

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

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ  
ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ  
ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΆΝΔΡΟ**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΚΑΠΝΙΣΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΚΟΥΡΑΣ ΕΥΓΕΝΙΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ 2017**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την πτυχιακή εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και έχει ως αντικείμενο την μελέτη μιας μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης που εκμεταλλεύεται την Αιολική ενέργεια.

Σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η μελέτη μιας μονάδας αντίστροφης ώσμωσης για την κάλυψη των αναγκών της νήσου Άνδρου με χρήση Αιολικής ενέργειας.

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Σκούρα Ευγένιο για την υπόδειξη του θέματος καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Καπνίσης Δημήτριος  
Δεκέμβριος 2017

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

Ο σπουδαστής  
Καπνίσης Δημήτριος

.....

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει σαν θέμα τη μελέτη μονάδας αφαλάτωσης νερού με τη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης με χρήση Αιολικής ενέργειας.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά οι μέθοδοι αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού και στη συνέχεια με περισσότερη λεπτομέρεια η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται βασικές έννοιες της Αιολικής ενέργειας, τα είδη των ανεμογεννητριών και οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση των ανεμογεννητριών.

Στο τρίτο κεφάλαιο υπολογίζεται η ενεργειακή κατανάλωση μιας μονάδας αντίστροφης ώσμωσης για τη νήσο Άνδρο και υπολογίζεται η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας που απαιτείται για την κάλυψη της.

Τέλος στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία αυτή.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	2
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	4
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	5
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	7
1. Το Πρόβλημα της Λειψυδρίας.....	7
2 Περικτικότητα του Νερού σε Στερεές Ουσίες.....	8
3. Αφαλάτωση.....	10
4. Προοπτικές της Αφαλάτωσης.....	13
<b>1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ</b>	
1.1 Γενικά.....	14
1.2 Πολυβάθμια Εξάτμιση.....	14
1.3 Πολυβάθμια Αστραπιαία Εξαέρωση.....	20
1.4 Συμπύεση Ατμού.....	25
1.5 Ηλιακή Εξάτμιση.....	27
1.6 Ηλεκτροδιάλυση.....	30
1.7 Αντίστροφη Ώσμωση.....	34
1.8 Οι Μεμβράνες της Αντίστροφης Ώσμωσης.....	44
1.9 Ανάκτηση Ενέργεια στην Αντίστροφη Ώσμωση.....	53
1.10 Σύγκριση των Μεθόδων Αφαλάτωσης.....	55
1.11 Επιλογή Μεθόδου Αφαλάτωσης.....	57
<b>2. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ</b>	
2.1 Γενικά.....	58
2.2 Ισχύς του Ανέμου.....	61
2.3 Ωφέλιμη Ισχύς.....	63
2.4 Ανεμογεννήτριες.....	69
2.5 Κατηγορίες Ανεμογεννητριών.....	73
2.5.1 Με Βάση τη Θέση του Άξονα.....	73
2.5.2 Με Βάση τον Έλεγχο της Ισχύος.....	79
2.5.3 Με Βάση τη Μεταβολή των Στροφών.....	81
<b>3. ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΑΝΔΡΟ</b>	
3.1 Γενικά για τη Νήσο Άνδρο.....	85
3.2 Ύδρευση-Άρδευση.....	86

3.3 Ενεργειακή Κατανάλωση Μονάδας Αντίστροφης Ωσμωσης.....	87
3.4 Ανεμολογικά Δεδομένα.....	88
3.5 Ενεργειακή Παραγωγή Ανεμογεννήτριας.....	90
3.6 Υπολογισμός Μέσου Συντελεστή Ισχύος.....	92
3.7 Υπολογισμός Ονομαστικής Ισχύος Ανεμογεννήτριας.....	95
<b>4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>96</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>98</b>

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΛΕΙΨΥΔΡΙΑΣ

Η Ελλάδα είναι μία από τις 7 χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης που αντιμετωπίζουν πρόβλημα επάρκειας νερού. Πολλά νησιά αντιμετωπίζουν σοβαρό πρόβλημα λειψυδρίας αφού τα επιφανειακά και υπόγεια νερά δεν μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες ύδρευσης και άρδευσης. Η απαίτηση για νερό σήμερα καλύπτεται εν μέρει από την άντληση υπόγειων υδάτων και κατά σημαντικό μέρος με μεταφορά νερού με υδροφόρα πλοία. Πολύ συχνά οι αντλήσεις ξεπερνούν το δυναμικό των υπογείων υδάτων με αποτέλεσμα να εισχωρεί η θάλασσα και να προκαλείται υφαλμύριση του υδροφόρου ορίζοντα. Οι μεταφορές νερού με υδροφόρα πλοία, αν και παρουσιάζουν αυξητικές τάσεις, δεν εξασφαλίζουν ικανοποιητική ποιότητα και ποσότητα πόσιμου νερού για τους καταναλωτές. Η προμήθεια νερού από άλλες περιοχές παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα λόγω περιορισμένης διαθεσιμότητας ενώ η μεταφορά γίνεται με σημαντικό κόστος, της τάξης των 8 €/m<sup>3</sup> νερού. Επίσης στα αρνητικά αυτής της λύσης πρέπει να συνυπολογιστεί και το περιβαλλοντικό κόστος από τα καυσαέρια των πλοίων.

