτές μεμβράνες έχουν μικρές πλαστικές σφαίρες στο δαχτυλοειδές διάστημα ώστε να σπάει η ομαλή ροή του διαλύματος τροφοδοσίας. Οι μονάδες αντίστροφης ώσμωσης με φυλλώδεις μεμβράνες, έχουν επίπεδα παραπετάσματα από πολυαιθυλένιο στη δίοδο της ροής. Με την τυρβώδη ροή είναι αναγκαίο καλό φιλτράρισμα της τροφοδοσίας, ώστε διάφορα συσσωματώματα να μην οδηγούνται σε στενούς χώρους ή να σπρώχνονται πάνω στο στοιχείο της μεμβράνης.

### **5.7.1 ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ**

Όταν αυξάνεται η συγκέντρωση του άλατος στην τροφοδοσία, το προϊόν δείχνει μια αντίστοιχη αύξηση στην περιεκτικότητα άλατος. Αυτό το αποτέλεσμα συμπεραίνεται και από την εξίσωση για την ροή του άλατος (14) η οποία δείχνει ότι η ροή άλατος είναι ευθέως εξαρτώμενη από τη συγκέντρωση του στην τροφοδοσία. Έτσι, η συγκέντρωση του διαλύματος πολύ κοντά στη μεμβράνη είναι εκείνη που καθορίζει το ποσόν του άλατος στο προϊόν.

Εξ' αιτίας δε του φαινομένου της πόλωσης συγκέντρωσης η μεγαλύτερη συγκέντρωση είναι κοντά στο τοίχωμα της μεμβράνης. Απαιτείται λοιπόν η ροή της τροφοδοσίας να ρυθμίζεται ώστε να δίνει την απαιτούμενη περιεκτικότητα στην οριακή στοιβάδα.

Ο συνηθισμένος λόγος πόλωσης συγκέντρωσης είναι 1,2 έως 2,0 πράγμα που σημαίνει ότι η συγκέντρωση στο τοίχωμα είναι 1,2, έως 2,0 πολλαπλάσια της συγκέντρωσης του κυρίου όγκου της τροφοδοσίας.

Η ροή του νερού θα πέσει όταν η περιεκτικότητα σε αλάτι του διαλύματος τροφοδοσίας αυξηθεί, γιατί το ποσόν του άλατος επηρεάζει την κατευθύνουσα δύναμη της ροής. (Η καθαρή κατευθύνουσα δύναμη είναι η διαφορά μεταξύ της καθαρής πίεσης και της καθαρής οσμωτικής πίεσης, και η περιεκτικότητα άλατος είναι αυτή που καθορίζει την οσμωτική πίεση). Το διάλυμα το παρακείμενο στη μεμβράνη είναι αυτό που επιδρά κατ'έξοχή στο σύστημα, γιατί η οσμωτική πίεση αυτού του διαλύματος καθορίζει την κατευθύνουσα δύναμη του συστήματος.

Σαν παράδειγμα ας εξετάσουμε τι μπορεί να συμβεί σε μια μονάδα αντίστροφης όσμωσης που κατεργάζεται θαλάσσιο νερό στο 1000 PSI όταν η ανάκτηση του προϊόντος αυξάνεται.

Ας υποθέσουμε ότι το θαλάσσιο νερό (35000 MG/LT T.D.S) έχει μια οσμωτική πίεση των 350 PSI και η ανάκτηση του νερού στη μονάδα είναι κανονικά 17%. Εάν ο συντελεστής πόλωσης συγκέντρωσης είναι 1,2 η συγκέντρωση του άλατος στο τοίχωμα της μεμβράνης θα είναι  $1,2 \times 35000 = 42000$  MG/LT T.D.S και η οσμωτική πίεση της μεμβράνης θα είναι  $1,2 \times 350 = 420$  PSI. Εάν η τροφοδοσία ρυθμιστεί ώστε να ανακτώνται τα 50% του νερού το διάλυμα στο τούχωμα συγκεντρώνονται σε 100% και η τοπική οσμωτική πίεση είναι 750 PSI. Σαν αποτέλεσμα της αυξημένης συγκέντρωσης στο τούχωμα, η ροή του νερού (παραγωγής) θα πέσει περίπου 50%, γιατί η κατευθύνουσα δύναμη έχει ελαττωθεί από τα 580 PSI ( $1000 - 420 = 580$  PSI) στα 300 PSI ( $1000 - 700 = 300$  PSI).

Έτσι οι απαιτήσεις σε ενέργεια ενός συστήματος αντίστροφης όσμωσης ποικίλλει ανάλογα με την πόλωση συγκέντρωσης.

Όταν η συγκέντρωση του άλατος στη μεμβράνη αυξάνεται, τότε ή η πίεση λειτουργίας πρέπει να αυξηθεί ώστε να ανταποκριθεί στην ψηλότερη ωσμωτική πίεση ή ο ρυθμός άντλησης πρέπει να αυξηθεί ώστε να γίνει περισσότερο τυρβώδης η ροή και έτσι να αραιωθεί το συγκεκριμένο κοντά στη μεμβράνη άλας.

Όταν χρησιμοποιείται φυσικό υφάλμυρο νερό με περιεκτικότητα 2.000- 10.000 PPM συνολικά διαλελυμένα στερεά, το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης είναι μικρό γιατί η καθαρή πίεση είναι μεγάλη, ενώ η ωσμωτική πίεση χαμηλή.

Οι πιέσεις λειτουργίας των μονάδων υφάλμυρου νερού συνήθως ποικίλλουν από 250 έως 800 PSI και οι ωσμωτικές πιέσεις από 30 έως 100 PSI.

Ένα πολύ κοινό πρόβλημα που προκαλείται από ψηλή πόλωση συγκέντρωσης είναι η έμφραξη των μεμβρανών από σποραδικά διαλυόμενα άλατα. Εάν το διάλυμα στο τοίχωμα γίνει υπέρκορο το αδιάλυτο άλας αποτίθεται. Αυτές οι αποθέσεις μπορούν να σταματήσουν τη ροή του νερού και να προκαλέσουν φθορά της μεμβράνης. Οι πιο κοινές αποθέσεις είναι του  $\text{CaSO}_4$  και του  $\text{CaCO}_3$ , γιατί τα άλατα αυτά περιέχονται σε όλα σχεδόν τα φυσικά νερά. Έχουν χαμηλές διαλυτότητες (14 MG/LT για το  $\text{CaCO}_3$  και 1500 MG/LT για το  $\text{CaSO}_4$ ), τις οποίες είναι εύκολο να τις υπερβεί κανείς αν τα φυσικά νερά έχουν ψηλή συγκέντρωση σε αυτά τα άλατα.

Μερικές από τις προφυλάξεις που παίρνονται για να προληφθούν οι αποθέσεις είναι:

i. Ρύθμιση του ΡΗ με την προσθήκη οξέος στην τροφοδοσία, οπότε διασπάται το δισανθρακικό ιόν και προλαμβάνετε η απόθεση ανθρακικών.

ii. Διατήρηση της ανάκτησης του προϊόντος σε χαμηλές τιμές, π.χ. λόγος προϊόντος προς τροφοδοσία μικρότερος από 50% οπότε δεν αποτίθενται θειικά.

iii. Προσθήκη ουσιών που προλαμβάνουν την απόθεση (εξαμεταφοσφορικού Να)

Εφ'οσον όμως γίνουν αποθέσεις, και ύστερα από τον καθαρισμό, η μεμβράνη έχει σε ένα βαθμό, καταστραφεί οριστικά.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

### **ΤΕΧΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ ΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΠΙΔΥΣΗ**

#### **6.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Μια λεπτομερής και κατάλληλη οικονομική ανάλυση πρέπει να έχει σαν στόχο την εξακρίβωση των δυνατοτήτων μιας μεθόδου για τη σωστή χρησιμοποίηση της με τις λιγότερες δαπάνες στα πλαίσια των τεχνικά δυνατών ορίων.

Στην προκειμένη περίπτωση, μια οικονομική θεώρηση της αντίστροφης ώσμωσης και ηλεκτροδιαπίδυσης πρέπει να απαντά στο εξής σημαντικό ερώτημα:

Κάτω από ποιες συνθήκες είναι η πρώτη συναγωνίσιμη με τη δεύτερη για την αφαλάτωση υφαλμυρών νερών.

Είναι προφανές, επομένω, ότι εκ των προτέρων χρειάζονται αρκετές πληροφορίες, σε σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία και το κόστος των διεργασιών.

Οι παράγοντες αυτοί είναι:

- Η λειτουργία των μεμβρανών
- Διαπερατότητα αυτών σε συνάρτηση με την πίεση
- Ικανότητα απομάκρυνσης αλάτων
- Χρόνος ζωής
- Ανάγκη ή μη προκατεργασίες

- Απαιτήσεις πιέσεων για τη διατήρηση της πόλωσης συγκεντρώσεως εντός ορίων
- Σταθερότητα μεμβρανών σε κανονικές και αυξημένες θερμοκρασίες, κ.α.

Πρέπει να καθοριστούν επομένως ορισμένες οικονομικές και τεχνικές παράμετροι που αφορούν τον τρόπο λειτουργίας των διεργασιών.

Οικονομικές παράμετροι είναι το ποσοστό απόσβεσης της εγκατάστασης, ασφάλιση, τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, κόστος εργασίας κλπ.

Λειτουργικές και σχεδιαστικές παράμετροι είναι:

Ο χρόνος ζωής της εγκατάστασης, θερμοκρασία και περιεκτικότητα τροφοδοσίας σε άλατα, συγκέντρωση αλμόλοιπων, ποσοστό ανάκτησης νερού, συγκέντρωση προϊόντος, κατανάλωση ενέργειας, ρυθμός ροής και χρόνος λειτουργίας μεμβρανών κλπ.

Τα διάφορα έξοδα μπορούν να χωριστούν σε δύο κύρια μέρη:

- πάγια έξοδα
- έξοδα λειτουργίας και επίβλεψης

## **6.2 Αντίστροφη Ωσμωση**

Διάφοροι παράγοντες αποτελούν το συνολικό πάγιο κεφάλαιο μιας μονάδας αντίστροφης ώσμωσης. Σε αδρές γραμμές μπορούμε να διακρίνουμε τους παρακάτω παράγοντες:

- Εξοπλισμός σχετιζόμενος με τις μεμβράνες
- Πάγιος μηχανικός εξοπλισμός (αντλίες, σωληνώσεις, κ.α.)
- Κατασκευή της εγκατάστασης

- Όργανα ελέγχου και αυτόματης ρύθμισης
- Άλλοι παράγοντες μικρότερης σημασίας

Όλοι αυτοί αναφέρονται στο κύριο μέρος της αντίστροφης ώσμωσης και όχι σε στάδια προκατεργασίας ή μετακατεργασίας. Οποσδήποτε όμως στοιχεία όπως ο εφοδιασμός του προς κατεργασία νερού, αποσκλήρυνση και ρύθμιση οξύτητας, αποθήκευση του προϊόντος ανάκτηση ενέργειας, εάν είναι δυνατόν από το αλμόλοιπο και μετά απομάκρυνση τούτου, ασκούν σημαντική επίδραση στις δαπάνες και ανάλογα με την περίπτωση πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, για την ορθή διαμόρφωση του κόστους του παραγόμενου νερού.

Τον μεγαλύτερο παράγοντα αποτελεί το στοιχείο των μεμβρανών ανερχόμενος σε ποσοστό 35-50% των συνολικών πάγιων εξόδων. Επομένως η ανάπτυξη μεμβρανών με υψηλές ιδιότητες αφαλάτωσης (οικονομική ροή υψηλό συντελεστή απομάκρυνσης αλάτων), είναι μεγάλης σημασίας για την ελάττωση των δαπανών. Οι πιο διαδεδομένες και με επιτυχία χρησιμοποιούμενες μεμβράνες είναι δύο ειδών:

- ανισοτροπικές μεμβράνες οξικής κυτταρίνης και
- τριχοειδείς σωλήνες από νάϋλον.

Βασικό πρόβλημα που συνδέεται με όλες τις μεμβράνες είναι η επικάθιση αλάτων στο εσωτερικό τους, πράγμα που συνεπάγεται μια αναντιστρεπτή ελάττωση ροής με το χρόνο, καθώς επίσης και η συμπίεση που υφίσταται (περίπτωση οξικής κυτταρίνης) με αύξηση της πίεσης ιδιαίτερα των 800 PSI (56 ATM), γεγονός που καταλήγει πάλι σε απώλεια ροής. Αντίθετα, οι μεμβράνες που λαμβάνουν τη μορφή τριχοειδών σωλήνων, μπορούν να αντέχουν σε πολύ υψηλές πιέσεις

χωρίς να υφίστανται συμπίεση, ενεργούν δε μόνες και σαν υποστηρίγματα.

Η κατασκευή και η διαμόρφωση των μεμβρανών γίνεται σε τέσσερα συστήματα:

- 1) Πλάκες με στηρίγματα
- 2) Σπειροειδή περιβλήματα
- 3) Πορώδεις σωλήνες
- 4) Τριχοειδείς σωλήνες

Σήμερα στην αγορά κυριαρχούν τα συστήματα (2) και (4). Οι πλάκες με τα στηρίγματα είναι προσαρμόσιμες σε υψηλές πιέσεις (π.χ. 1000 atm), η δε πόλωση συγκεντρώσεως μπορεί ευκολότερα να ελεχθεί.

Όσον αφορά τις εγκαταστάσεις αντίστροφης όσμωσης που χρησιμοποιούν πορώδεις σωλήνες, η προτίμησή τους δεν είναι μεγάλη, εκτός ειδικών εφαρμογών όπως κατεργασία βιομηχανικών αποβλήτων, λόγω των υψηλών πάγιων κεφαλαίων.

Οι μεμβράνες οξικής κυτταρίνης παρέχουν κυλούς ρυθμούς ροής νερού (π.χ. 0,4-2 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> day ή 10-50 G/D) και μεγάλη διαχωριστική ικανότητα (90 έως 99%).

Η εταιρία Du pont, εισήγαγε το 1967 τους τριχοειδείς σωλήνες σε εμπορική εφαρμογή για αφαλάτωση υφαλμυρών νερών. Παρόμοια, η Dow Chemical ανέπτυξε τριχοειδείς σωλήνες με βάση πολυμερή τριοξικής κυτταρίνης. Η επιταχυνόμενη ροή με τους τριχοειδείς σωλήνες φτάνει τα 4 GID περίπου ( $\approx 0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ DAY}$ ). Εκτεταμένα, εργαστηριακά πειράματα κατέδειξαν ότι οι μεμβράνες αυτές μπορούν να δώσουν ροές των 25 και 30 GID. Πρόσφατη ανάπτυξη στην τεχνολογία



των μεμβρανών, συνιστάται στη δημιουργία ενός λεπτού στρώματος πολυμερούς (250-500 Å) σε πορώδες υποστήριγμα που έχει δημιουργηθεί πρόσφατα.

Ο ρυθμός ροής των μεμβρανών και ο συντελεστής διαχωρισμού των αλάτων, προκαθορίζουν τις απαιτήσεις σε ενεργό επιφάνεια, για δεδομένου ρυθμού και ποιότητας προϊόν. Η μεγάλη απαίτηση σε επιφάνεια, των μεμβρανών με τριχοειδής σωλήνες (πολλαπλάσια σε σχέση με εκείνες της οξικής κυτταρίνης) εξασφαλίζεται με την τοποθέτηση ενός μεγάλου αριθμού εντός μαδύου. Το πόσο αποφασιστικός είναι ο παράγοντας ροής των μεμβρανών διαφαίνεται από το ότι διπλασιασμός αυτής συνεπάγεται 25% ελάττωση σε δαπάνες επένδυσης.

Για μια εγκατάσταση ορισμένης δυναμικότητας, η απαιτούμενη επιφάνεια μεμβρανών είναι συνάρτηση τριών κυρίων εξωτερικών παραμέτρων:

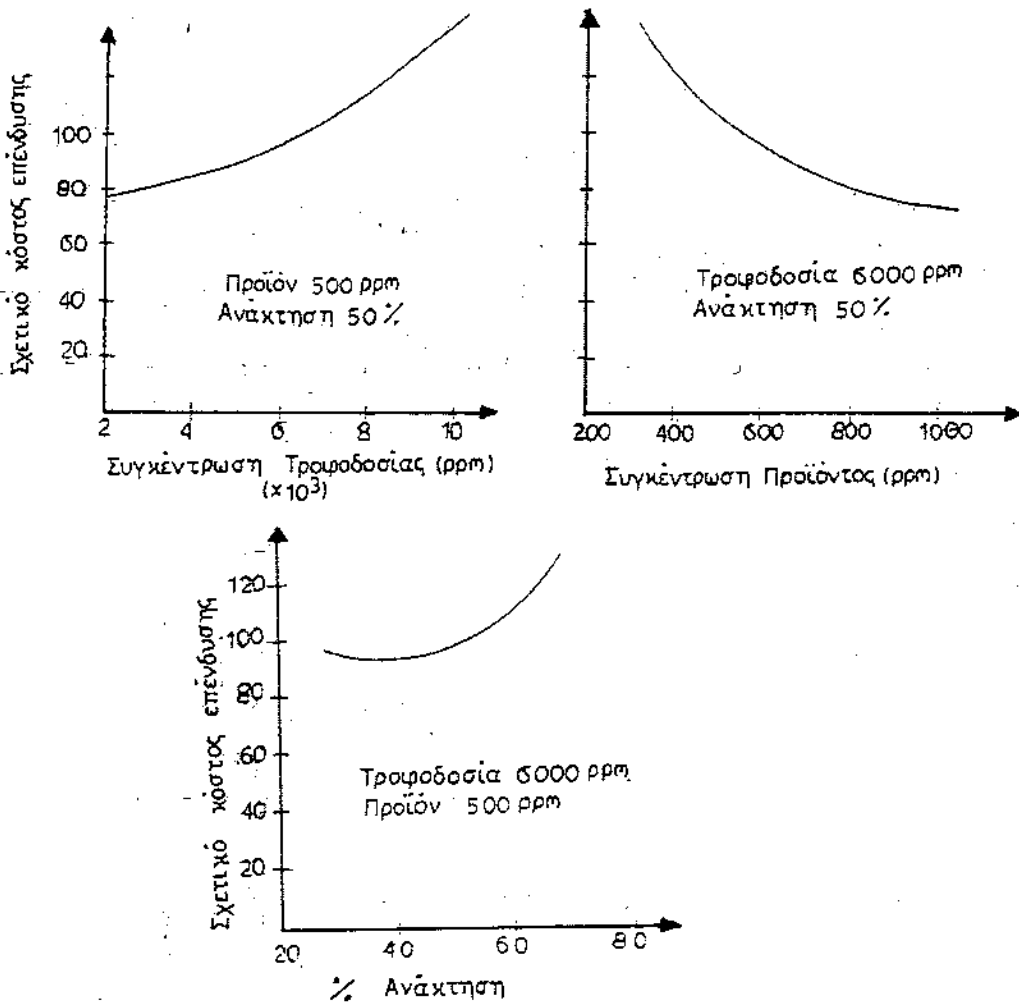
- 1) Περιεκτικότητας σε άλατα τροφοδοσίας
- 2) Επιθυμητής συγκέντρωσης προϊόντος, και
- 3) Επί τοις εκατό (%) ανάκτησης νερού.

Αυξανόμενης της συγκέντρωσης τροφοδοσίας ο συντελεστής απομάκρυνσης αλάτων πρέπει να είναι υψηλότερος και κατ'ακολουθία επέρχεται ελάττωση στο ρυθμό ροής, που σημαίνει αύξηση της επιφάνειας. Ανάλογη είναι και η επίδραση της συγκέντρωσης προϊόντος. Πολυπλοκότερη είναι η επίδραση του ποσοστού ανάκτησης. Με αυξημένη ανάκτηση, η μέση συγκέντρωση αλάτων εντός του συστήματος είναι υψηλότερη, επομένως, για ορισμένη ποιότητα προϊόντος, μεμβράνες με μεγαλύτερο συντελεστή απομάκρυνσης

αλάτων, και χαμηλότερη ροή πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Εξάλλου σε μεγάλες ανακτήσεις ο συνολικός διακινούμενος όγκος είναι μικρότερος, επομένως το μέγεθος του εξοπλισμού και η απαιτούμενη ενέργεια αντλίας είναι μικρότερα, καταλήγοντας έτσι σε χαμηλότερο κόστος.

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η επίδραση των αναφερθέντων παραμέτρων σε σχετικές δαπάνες επένδυσης για συστήματα πορωδών σωλήνων.

Σχήματα 31<sup>α</sup>, 31<sup>β</sup>, 31<sup>γ</sup>

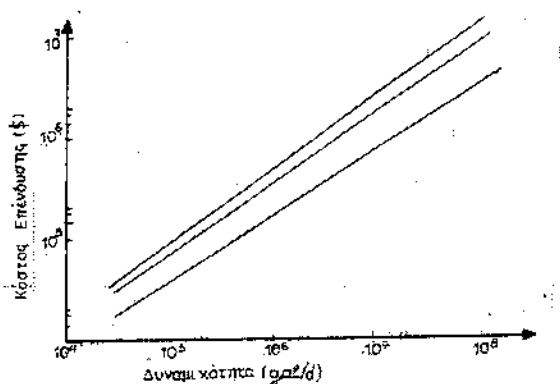


*Σχήματα 31 α.β.γ: Μεταβολή κόστους επένδυσης συναρτήσει εξωτερικών παραμέτρων.*

Στη θέση αυτή αναφέρεται και η επίδραση του μεγέθους της εγκατάστασης (δυναμικότητα) στο κόστος επένδυσης και συνεπώς, στο κόστος αφαλάτωσης. Η αντίστροφη ώσμωση είναι διεργασία με έντονο χαρακτήρα των μεμβρανοστοιχείων (MODULES). Αύξηση της δυναμικότητας λαμβάνεται με την προσθήκη περισσότερων τέτοιων συγκροτημάτων.

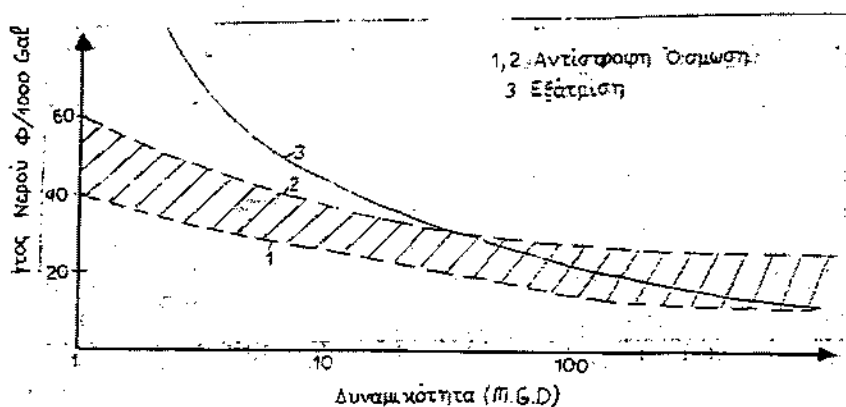
Η τιμή τους καθορίζεται από το κόστος των υλικών (μεμβράνες, υποστηρίγματα, εξαρτήματα κλπ) και την προσφορά τους στην αγορά και όχι από τη δυναμικότητα της εγκατάστασης για την οποία προορίζονται. Ελάττωση στο κόστος για μεγάλες εγκαταστάσεις, απορρέει από τις χαμηλότερες τιμές αντλιών και άλλου πάγιο εξοπλισμού, καθώς επίσης και από το αναλογικά χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης και συναρμολόγησης, που αναμένεται με την ύπαρξη μεγαλύτερου αριθμού μεμβρανοστοιχείων. Η ελάττωση του κόστους είναι μικρότερη, για την αντίστροφη ώσμωση, παρά για μια τυπική χημική μονάδα, λόγω της προαναφερθείσας ιδιορρυθμίας της.

Στο παρακάτω σχήμα 32 δίνεται, σε λογαριθμική κλίμακα, η επίδραση της επένδυσης όπως έχει εκτιμηθεί από διάφορες εταιρίες.