Εγκαταστάσεις αφαλάτωσης που λειτουργούν με Αιολική Ενέργεια, οι οποίες παράγουν πόσιμο νερό με αφαλάτωση θαλασσινού νερού, μπορούν να αποτελέσουν μια οικονομικά βιώσιμη αλλά και μόνιμη λύση για την υδροδότηση των νησιών, δεδομένου του υψηλού αιολικού δυναμικού των νησιών.

## 2. ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΣΤΕΡΕΕΣ ΟΥΣΙΕΣ

Η διαδικασία παραγωγής πόσιμου νερού ή νερού για βιομηχανική και αγροτική χρήση από θαλασσίνο ή υφάλμυρο νερό προϋποθέτει την πλήρη γνώση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του προς επεξεργασία νερού. Το νερό που υπάρχει σε οποιαδήποτε μορφή στην επιφάνεια της Γης ή υπογείως πάντα περιέχει διαλυμένες στερεές ουσίες. Αυτό συμβαίνει λόγω της μεγάλης διαλυτικής ικανότητας του νερού. Οι διαλυμένες ουσίες είναι κυρίως άλατα χωρίς όμως να αποκλείεται και η παρουσία άλλων στερεών όπως το διοξείδιο του πυριτίου.

Η περιεκτικότητα του νερού σε στερεές ουσίες ονομάζεται TDS (Total Dissolved Solids, συνολικά διαλυμένα στερεά) και μετριέται σε μέρη στο εκατομμύριο (ppm). Σύμφωνα με την περιεκτικότητα TDS το νερό χωρίζεται στις εξής κατηγορίες:

- Ø Πόσιμο νερό με  $TDS < 500$  ppm
- Ø Ελαφρά υφάλμυρο νερό με TDS λίγο υψηλότερο του 500 ppm
- Ø Υφάλμυρο νερό με  $2000 \text{ ppm} < TDS < 10000$  ppm
- Ø Θαλασσίνο νερό με  $30000 \text{ ppm} < TDS < 50000$  ppm
- Ø Άλμη (ή Άρμη) με  $TDS > 50000$  ppm

Να σημειωθεί ότι το ελαφρά υφάλμυρο νερό μπορεί να είναι και πόσιμο σύμφωνα με σχετικές οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και την σχετική Ελληνική νομοθεσία. Στη διεθνή βιβλιογραφία το πόσιμο νερό ονομάζεται και φρέσκο νερό. Η άλμη (κοινά: αλατόνερο ή σαλαμούρα) χρησιμοποιείται κυρίως για την συντήρηση των τροφίμων και συνήθως είναι το απόρριμμα των μονάδων αφαλάτωσης.

Πάντως η περιεκτικότητα σε διαλυμένα στερεά δεν είναι σταθερή για κάθε κατηγορία νερού. Όλες οι θάλασσες δεν έχουν την ίδια περιεκτικότητα σε στερεές ουσίες. Κλειστές θάλασσες με μικρή εξάτμιση λόγω μικρής ηλιοφάνειας και επειδή δέχονται γλυκά νερά ποταμών έχουν χαμηλή περιεκτικότητα TDS. Για παράδειγμα η Βόρεια θάλασσα έχει 28000 ppm και η Βαλτική θάλασσα μόλις 15000 ppm. Αντίθετα η Ερυθρά θάλασσα και η Μεσόγειος έχουν TDS 40000 ppm και η θάλασσα του Σουέζ 78000 ppm. Ακόμα και μία συγκεκριμένη πηγή υφάλμυρου ή πόσιμου νερού δεν έχει



σταθερή περιεκτικότητα. Παράγοντες όπως η ταχύτητα άντλησης, το ύψος των βροχοπτώσεων και η υπόγεια διάθεση λυμάτων επηρεάζουν την περιεκτικότητα σε διαλυτά στερεά αλλά και το μικροβιακό της φορτίο.

Το θαλασσινό νερό περιέχει όλα σχεδόν τα γνωστά στοιχεία σε μορφή ιόντων. Τα περισσότερα όμως από αυτά βρίσκονται σε πολύ μικρές ποσότητες που μπορούν να αγνοηθούν. Μία τυπική σύσταση του θαλασσινού νερού δίνεται στον πίνακα 1. Όπως είναι αναμενόμενο το χλώριο και το νάτριο κυριαρχούν αλλά υπάρχουν και άλλα ιόντα. Τα άλατα του μαγνησίου και του ασβεστίου αποτελούν τη λεγόμενη σκληρότητα του νερού η οποία είναι σε ένα βαθμό απαραίτητη. Υψηλή όμως σκληρότητα δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στη διαδικασία της αφαλάτωσης. Να σημειωθεί ότι στο θαλασσινό νερό περιέχονται ακόμη και σπάνια μέταλλα όπως ουράνιο, χρυσός, λευκόχρυσος, τιτάνιο κ.α. Κατά καιρούς μάλιστα έχουν παρουσιαστεί διάφορες μελέτες που επεξεργάζονται ιδέες για το πως είναι δυνατό να ανακτηθούν αυτά από τη θάλασσα. Προς το παρόν όλες οι προτάσεις που έχουν διατυπωθεί είναι οικονομικά ασύμφωρες.