Σχήμα 32: Σχέση επένδυσης συναρτήσει δυναμικότητας

Στο σχήμα 33 παρουσιάζεται, η μεταβολή του κόστους αφαλάτωσης με αύξηση της δυναμικότητας για μονάδες αντίστροφης ώσμωσης. Συγκριτικά δίνεται η ίδια σχέση για μια μονάδα εξάτμισης.



Σχήμα 33: Κόστος νερού σε συνάρτηση με την δυναμικότητα

Παράλληλα με την αύξηση της δυναμικότητας, και η παραγωγή μεμβρανοστοιχείων μεγάλου μεγέθους, ασκεί ευνοϊκή επίδραση στο κόστος επένδυσης. Αξίζει να αναφερθεί ότι πριν το 1970 η μέγιστη παραγωγή νερού ήταν μικρότερη των 500 GPD. Τα τελευταία χρόνια, η τεχνική κατασκευής και ελέγχου ποιότητας έχει κατορθώσει την αύξηση της δυναμικότητας μέχρι και 5000 GPD.

Το οικονομικό όφελος συνδυάζεται επίσης και με την μικρότερη απαίτηση σε σωληνώσεις, όργανα ελέγχου, σύστημα τροφοδοσίας. Σχετικά αναφέρεται ότι το κόστος εγκατάστασης δυναμικότητας μεμβρανοστοιχείων 60.000 GPD, είναι 40% χαμηλότερο από την εγκατάσταση που χρησιμοποιεί μεμβρανοστοιχεία των 10.000 GPD.

Η συμβολή στις δαπάνες επένδυσης του πάγιου και βοηθητικού εξοπλισμού, μολονότι μικρότερης σημασίας σε σύγκριση με τις μεμβράνες, μπορεί να ποικίλει σημαντικά και να επηρεάζεται από ειδικές τοπικές συνθήκες.

Οι πάγιες δαπάνες, για σχετικά μικρές ή μεσαίες εγκαταστάσεις (τάξης 50 και 100 χιλιάδων γαλονιών) ανέρχονται σε \$ 1/GPD περίπου, ενώ για μεγάλες δυναμικότητες (τάξης εκατομμυρίου) βρίσκονται σε κατώτερα επίπεδα (\$ 0,6- \$ 0,4/GPD)

Το κόστος λειτουργίας μιας εγκατάστασης αντίστροφης ώσμωσης μπορεί να θεωρηθεί ότι διαμορφώνεται από τους εξής παράγοντες:

- Απόσβεση πάγιου εξοπλισμού
- Κατανάλωση ενέργειας
- Αντικατάσταση διαφόρων εξαρτημάτων και κυρίως μεμβρανών
- Εργασία λειτουργίας και συντήρησης

Στην ανάλυση των διαφόρων ειδών κόστους, δεν θα ασχοληθούμε με την απόσβεση, η οποία αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος των δαπανών και η οποία εξαρτάται από κάπως αυθαίρετους παράγοντες όπως είναι ο ρυθμός και ο χρόνος απόσβεσης. Από το κυρίως κόστος λειτουργίας, η ενέργεια και η αντικατάσταση μεμβρανών αποτελούν τους μεγαλύτερους συντελεστές αυτού. Το κόστος αυτών είναι συνάρτηση

πολλών παραμέτρων όπως είναι η τιμή μονάδας ηλεκτρικής ενέργειας, ο ρυθμός ροής των μεμβρανών, η δυναμικότητα κ.α.

Η ενέργεια υπό μορφή, ηλεκτρική, για την κίνηση μιας ή περισσότερων αντλιών και εκφρασμένη σαν έργο αυτών μπορεί να διακριθεί όπως παρακάτω:

i. Ελάχιστη θερμοδυναμική ενέργεια. Καθορίζεται από την υπάρχουσα ωσμωτική πίεση και παριστάνει το κατώτερο όριο των ενεργειακών απαιτήσεων.

ii. Ποσό ενέργειας λόγω ύπαρξης πόλωσης συγκεντρώσεως. Μολονότι το φαινόμενο αυτό επηρεάζεται από σχεδιαστικούς παράγοντες, από άποψη ενέργειας, μεγαλύτερη πόλωση είναι ανεκτή για νερά χαμηλής περιεκτικότητας σε άλατα.

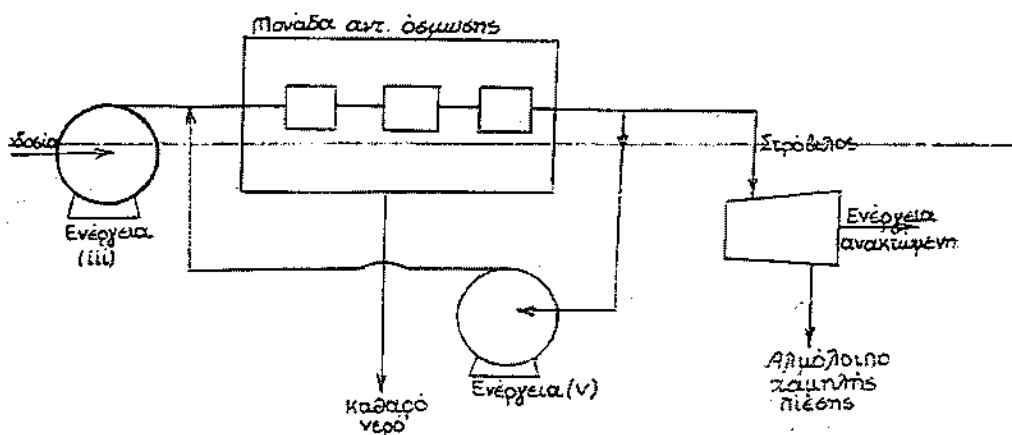
iii. Ενέργεια υπό μορφή αυξημένης πίεσης για τη δημιουργία πρακτικών ροών εντός του συστήματος. Η πίεση αυτή, είναι μια πρωταρχικής σημασίας μεταβλητή, η οποία εισέρχεται σε μια αριστοποίηση της αντίστροφης ώσμωσης. Η τιμή της βρίσκεται συνήθως πολύ υψηλότερα από τη διαφορά των ωσμωτικών πιέσεων Δ.Π. των δύο ρευμάτων που είναι ανάλογη της συγκέντρωσης τροφοδοσίας. Επομένως, δεν είναι σχετικά ευαίσθητη της σύστασής του προς κατεργασία νερού. Ο λόγος αυτός θα μπορούσε να θεωρηθεί μειονέκτημα για τη χρησιμοποίηση της αντίστροφης ώσμωσης στην κατεργασία χαμηλής συγκέντρωσης νερού.

iv. Απορριπτόμενη ενέργεια, ολικά ή κατά μέρος, από το υπό πίεση ευρισκόμενο αλμόλοιπο. Όσον αφορά την ανάκτηση μέρους της ενέργειας αυτής με ένα στρόβιλο, είναι γενικά παραδεκτό ότι βελτιώνει την οικονομία της όλης διεργασίας μαζί με την εξοικονόμηση

σημαντικού ποσού ενέργειας. Μελέτες με την χρήση υπολογιστή και παράμετρους την πίεση λειτουργίας, τη δυναμικότητα και το ποσοστό ανάκτησης νερού, κατέδειξαν ότι η ανάκτηση ενέργειας, είναι οικονομικά εφικτή με ορισμένο σύστημα αντλίας- στροβίλου και για μικρές ακόμη δυναμικότητες (μικρότερες των 100 χιλ. GPD), ιδιαίτερα για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού (υψηλές πιέσεις 100 ATM).

ν. Ενέργεια υπό μορφή έργου αντλίας που ανακυκλώνει μέρος του εξερχόμενου ρεύματος (σχήμα 34) προς ανάπτυξη τυρβώδης ροής και την ελάττωση στο ελάχιστο δυνατό της πόλωσης συγκεντρώσεως. Και η ενέργεια αυτή αποτελεί σημαντικό παράγοντα σχεδιασμού, που λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση αριστοποίησης της διεργασίας.

Το ενεργειακό κόστος, σαν ποσοστό των συνολικών λειτουργικών δαπανών, ενώ πριν μερικά χρόνια υπολογιζόταν κάτω του 20% μετά την ενεργειακή κρίση και την κατά 30% αύξηση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας, παρουσιάζεται αυξημένο κατά 10% περίπου ; ώστε εκτιμούμε αυτό σήμερα σε ποσοστό 20-30%.



Σχήμα 34: Κατανομή ενέργειας στην αντίστροφη ώσμωση

Η καταναλισκόμενη ενέργεια είναι στενά εξαρτημένη από την πίεση λειτουργίας και το ποσοστό ανάκτησης νερού είναι δε σήμερα της τάξης των 2-9 Kwh/m<sup>3</sup> καθαρού νερού.

Η ανάγκη ελάττωσης των ενεργειακών δαπανών, οδήγησε στη συνεχή ανάπτυξη ενός νέου είδους μεμβρανών των οποίων η λειτουργικότητα σε χαμηλές πιέσεις (20 atm) παρουσιάζεται ισοδύναμη ή και καλύτερη των άλλων εμπορικών μεμβρανών. Η αντικατάσταση με μεμβράνες χαμηλής πίεσης μπορεί να επιφέρει ελάττωση στις δαπάνες ενέργειας περί το 40%.

Στην παραπάνω ανάλυση δεν συμπεριλαμβάνεται το έργο αντλιών για τον εφοδιασμό της τροφοδοσίας ή την απομάκρυνση του αλμόλοιπου.

Η αντικατάσταση μεμβρανών αποτελεί σημαντικό παράγοντα κόστους λειτουργίας. Οι δαπάνες τους ποσοστιαία υπερβαίνουν συνήθως το 20%. Παράμετροι που διαμορφώνουν τις δαπάνες αυτές είναι ο χρόνος ζωής, και ικανοποιητικής λειτουργίας των, το κόστος κατασκευής ως και η εργασία για την αντικατάσταση.

Ο χρόνος ζωής των μεμβρανών είναι συνάρτηση κυρίως του είδους του τροφοδοτούμενου νερού και του τύπου της χρησιμοποιούμενης μεμβράνης. Οι μεμβράνες οξικής κυτταρίνης, παρά την καλή λειτουργικότητά τους είναι αρκετά ευπαθείς έναντι PH βακτηρίων και συμπίεσης. Η διάρκεια ζωής τους δεν είναι μεγάλη, κυμαίνεται από 1-2 χρόνια, και εφόσον η εκμετάλλευσή τους είναι ικανοποιητική. Οι μεμβράνες των πολυαμιδίων είναι πιο ανθεκτικές και παρουσιάζουν μια διάρκεια ζωής της τάξης τριών χρόνων.

Ωστόσο, με την εκτεταμένη έρευνα που γίνεται για την ανάπτυξη νέων υλικών στην κατασκευή μεμβρανών, πιστεύεται ότι ο χρόνος ζωής



θα αυξηθεί με αποτέλεσμα την ελάττωση των λειτουργικών δαπανών άρα και του κόστους παραγόμενου νερού.

Ελάττωση των δαπανών στην αντικατάσταση μεμβρανών μπορεί να επιτευχθεί και με την ανάπτυξη των μεθόδων κατασκευής μεμβρανοστοιχείων. Απ'ευθείας απόχυση σε πορώδη υποστηρίγματα η αναγέννησης των μεμβρανών επί τόπου, βελτιώνουν την οικονομία γενικά των μεμβρανών.

### **6.3 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΠΙΔΥΣΗ**

Μια εγκατάσταση ηλεκτροδιαπίδυσης επιβαρύνεται, σε αναλογία με την αντίστροφη όσμωση από τους ίδιους περίπου παράγοντες όσον αφορά τις πάγιες δαπάνες που σημαίνει ότι μπορούμε να διακρίνουμε τα βασικά συστατικά των κελιών (μεμβράνες διατάξεις ροών, υποστηρίγματα, ηλεκτρόδια) τον πάγιο μηχανικό εξοπλισμό (αντλίες, σωληνώσεις κλπ.) σύστημα αυτόματου ελέγχου καθώς και την κατασκευή γενικά της εγκατάστασης.

Όπως και στην αντίστροφη όσμωση, τα παραπάνω αποτελούν τμήματα της κύριας διεργασίας που είναι ο ηλεκτροχημικός διαχωρισμός του νερού από το διάλυμα των αλάτων. Δεν περιλαμβάνονται εγκαταστάσεις προκατεργασίας του νερού (χημικών, φιλτραρίσματος κ.α) καθώς και παρόμοιες απομάκρυνσης του αλμόλοιπου. Μια μονάδα ηλεκτροδιαπίδυσης, ιδιαίτερα μεγάλης δυναμικότητας, μπορεί να συνοδεύεται και από τμήμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (εξοπλισμός προς εφοδιασμό δια ρεύματος των κελιών, εξοπλισμό για την λειτουργία αντλιών, απαραίτητο συναφή εξοπλισμό).

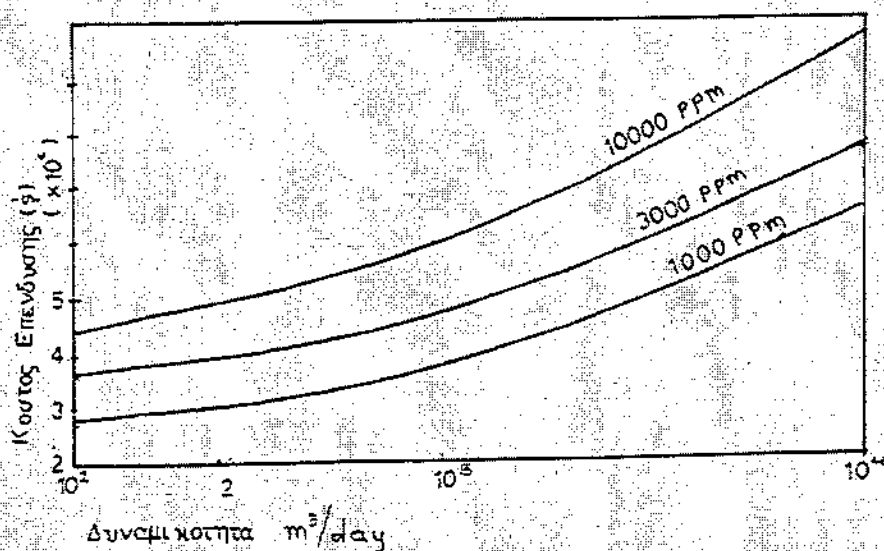
Οι ελέγχοντες και κρίσιμοι παράγοντες στη διαμόρφωση των πάγιων δαπανών είναι κατά σειρά:

Οι μεμβράνες των κελιών, αντλίες και σωληνώσεις και στη συνέχεια ο εξοπλισμός παραγωγής και τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας και ο εξοπλισμός προκατεργασίας του νερού. Όσον αφορά τον τελευταίο παράγοντα γίνεται γνωστό ότι η ηλεκτροδιαπίδυση είναι αρκετά ευαίσθητη έναντι αιωρημάτων και ακαθαρσιών του προς κατεργασία νερού. Και η μικρότερη παρουσία αυτών απαιτεί διάφορες και δαπανηρές προκατεργασίες. Μια άποψη της μεταβλητότητας του πάγιου κεφαλαίου είναι η επίδραση της δυναμικότητας της εγκατάστασης στο κόστος των διαφόρων συστατικών αυτού. Μια τέτοια ανάλυση δείχνει ότι η μεγαλύτερη ελάττωση, με την αύξηση της δυναμικότητας, συμβαίνει στους αναφερθέντες κρίσιμους παράγοντες.

Σημειώνεται ακόμη η συγκριτικά μεγαλύτερη (σε ποσοστό υπερδιπλάσιο για δυναμικότητες των 0,5 MGD περίπου και άνω) αύξηση της επένδυσης, όταν αυξάνεται η συγκέντρωση τροφοδοσίας σε σχέση με την ίδια εγκατάσταση αντίστροφης όσμωσης. Σαν παράδειγμα αναφέρεται στη συνέχεια η εξής μεταβολή αριθμών:

Συγκέντρωση τροφοδοσίας	1 g/l	2 g/l	3 g/l
Επένδυση	450.000	850.000 αύξηση 90%	1.250.000 αύξηση 180%

Στο σχήμα 35 φαίνεται η μεγάλη αύξηση επένδυσης για υψηλές περιεκτικότητες.



Σχήμα 35: Σχέση επένδυσης συναρτήσει δυναμικότητας

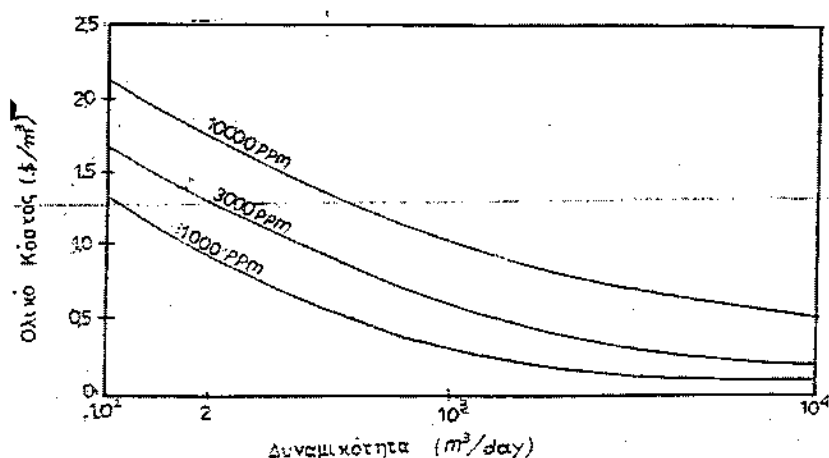
Το κόστος της μονάδας παραγόμενου νερού διαμορφώνεται όπως και στην αντίστροφη όσμωση από τα σταθερά έξοδα (απόσβεση πάγιου κεφαλαίου, δαπάνες συντήρησης) και τα κυρίως λειτουργικά έξοδα (αντικατάσταση μεμβρανών και διατάξεων ροής, ενέργεια). Το κόστος μεμβρανών είναι ανάλογο της επιφάνειας, ανεξάρτητα από το αν αυτή προστίθεται υπό τη μορφή μεγαλύτερων κελιών ή μεγαλύτερου αριθμού μικρότερων κελιών. Η σχέση δημιουργεί ένα οικονομικό πρόβλημα στον σχεδιασμό της εγκατάστασης.

Μεγάλη συνολική επιφάνεια μεμβρανών, συνεπάγεται μικρότερη κατανάλωση ενέργειας απαιτεί υψηλό πάγιο κεφάλαιο ζωτικής σημασίας παράμετρο αποτελεί, επομένως, το ειδικό κόστος της μεμβράνης. Οι διάφοροι κατασκευαστές έχουν φθάσει στην ίδια τάξη μέγιστου μεγέθους επιφάνειας πέραν του οποίου δεν υπάρχει πρακτική αξία. Τα μεγέθη αυτά βρίσκονται περίπου μεταξύ 0,50 -1,50 m<sup>2</sup> και μέχρι 300 ζεύγη κελιών τοποθετημένα μεταξύ δύο απλών ηλεκτροδίων.

Οι μεμβράνες, που ως γνωστόν είναι μεμβράνες ιονεναλλαγής, αποτελούν το πιο ευαίσθητο στοιχείο από πλευράς ειδικού κόστους λειτουργίας και ηλεκτρικής αντίστασης. Η αντικατάσταση μεμβρανών γίνεται ανά 5-10 χρόνια περίπου (πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης). Η συμμετοχή τους στο κόστος νερού, στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι της τάξης 10-15%. Όσον αφορά την επίδραση της μορφής των διατάξεων ροής στο κόστος προϊόντος, φαίνεται ότι η δαιδαλώδης διάταξη παρέχει ελαφρώς χαμηλότερο κόστος από την μορφή «φύλλου». PDGPDGPD

Η κατανάλωση ενέργειας είναι πολύ μεγαλύτερη από την θεωρητικά απαιτούμενη, γεγονός που αποδίδεται στους εξής λόγους: ύπαρξη υπερτάσεων στα ηλεκτρόδια, πόλωση συγκεντρώσεως στις διεπιφάνειες μεμβρανών –διαλύματος, καταναλισκόμενη ενέργεια λόγω φαινομένου Joule, μη τέλεια εκλεκτικότητα των μεμβρανών και ύπαρξη ενός χαμηλού αριθμού μεταφοράς, για το νερό. Η ενέργεια όπως και η χρήση μεμβρανών στην ηλεκτροδιαπίδυση, βρίσκονται σε άμεση σχέση με την ποσότητα των αλάτων στο ακατέργαστο νερό. Αξιοσημείωτη είναι η παρατήρηση ότι για αφαλάτωση υφάλμυρου νερού από 1800 σε 300 PPM απαιτούνται μόλις 1,6 Kwh/m<sup>3</sup> ενώ για υποβιβασμό της περιεκτικότητας από 4500 σε 300 απαιτούνται 5 Kwh/m<sup>3</sup>. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει το ενδιαφέρον που παρουσιάζει η ηλεκτροδιαπίδυση για την αφαλάτωση υφαλμυρών νερών, πτωχών σε άλατα.

Το κόστος αφαλάτωσης, για μια μέση περιεκτικότητα αλάτων (2500-3500 ppm), βρίσκεται μεταξύ \$ 0,50 ÷ \$ 0,20/m<sup>3</sup> περίπου ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης. (Οι αντίστοιχες τιμές για την αντίστροφη ώσμωση είναι γειτονικές). Στο παρακάτω διάγραμμα σχήμα 36 παρουσιάζεται το κόστος μιας μονάδας συνάρτησης του μεγέθους αυτού.



Σχήμα 36: Κόστος αφαλάτωσης συναρτήσει δυναμικότητας

#### 6.4 ΠΡΟΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Ένα σύμφυτο μειονέκτημα των διεργασιών που χρησιμοποιούν για το διαχωρισμό μεμβράνες, αποτελεί η επικαθιση κολλοειδών σωμάτων επ'αυτών, με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η ενεργός επιφάνεια μεταφοράς κι έτσι να μειώνονται οι ρυθμοί διαχύσεων, καθαρού νερού στην αντίστροφη ώσμωση ή αλάτων στην ηλεκτροδιαπίδυση. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας και άρα επιβάρυνση της οικονομίας.

Για την διατήρηση της δυναμικότητας σε σταθερό ρυθμό, είναι απαραίτητο να παραμένουν οι μεμβράνες ελεύθερες από τις διάφορες αποθέσεις.

Τούτο μπορεί να επιτευχθεί με τους ακόλουθους τρόπους:

- Περιοδική διακοπή της λειτουργίας, εξαγωγή των μεμβρανών και μηχανική απομάκρυνση των επικαθίσεων. Ο τρόπος αυτός φαίνεται πρωτόγονος και αντιοικονομικός με την ύπαρξη μεγάλου νεκρού χρόνου στη λειτουργία της εγκατάστασης και την ανάγκη ενός σημαντικού αριθμού ανθρώπινων ωρών εργασίας.

- Απομάκρυνση των ξένων υλών με χημικά μέσα. Η εισαγωγή αυτού του τρόπου συνεπάγεται σημαντική μείωση των εξόδων συντήρησης των μεμβρανών π.χ. 60%

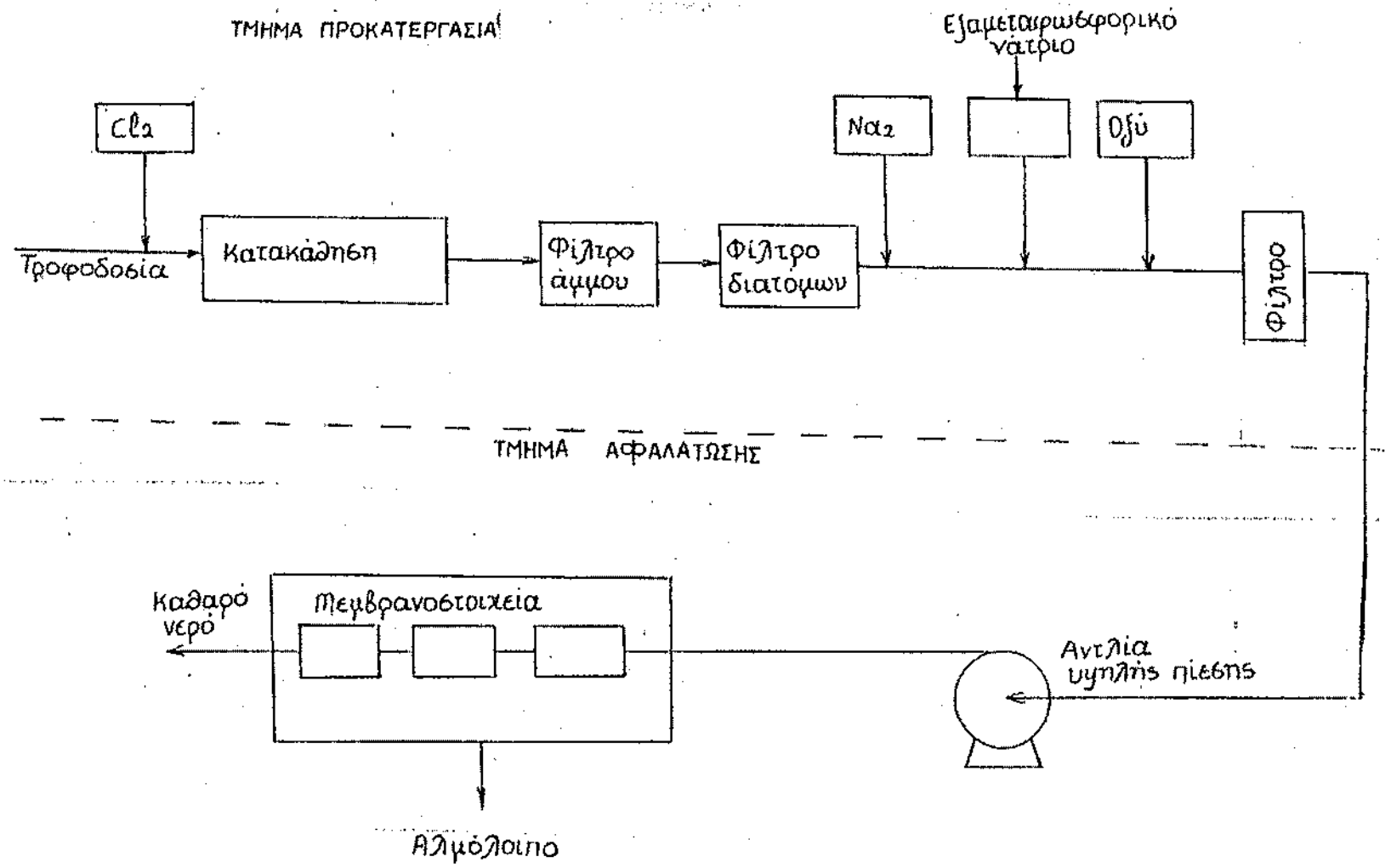
- Επαρκής και εκτεταμένη προκατεργασία του νερού τροφοδοσίας. Παρά το γεγονός ότι η σχετική τεχνολογία είναι αρκετά γνωστή το είδος και η έκταση της απαιτούμενης προκατεργασίας ποικίλει ευρύτατα με την πηγή του υφάλμυρου νερού και τη χημική του σύνθεση.

Για κάθε είδους νερό (επιφανειακό, χαμηλής ή υψηλής σκληρότητας, νερό με παρουσία οργανικών ενώσεων κλπ) σημειώνεται ότι για την αντίστροφη ώσμωση με μεμβράνες τριχοειδών και πορώδων σωλήνων, απαιτείται η μέγιστη και ελάχιστη αντίστοιχα δυνατή προκατεργασία. Όσον αφορά την ηλεκτροδιαπίδυση, η όλη εγκατάσταση πρέπει να είναι αυστηρά προσαρμοσμένη στη φύση του νερού κατεργασίας, καθόσον είναι λίαν ευαίσθητη και στην ελάχιστη παρουσία ξένου σώματος, ή αιωρήματος, η δε κατανάλωση χημικών αντιδραστηρίων είναι άμεσα εξαρτημένη από τη φύση και την ποσότητα των αλάτων τροφοδοσίας.

Το κόστος προκατεργασίας αποτελεί σημαντικό παράγοντα διαμόρφωσης του κόστους προϊόντος. Για ένα συνηθισμένο ποσοστό ανάκτησης (60-70%) τα έξοδα προκατεργασίας και της κύριας διεργασίας μπορούν να κυμαίνονται στο αυτό επίπεδο ενώ για υψηλές ανακτήσεις (95%) οι δαπάνες του τμήματος των μεμβρανών υπερέχουν σημαντικά.

Στο παρακάτω σχήμα 37 δίδεται μια γενικευμένη διάταξη προκατεργασίας για μια μονάδα αντίστροφης ώσμωσης.

Άμεση σχέση, με το είδος του νερού προς αφαλάτωση και της προκατεργασίας, έχει το ποσοστό ανάκτησης νερού το οποίο βέβαια, επηρεάζεται και από τοπικούς κανονισμούς περιβάλλοντος, όσον αφορά την απομάκρυνση αλμολοίπων. Το σκληρό νερό, που απαιτεί μεγαλύτερη προκατεργασία από το μαλακό, για να φθάσει μια ισοδύναμη ανάκτηση με το δεύτερο, επιβαρύνεται με αυξημένες πάγιες και λειτουργικές δαπάνες όσο το ποσοστό ανάκτησης είναι μεγαλύτερο. Παράλληλα όμως εάν η πηγή νερού είναι ορισμένη, και η απομάκρυνση αλμολοίπων δαπανηρή, που σημειωτέον μπορεί να συμμετάσχει στο κόστος αφαλάτωσης υπό ευρεία κλίμακα δαπανών (15-75%), τότε γίνεται επιθυμητός και άλλοτε οικονομικός ο σχεδιασμός της εγκατάστασης (προσθήκη περισσότερων βαθμίδων, εσωτερικών αντλιών κλπ) υπό υψηλή ανάκτηση μέχρι 95%>



Σχήμα 37: Γενικευμένο σχήμα προκατεργασίας Ρ. Ο



## **6.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΕΚΛΟΓΗ ΜΙΑΣ ΜΕΘΟΔΟΥ**

Για να καταστεί δυνατή η σύγκριση και στη συνέχεια η εκλογή μεταξύ αντίστροφης ώσμωσης (R.O) και ηλεκτροδιαπίδωσης (E.Δ) πρέπει να ληφθούν αρκετοί παράγοντες από τους οποίους οι κυριώτεροι είναι η φύση και το ποσοστό των αλάτων στο προς κατεργασία νερό, η ωριαία ή ημερήσια επιθυμητή παραγωγή, οι πηγές ενέργειας ως και οι διακυμαινόμενες κατά τόπους τιμές της. Η σύγκριση μπορεί να γίνει εξετάζοντας συγχρόνως επένδυση και έξοδα λειτουργίας τα οποία προκύπτουν αναλυτικά από όλους τους παράγοντες που φέρουν μαζί τους κόστος. Η επένδυση δια της απόσβεσης των εγκαταστάσεων υπεισέρχεται στο κόστος παραγόμενου νερού το οποίο είναι και το καθοριστικό κριτήριο για την επίτευξη σύγκρισης.

Η αδυναμία αποκάλυψης λεπτομερώς όλων των παραγόντων υπό μορφή κόστους (λόγω ποικιλομορφίας, διακυμάνσεων κλπ) που διαμορφώνουν την όλη οικονομία της διεργασίας, μας ωθεί στους κατ'εκτίμηση κυριότερους εξ'αυτών που είναι αποφασιστικοί στη δημιουργία του ολικού κόστους. Από την ανάλυση στις προηγούμενες παραγράφους, έγινε γνωστό ότι η ενέργεια και η αντικατάσταση μεμβρανών και των συναφών εξαρτημάτων συμβάλουν μέγιστα στο κόστος αφαλάτωσης. Ιδιαίτερα η πρώτη έχει πρόσθετη σημασία τα τελευταία χρόνια με την όλο και επιτακτικότερη ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας και κατ'ακολουθία κατέχει βαρύνουσα θέση στον καθορισμό της οικονομικότερης μεθόδου για αφαλάτωση.

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα η αντίστροφη ώσμωση (R.O) και ηλεκτροδιαπίδωσης (E.Δ) είναι κατ'εξοχήν διεργασίες που

καθιερώθηκαν ως εμπορικές μέθοδοι για την αφαλάτωση υφάλμυρων νερών.

Η περιοχή περιεκτικότητας σε άλατα του ανώτερου είδους νερού κυμαίνεται από 1000-5000 ppm η οποία αποτελεί και το πεδίο σύγκρισης.

Η αναζήτηση της επίδρασης της περιεκτικότητας των αλάτων του κατεργαζόμενου νερού, αυτής του λαμβανομένου προϊόντος ως και του μεγέθους της εγκατάστασης, στην εκλογή της μιας ή της άλλης διεργασίας που αποτελούν τις εξωτερικές παραμέτρους, καθορίζει κύρια το πεδίο οικονομικής λειτουργίας καθεμιάς. Παράλληλα, αποτελεί ανάγκη η εξέταση της λειτουργικότητας των δύο μεθόδων από τεχνικής πλευράς για να ολοκληρωθεί η σύγκριση και εκλογή.

Κατόπιν των ανωτέρω παρατίθεται σύντομα το πρόβλημα αριστοποίησης του κόστους αφαλάτωσης στην αντίστροφη ώσμωση και ηλεκτροδιαπίδυση. Αν λάβουμε σαν συνάρτηση το άθροισμα: απόσβεση πάγιου κεφαλαίου ÷ κόστος λειτουργίας (ενέργεια και αντικατάσταση μεμβρανών) και κριτήριο ελάχιστο κόστος αφαλάτωσης έχουμε:

$$Pc = \alpha + \beta\chi + c\chi^{-1}$$

όπου:

$\chi$ : η μεταβλητή  $\chi$  αντιστοιχεί σε πίεση για την αντίστροφη όσμωση και ηλεκτρική τάση για την ηλεκτροδιαπίδυση

$\beta\chi$ : κόστος ενέργειας απαραίτητης για την λειτουργία διεργασίας

$c\chi$ : κόστος σχετιζόμενο με την επιφάνεια διαχύσεως

Το κόστος νερού  $Pc$  γίνεται ελάχιστο όταν:

$$\frac{dPr}{dx} = \beta - \frac{c}{x^2} = 0 \quad \text{ή} \quad X_{opt} = \left(\frac{c}{\beta}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Η τιμή  $X_{opt}$  εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από οικονομικά δεδομένα (κόστος επιφάνειας και ενέργειας, παράγων απασχόλησης εγκατάστασης, κλπ). Για την τιμή αυτή το κόστος ενέργειας γίνεται ίσο με το κόστος αντικατάστασης των μεμβρανών.

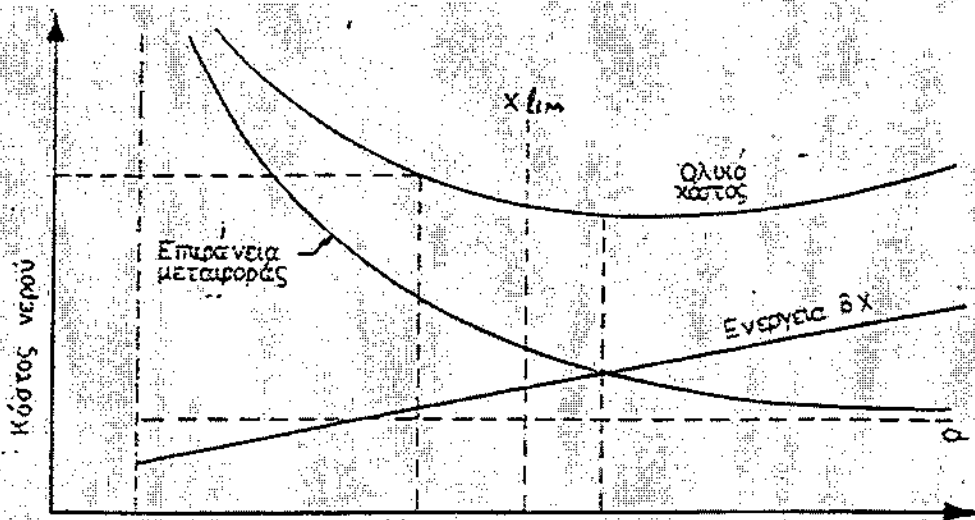
Επομένως είναι :

$$Pr_{min} = \alpha + 2(\beta c)^{\frac{1}{2}}$$

Ανεξάρτητα από την παραπάνω οικονομική θεώρηση υπάρχουν τεχνικά εμπόδια που περιορίζουν τη διακύμανση της μεταβλητής  $X$ . Οι περιορισμοί αυτοί επιβάλλονται λόγω συνθηκών αντιστρεπτότητας (κατώτερο όριο) που σημαίνει ελάχιστη πίεση και τάση για να συμβαίνουν αντίστοιχα αντίστροφη ώσμωση (R.O) και ηλεκτροδιάχυση των ιόντων, και προβλημάτων όπως είναι η συμπίεση μεμβρανών και η πόλωση συγκεντρώσεως (ανώτερο όριο). Εξ'αυτών έπεται ότι σε περιπτώσεις που ευρίσκεται  $X_{opt} > X_{lim}$ , επιβάλλεται η λειτουργία σε τιμές κατώτερες του ανώτερου ορίου. Βλέπε σχήμα 38.

Όπως έχει αναφερθεί, τα έξοδα ενέργειας στην ηλεκτροδιαπίδυση (E.D) αποτελούν άμεση συνάρτηση της ποσότητας των αλάτων.

Η επιβάρυνση του κόστους νερού ενώ κυμαίνεται σε λογικά πλαίσια για μέτρια ή πτωχά υφάλμυρα νερά (3.000- 1.000 PPM) γίνεται δυσμενής σε περιεκτικότητες άνω των 3.000 PPM.



Σχήμα 38: Αριστοποίηση μονάδας R.O και E.D

Συγκριτικά έχουμε περίπου

TDS	1.500 → 2.500 → 4.500	PPM
E.D	1,5 → 3 → 5	$\frac{KWH}{m^3}$
R.O	τάξης 2-3	

Εκτός από τους ενεργειακούς λόγους, σημειώνονται και οι εξής παρατηρήσεις:

Όσον αφορά τις μεμβράνες το μεν ειδικό κόστος ποικίλει (μέγεθος επιφάνειας, δυνατότητα βιομηχανικής παραγωγής σε ευρεία κλίμακα κ.α). Οι πολλαπλάσια κατώτερες τιμές για τις μεμβράνες από νάυλον, αντισταθμίζονται από την ανάγκη για πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια. Ενώ η διάρκεια ζωής των μεμβρανών ιονοεναλλαγής είναι υπερδιπλάσια, υπάρχει το πρόβλημα της επιφάνειας μεταφοράς που αυξάνεται ταχύτερα με την περιεκτικότητα των αλάτων από εκείνη της

αντίστροφης ώσμωσης (R.O). Εκτιμάται ότι στην αντίστροφη ώσμωση (R.O) είναι:

$$S \sim C^{0.3} \text{ και στην ED: } S \sim C^{0.8}$$

Όπου:

S: συνολική επιφάνεια μεταφοράς (m<sup>2</sup>)

C: περιεκτικότητα αλάτων (G/L)

Αποτέλεσμα είναι η πέρα μιας συγκέντρωσης μεγαλύτερη επιβάρυνση κόστους από την αύξηση των ενεργειακών αναγκών.

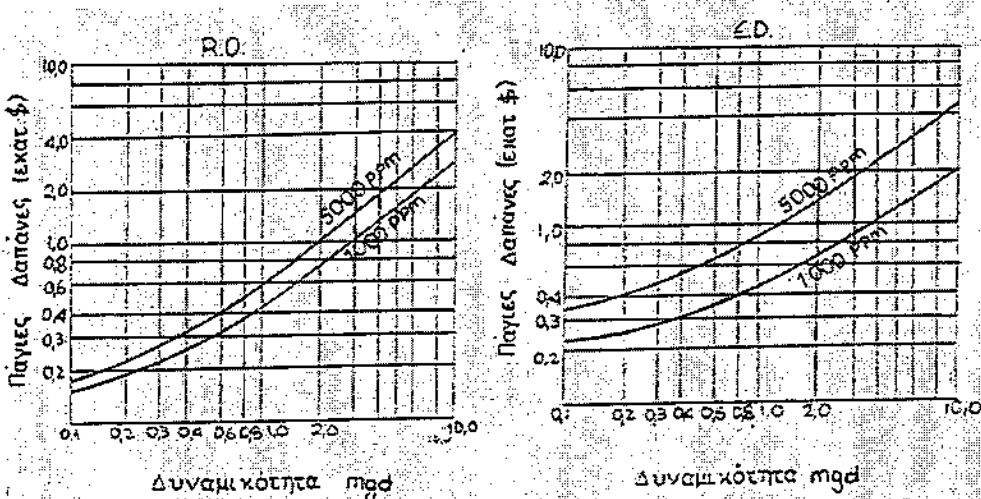
Στα παραπάνω μπορεί να θεωρηθεί ότι η αντίστροφη ώσμωση (R.O) λόγω μεγαλύτερης αплότηας επιβαρύνει σε μικρότερο ποσοστό το κόστος νερού με δαπάνες επίβλεψης και συντήρησης, οι οποίες πάντα παρά τη δυσκολία εκτίμησης του δεν μπορεί να αμεληθούν.

Ακόμα υπάρχει η πεποίθηση ότι η ηλεκτροδιαπίδυση (E.D) είναι διεργασία, με έντονο χαρακτήρα επίδρασης στο κόστος των λειτουργικών δαπανών, παρά στην απόσβεση του κεφαλαίου, για μεγάλες περιεκτικότητες αλάτων.

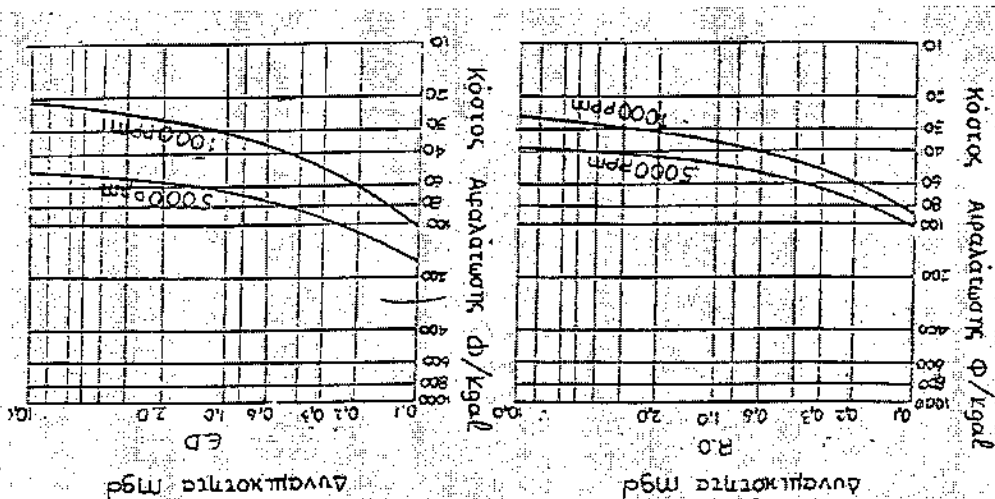
Παρά τα παραπάνω δυσμενή στοιχεία, στην περιοχή 1.000-3.000 PPM περίπου, η ηλεκτροδιαπίδυση (E.D) παρουσιάζεται σαν λίαν συναγωνίσιμη μέθοδος και ενδεχομένως πιο οικονομική, από την αντίστροφη ώσμωση (R.O). Πλήρης και σαφής προσδιορισμός του πεδίου υπεροχής καθεμιάς, στην αφαλάτωση πτωχών ή μετρίως υφαλμυρών νερών, δεν μπορεί να γίνει με βεβαιότητα. Από τις παρατιθέμενες παρακάτω όμως καμπύλες, που αποτελούν γενίκευση των περιπτώσεων κόστους διαφαίνεται η επίδραση του παράγοντος μεγέθους εγκατάστασης. Που σημαίνει ότι μπορούσε να ειπωθεί ότι η ED

Αφαλάτωση Θαλασσινού Νερού σε Πόσιμο

βρίσκεται σε πλεονεκτικότερη θέση έναντι της αντίστροφης ώσμωσης, όταν η δυναμικότητα υπερβεί λίγες εκατοντάδες χιλιάδες γαλόνια. (Βλέπε σχήματα 39,40,41 και 42).



Σχήματα 39, 40: Μεταβολή παγίων δαπανών συναρτήσει δυναμικότητας και συγκέντρωσης τροφοδοσίας.



Σχήματα 41,42: Κόστος αφαλάτωσης συναρτήσει δυναμικότητας και συγκέντρωσης τροφοδοσίας.

Οι καμπύλες αυτές περιλαμβάνουν κόστος μεμβρανών και λοιπών συναφών σωληνώσεων, οργάνων ελέγχου προκατεργασίας κλπ. δεν

περικλείουν όμως το κόστος άντλησης του υφάλμυρου νερού και τροφοδοσίας αυτού στην εγκατάσταση, όπως επίσης διανομής του παραγόμενου νερού και απομάκρυνση αλμολοίπων. Η περιεκτικότητα του λαμβανόμενου νερού θεωρείται η των 500 ppm που προκύπτει όπου είναι οικονομικά επιτρεπτό, από ανάμειξη ρευμάτων τροφοδοσίας και προϊόντος. Από τις καμπύλες αυτές καταφαίνεται επίσης η ελάττωση των δαπανών λειτουργίας και επένδυσης (ανά μονάδα παραγόμενου νερού) με αύξηση της δυναμικότητας.

Η ποιότητα του παραγόμενου νερού ασκεί κι αυτή επίδραση στην οικονομία των μεθόδων. Η ελάττωση της περιεκτικότητας αρκετά κάτω των 500 ppm που αποτελεί το ανώτερο όριο για τον χαρακτηρισμό του νερού σαν πόσιμο, επιβαρύνει την ηλεκτροδιαπίδυση με επιπλέον βαθμίδες, από τις 2-3 συνήθως χρησιμοποιούμενες, με αποτέλεσμα αύξηση των λειτουργικών εξόδων και επενδύσεων που ξεπερνούν το κόστος της αντίστροφης ώσμωσης για παρόμοιες συνθήκες ακόμη και όταν η ποιότητα του τροφοδοτούμενου νερού καθιστά αυτή αρκετά συναγωνίσιμη.

Όσον αφορά το ποσοστό ανάκτησης νερού, εκείνο που μπορεί να ειπωθεί για αμφότερες τις διεργασίες, είναι ότι υπάρχει η γενική τάση προς χαμηλότερο κόστος νερού με αύξηση της ανάκτησης μέχρι του ορίου που δημιουργούνται προβλήματα από τις αποθέσεις, αναλόγως του είδους του χρησιμοποιούμενου νερού. Για την άρση του εμποδίου αυτού απαιτείται περαιτέρω προκατεργασία που φυσικά συνεπάγεται μια ορισμένη αύξηση του κόστους λειτουργίας.

Από τεχνικής πλευράς μπορούμε να αποδώσουμε στην ηλεκτροδιαπίδυση μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στην σύνθεση της, και

δυσκολία στη λειτουργία της σε σχέση με την αντίστροφη ώσμωση παρά το ότι λειτουργεί ομαλά και αποδοτικά για αρκετά χρόνια.

Μετά την παραπάνω παράθεση γενικών στοιχείων, που συνηγορούν σε βασικές γραμμές υπέρ της εκλογής της μιας ή της άλλης μεθόδου, προβαίνουμε σε αριθμητική εκτίμηση του κόστους τυπικών μονάδων αυτού του είδους, γεγονός που παρέχει καθαρότερη εικόνα της οικονομίας των δύο διεργασιών και δείχνει το μέτρο συμφωνίας των αποτελεσμάτων με εκείνα που δίδονται στην βιβλιογραφία. Οι τιμές και τα μεγέθη των μονάδων που χρησιμοποιούνται παρακάτω απορρέουν από εξέταση παρόμοιων περιπτώσεων στη βιβλιογραφία ή και εκτός αυτής εκτιμήσεων.

Θεωρούμε δύο μεγέθη δυναμικότητας εγκαταστάσεων, μια των 100.000 GPD (380 m<sup>3</sup>/d) που ανταποκρίνεται σε μια συνηθισμένη περίπτωση μεσαίου μεγέθους, και μια των 500.000 GPD (1900 m<sup>3</sup>/d) που αντιπροσωπεύει ένα μικρότερο ποσοστό περιπτώσεων, αυτών με υψηλή δυναμικότητα, θεωρούμε επίσης μια μέση συγκέντρωση αλάτων νερού, ήτοι 2500 PPM, που βρίσκεται εξ άλλου στην περιοχή των μέτρια υφαλμυρών νερών όπου η ηλεκτροδιαπίδωση γίνεται υψηλά συναγωνίσιμη με την αντίστροφη ώσμωση. Συγκέντρωση λαμβανομένου καθαρού νερού, θεωρείται για με την αντίστροφη ώσμωση αρκετά κάτω των 500 PPM (π.χ. 200 PPM) πράγμα που επιτυγχάνεται σε μια μόνο βαθμίδα, για δε την ηλεκτροδιαπίδωση ή των 500 PPM διότι όπως έχει αναφερθεί η απόληψη προϊόντος πολύ χαμηλής συγκέντρωσης, προϋποθέτει αύξηση των βαθμίδων, δηλαδή περαιτέρω πάγιες και λειτουργικές δαπάνες.

Στην περίπτωση των 500 PPM είναι π.χ.



2.500 ppm 1 βαθμίδα 1.200 ppm 2 βαθμίδα 500 ppm

## **6.6 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ**

Η ποικιλία των μεθόδων και τα διαφορετικά τους χαρακτηριστικά καθώς και η ύπαρξη διαφορετικής κάθε φορά ποιότητας νερού τροφοδοσίας και διαφορετικών απαιτήσεων για το προϊόν, δημιουργούν την ανάγκη τεchnοοικονομικής αξιολόγησης και επιλογής της καταλληλότερης για την κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή.

Τα κριτήρια αξιολόγησης που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την αξιολόγηση είναι:

- Η ευαισθησία της μεθόδου απέναντι στα χαρακτηριστικά του νερού τροφοδοσίας, δηλαδή περιεκτικότητα ολικών διαλυμένων στερεών (TDS), δείκτη θολότητας (SDI), συγκέντρωση μικροοργανισμών, θερμοκρασία

- Η καθαρότητα του προϊόντος

- Το στάδιο ανάπτυξης της κάθε μιας μεθόδου ειδικά ως προς τα βασικά του στοιχεία όπως η ενεργειακή κατανάλωση ανά μονάδα παραγόμενου προϊόντος, η διαβρωτικότητα του προϊόντος για τα δίκτυα της πόλης, ο τύπος και ο βαθμός αντικατάστασης των μεμβρανών κλπ.

- Οι απαιτήσεις για την προκατεργασία του νερού τροφοδοσίας (ρύθμιση PH, φίλτρανση, καταστροφή μικροοργανισμών και σε μετακατεργασία του παραγόμενου νερού.

- Οι απαιτήσεις σε εξειδικευμένο προσωπικό

- Η απαιτούμενη συντήρηση του εξοπλισμού

- Η ευελιξία και η αξιοπιστία της μεθόδου

Η διαδικασία αξιολόγησης και η κατάταξη των μεθόδων για κάθε συγκεκριμένη περίπτωση εξαρτώνται από το συντελεστή βαρύτητας που θα καθορίσουμε για το καθένα κριτήριο. Είναι προφανές ότι μια μέθοδος που προκρίνεται σε μια περίπτωση μπορεί να μην είναι κατάλληλη σε μια άλλη.

Στην επιλογή συνυπολογίζονται φυσικά και τα κριτήρια κόστους, δηλαδή:

α) Κόστος επένδυσης

β) Κόστος λειτουργίας, που είναι κυρίως:

- ενέργεια

- εργατικά

- χημικά και άλλα υλικά λειτουργίας και συντήρησης

- αντικατάσταση φίλτρων και μεμβρανών (για τις μεθόδους μεμβρανών).

Το κόστος επένδυσης διαφοροποιείται ανάλογα με:

- τη δυναμικότητα της μονάδας

- την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας

- την απαιτούμενη προεπεξεργασία

- την θερμοκρασία λειτουργίας

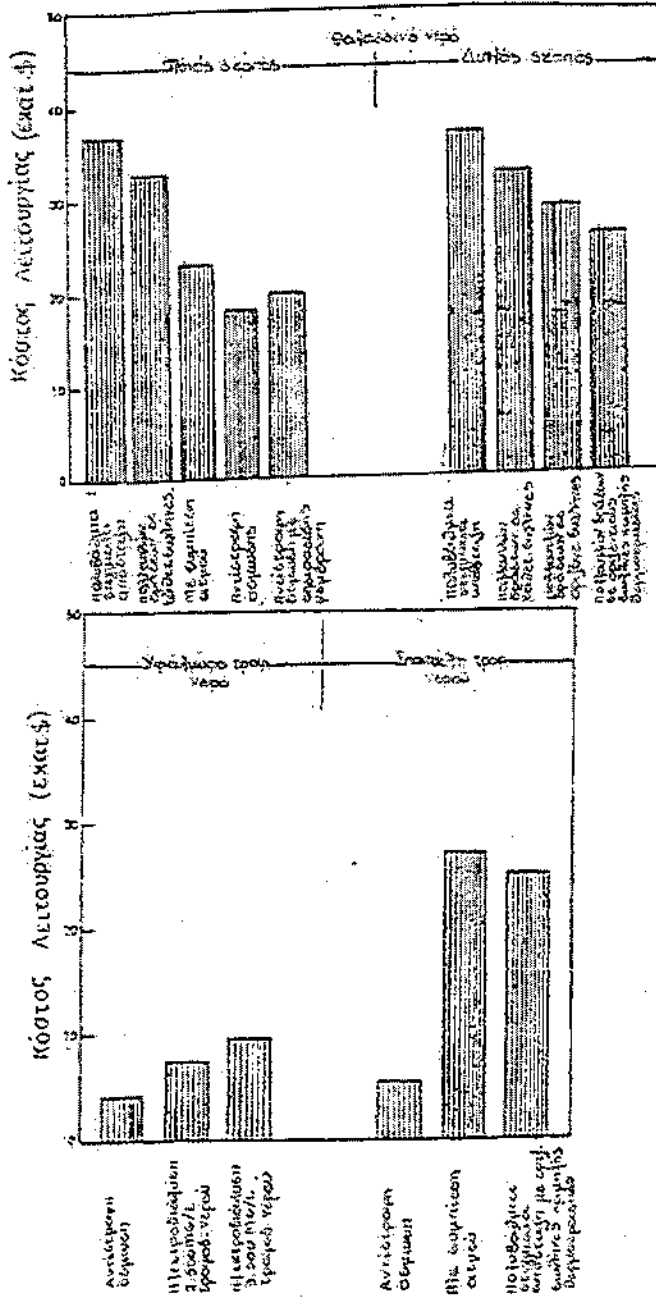
- τη φιλοσοφία σχεδιασμού της μονάδας ( υλικά αυτοματισμοί, διάταξη εξοπλισμού κλπ).

Γενικά, οι μέθοδοι μεμβρανών έχουν χαμηλότερο κόστος επένδυσης, ιδιαίτερα στις μικρότερης δυναμικότητας μονάδες.

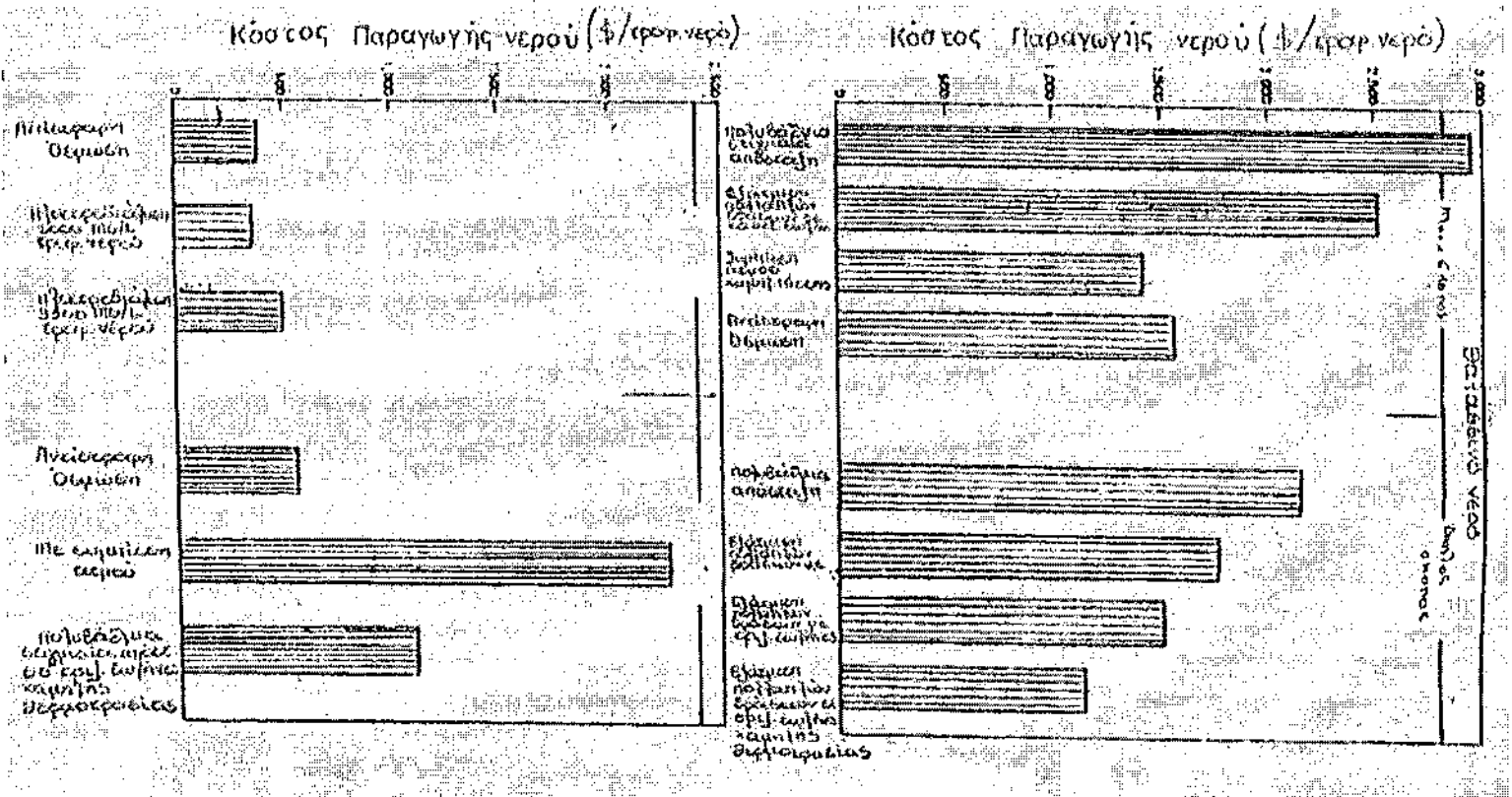
Στο σχήμα 44 υπάρχει μια συγκριτική απεικόνιση του κόστους επένδυσης για δυναμικότητα 19.000 m<sup>3</sup>/d στις ΗΠΑ (1982).

Όσον αφορά το κόστος λειτουργίας, οι μέθοδοι μεμβρανών είναι ασυναγώνιστες για το υφαλμυρό νερό, ενώ για το θαλασσινό νερό η μέθοδος να, σε μονάδες με αποκλειστικό σκοπό την αφαλάτωση και η μέθοδος ΜΕ, σε μονάδες που συνδυάζονται με άλλες και αξιοποιούν την απορριπτόμενη θερμότητα τους έχουν κόστος λειτουργίας συγκρινόμενο με την αντίστροφη ώσμωση.

Στο σχήμα 43 απεικονίζεται το κόστος λειτουργίας των μονάδων του σχήματος 44.



Σχήμα 43: Δίνεται μια συγκριτική απεικόνιση του κόστους επένδυσης για δυναμικότητα 19.000 m<sup>3</sup>/d στις ΗΠΑ (1982).



Σχήμα 44: Δεικνύεται το κόστος λειτουργίας των μονάδων του σχήματος 43.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7**

### **Η ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΣΑΝ ΜΙΑ ΣΥΜΦΕΡΟΥΣΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΠΗΓΗ ΝΕΡΟΥ**

#### **7.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Η χρήση της αφαλάτωσης αποτελεί μια εναλλακτική λύση στη μεταφορά πόσιμου νερού από μακρινή απόσταση, και οι αποφάσεις που θα καθορίζουν τη δυνατότητα ή μη εφαρμογής της, θα πρέπει να λαμβάνονται σε οικονομική βάση. Το οικονομικό αυτό πρόβλημα γίνεται πιο σύνθετο από τη στιγμή που φυσικές πηγές νερού για οικιακή και αγροτική χρήση χρησιμοποιούνται ή ένα δυνατό να χρησιμοποιηθούν για υδροηλεκτρική πηγή ενέργειας, ποτάμιες μεταφορές κλπ. κατά συνέπεια, το κόστος της μεταφοράς νερού από μια απομακρυσμένη ορεινή λίμνη π.χ ή από μια οποιαδήποτε φυσική δεξαμενή με σκοπό την αύξηση του υδάτινου αποθέματος μιας περιοχής για συγκεκριμένη χρήση, πρέπει να συσχετίζεται με τη σπουδαιότητα των διαφόρων πιθανών χρήσεων του αποθέματος της φυσικής αυτής δεξαμενής.

Το κόστος μεταφοράς νερού κατάλληλου για χρήση παρουσιάζει πολύ μεγάλες διακυμάνσεις ανάλογα με την περιοχή, την απόσταση, τις συνθήκες γενικότερα μεταφοράς.

Αναφέρονται συγκεκριμένα μεγέθη κόστους μεταφοράς μεταξύ \$ 0,25 και 7.000 ανά KGAL. Το κόστος αυτό εξαρτάται αντίστροφα ανάλογα (προσεγγιστικά βέβαια και για συγκεκριμένες περιοχές τιμών) από την ποσότητα του μεταφερόμενου νερού. Έτσι, για σωληνώσεις μικρής διαμέτρου το κόστος μπορεί να καταστεί απαγορευτικό. Σε ανάλογες

περιπτώσεις είναι δυνατό μια νέα εγκατάσταση αφαλάτωσης που θα εκμεταλλεύεται τα τοπικά αποθέματα αλμυρού νερού να είναι οικονομικώς συμφερότερη από την εγκατάσταση μιας νέας σωλήνωσης.

Το οικονομικό καθεστώς της αφαλάτωσης συγκρινόμενο με την μεταφορά κατάλληλου νερού εξ'αποστάσεως είναι σπανιότατα ξεκαθαρισμένο. Συχνά, η απόφαση για τον τρόπο ικανοποίησης των αναγκών σε νερό που θα εκλεγεί είναι πολύ δύσκολη και επιτείνεται από την σύγκυση μεταξύ κόστους και τιμής πώλησεως, ειδικά εκεί που αναμειγνύεται η δημοτική ιδιοκτησία. Στην τελευταία περίπτωση συχνά η τιμή πώλησεως του νερού βασίζεται κυρίως στο ύψος ολόκληρης της επένδυσης, με αποτέλεσμα να είναι σημαντικά χαμηλότερη από την τιμή με βάση την απόσβεση της επένδυσης αυτής.

Πέρα όμως από αυτό παρουσιάζεται και πρόβλημα επιλογής της κατάλληλης μεθόδου αφαλάτωσης, καθώς είναι δυνατό σε μια συγκεκριμένη περίπτωση να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε από αυτές τις μεθόδους.

Κατά συνέπεια, ορθό είναι να συνυπολογίζονται οι ιδιαιτερότητες της κάθε εφαρμογής, ώστε να προσδιορισθεί κατά πόσο συμβαδίζουν με τα δυνατά ή αδύνατα σημεία της κάθε μεθόδου. Παράγοντες καθοριστικής σημασίας είναι τα χαρακτηριστικά του νερού τροφοδοσίας, η ποσότητα και καθαρότητα του προϊόντος νερού που θα προέλθει από την αφαλάτωση (ανάλογα με το που προορίζεται), το κόστος ενέργειας και επένδυσης καθώς και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του τόπου εφαρμογής.

Σαν τέτοιο π.χ. μπορεί να θεωρηθεί ένας κοντινός θερμοηλεκτρικός σταθμός, με δυνατότητες χρησιμοποίησης ατμού χαμηλής πίεσης για τη μέθοδο της απόσταξης.

Τα συστατικά του κόστους για μια εγκατάσταση αφαλάτωσης είναι σε γενικές γραμμές τα εξής:

1. Πάγιο κόστος σχετικό με επένδυση κεφαλαίου στον εξοπλισμό της εγκατάστασης
2. Κόστος χρησιμοποιούμενης για παραγωγή νερού θερμικής ενέργειας
3. Κόστος απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία αντλιών και άλλων βοηθητικών μηχανών.
4. Κόστος επίβλεψης, συντήρησης και λειτουργίας, το οποίο περιλαμβάνει εργασία και υλικά
5. Κόστος σχετιζόμενο με τη θέση και τα κτίρια
6. Γενικά έξοδα

Οι βασικότεροι παράγοντες που καθορίζουν το κόστος του νερού είναι στις περισσότερες περιπτώσεις οι τρεις πρώτοι ενώ ο 4<sup>ος</sup> αποτελεί κύριο αντικείμενο της έρευνας για μείωση του κόστους.

## **7.2 ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ**

### **1. Κέρκυρα**

Μονάδα αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού με ηλεκτροδιαπίδυση. Έχει δυναμικότητα 15.000 κυβικά m<sup>3</sup>/day και τροφοδοτεί το δίκτυο της πόλης. Εγκαταστάθηκε το 1978.

### **2. Μύκονος**

α) Μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με αντίστροφη όσμωση. Δυναμικότητα 500 m<sup>3</sup>/day. Εγκαταστάθηκε το 1983 και χρησιμοποιεί



μεμβράνες της εταιρίας Dupont κόστος επένδυσης 146.735,14 € (σε τιμές έτους 1983).

β) Μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με αντίστροφη ώσμωση. Δυναμικότητα 1.200 m<sup>3</sup>/day. Η εγκατάσταση άρχισε το 1978 και λειτούργησε το καλοκαίρι του 1988. Το κόστος επένδυσης έφτασε τα 1.276.595,74 εκατομμύρια € (τιμές 1987).

### **3. Ιθάκη**

Μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού έχει τα ίδια τεχνολογικά χαρακτηριστικά με την (α) της Μυκόνου.

### **4. Σύρος**

α) Μονάδα απόσταξης με εκτόνωση σε πολλαπλές βαθίδες (MSF). Δυναμικότητας 1000 m<sup>3</sup>/day . Η παραγωγή 1 ton H<sub>2</sub>O απαιτεί 8-8,5 lit μαζούτ.

β) Μονάδα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση η οποία έχει δυναμικότητα 1.200 m<sup>3</sup>/day και κόστος επένδυσης 1.276.595,74 εκατομμύρια €.

Το λειτουργικό κόστος εκτιμάται μεταξύ 0,29-0,32 € ανά κυβικό μέτρο προϊόντος (βλέπε και παράγραφο 7,3).

### **5. Νίσυρος**

α) Μονάδα αφαλάτωσης με ηλιακή ενέργεια. Εγκαταστάθηκε στην δεκαετία του 1960 και σήμερα έχει εγκαταλειφθεί.

β) Μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με αντίστροφη ώσμωση. Δυναμικότητας 300 m<sup>3</sup>/day. Είναι υπό εγκατάσταση.

### 7.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΜΙΚΡΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ

Τόπος: Σύρος και Μύκονος

Έτος εγκατάστασης: 1987-1988

Δυναμικότητα: 1.200 m<sup>3</sup>/day

Συνολικό ύψος επένδυσης: 1.276.595,74 € (τιμές 1987)

Ανάλυση επένδυσης	σε εκατ. €
- Κτιριακά	80
-3 αντλίες: 3x 72.340,43 €=	74
- μεμβράνες: 70 μεμβράνες τιμή μεμβράνης 6.000 \$ 70 x 6.000 x 160=	67
- Ηλεκτρικά, κοντρόλ κλπ.	50
- Σύστημα προκατεργασίας νερού, μελέτη, εγκατάσταση, επίβλεψη κλπ.	164
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>435</b>

Συνολικό κόστος ανά m <sup>3</sup> νερού	Σε € /m <sup>3</sup>
- λειτουργικό κόστος	110
- αντικατάσταση μεμβρανών (μέσος όρος ζωής μεμβρανών 6 χρόνια)	26
- απόσβεση κεφαλαίου (435 εκατομμύρια μεμβράνες σε 20 χρόνια)	42
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>0,52 € /m<sup>3</sup></b>

Συμπερασματικά για μια μονάδα 1200 κυβικά μέτρα ανά ημέρα σε 20 χρόνια, το ύψος επένδυσης είναι 1.276.595,74 εκατομμύρια €. Το

## Αφαλάτωση Θαλασσινού Νερού σε Πόσιμο

λειτουργικό κόστος 0,32 €/m<sup>3</sup> νερού και το συνολικό κόστος με αποσβέσεις κλπ. 0,52€ ανά κυβικό μέτρο.

Για μεγαλύτερες μονάδες το κόστος ενέργειας και αντικατάστασης μεμβρανών είναι το ίδιο (0,18 και 0,08 € ανά κυβικό μέτρο αντίστοιχα) ενώ μειώνονται τα εργατικά, χημικά, αρχικό κεφάλαιο κλπ.

### ΣΥΜΒΟΛΑ

PPM= μέρη στο εκατομμύριο = 10<sup>-3</sup> G/L

1 SPI = 0.07 ATM

m<sup>3</sup>/day= κυβικά μέτρα ανά ημέρα

1 MGD= ένα εκατομμύριο γαλόνια ανά ημέρα = 3.800 m<sup>3</sup>/D

1 GPD= ένα γαλόνι ανά ημέρα = 3.8 · 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/D

1 GFD= ένα γαλόνι ανά τετραγωνικό πόδι και ημέρα= 0,04 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>  
ημέρα

TDS= Total Dissolved solids= ολικά στερεά εν διαλύσει



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- 1) «Κατακάθιση θειϊκού ασβεστίου σε μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης» Διδακτορική διατριβή Φουντουκίδη Γ. Ευάγγελου ΑΘΗΝΑ 1988 ΕΜΠ.
- 2) «Αφαλάτωση θαλασσινού νερού» Πτυχιακή εργασία Παπαϊωάννου ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ
- 3) «Αποθέσεις  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  σε μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης» Διπλωματική εργασία Πέτρου Σ. Μανώλη ΕΜΠ ΑΘΗΝΑ 1977
- 4) «Εξοικονόμηση ενέργειας στην αφαλάτωση με μεμβράνες» Διπλωματική εργασία, Αχιλλέως Μιχαλόπουλου ΕΜΠ ΑΘΗΝΑ 1978
- 5) «Έργα Αστικής Υδραυλικής», Νικολάου Δ.Αραποστάθη ΑΘΗΝΑ 1985
- 6) «Προκατεργασία νερού λεβητών α) με αντίστροφη ώσμωση και β) με ρητίνες» ΠΤΥΧΙΑΚΗ εργασία Ρούσσοσ Επαμεινώνδας
- 7) «Σχεδιασμός εγκαταστάσεων αφαλάτωσης» Αχ.Ι. Γιούργα Διπλωματική εργασία ΑΘΗΝΑ 1979 ΕΜΠ.
- 8) «Εφαρμογές της αφαλάτωσης για την παραγωγή πόσιμου νερού στις Άνυδρες περιοχές» «Σεμινάριο» Νίκος Διακουλάκης: Εισηγητής 19-10-1988