Πίνακας 1 Τυπική σύσταση θαλασσινού νερού

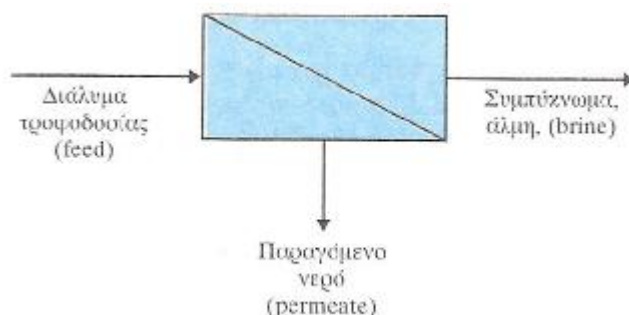
Ιόν	Περιεκτικότητα (ppm)
Na <sup>+</sup>	10561
Mg <sup>++</sup>	1272
Ca <sup>++</sup>	400
K <sup>+</sup>	380
Cl <sup>-</sup>	18980
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	2649
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	142

Br <sup>-</sup>	65
Άλλα Στερεά	34
TDS	34483

Ένας άλλος τρόπος περιγραφής της περιεκτικότητας του νερού σε διάφορες στερεές ουσίες είναι η αλατότητα. Με τον όρο αυτό περιγράφεται η περιεκτικότητα σε ολικά στερεά όταν όλα τα ανθρακικά άλατα έχουν μετατραπεί σε οξείδια, όλα τα βρωμιούχα και ιωδιούχα άλατα έχουν αντικατασταθεί από χλωριούχα άλατα και όλες οι οργανικές ουσίες έχουν οξειδωθεί πλήρως.

### 3. ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ

Με τον όρο αφαλάτωση αναφερόμαστε σε κάθε διαδικασία απομάκρυνσης των στερεών ουσιών από το νερό με σκοπό την παραγωγή φρέσκου νερού. Το νερό που υφίσταται αφαλάτωση μπορεί να είναι θαλασσινό, υφάλμυρο ή ακόμα και επεξεργασμένα υδάτινα λύματα. Είναι γνωστό ότι το 97% των παγκόσμιων αποθεμάτων νερού βρίσκεται στους ωκεανούς. Έτσι, η αφαλάτωση του θαλασσινού νερού για την παραγωγή καθαρού νερού (πόσιμου ή αποσταγμένου) προβάλλει ως η μοναδική λύση του προβλήματος της λειψυδρίας που παρουσιάζεται σε πολλές περιοχές της Γης.



## Σχήμα 1. Η διεργασία της αφαλάτωσης [1].

Οι μέθοδοι αφαλάτωσης εφαρμόζονται επίσης και για τον καθαρισμό υφάλμυρου νερού. Επίσης, σε ορισμένες περιπτώσεις μέσω της αφαλάτωσης παράγεται επιτραπέζιο αλάτι ως υποπροϊόν.

Οι τεχνολογίες αφαλάτωσης έχουν αναπτυχθεί πάρα πολύ τα τελευταία χρόνια εξασφαλίζοντας μείωση του κόστους παραγωγής αλλά και φρέσκο νερό υψηλής ποιότητας. Επιπλέον οι εγκαταστάσεις αφαλάτωσης μπορούν να προσφέρουν ασφαλή και αδιάλειπτη τροφοδοσία με νερό σε αντίθεση με λύσεις όπως μεταφορά νερού με δεξαμενόπλοια που προαναφέρθηκαν.

Για τη σωστή αντιμετώπιση του προβλήματος της λειψυδρίας, η παραγωγή νερού από μονάδες αφαλάτωσης θα πρέπει να συνδυαστεί με:

- Ø Μέτρα εξοικονόμησης και σωστής διαχείρισης των υδατικών πόρων.
- Ø Μεθόδους επαναχρησιμοποίησης του νερού.
- Ø Ανάπτυξη διαχρονικών πολιτικών όσον αφορά στην προστασία και στη διάθεση των υδάτων.

Οι μέθοδοι αφαλάτωσης χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις θερμικές μεθόδους ή μεθόδους εξάτμισης και τις μεθόδους μεμβρανών. Υπάρχουν επίσης και άλλες μέθοδοι οι οποίες βρίσκονται ακόμη σε πειραματικό στάδιο ή δεν είναι γενικά συμφέρουσες από οικονομική άποψη. Οι μέθοδοι εξάτμισης χρησιμοποιούνται σήμερα μόνο στις πετρελαιοπαραγωγούς χώρες της Μέσης Ανατολής που διαθέτουν άφθονους ενεργειακούς πόρους ενώ στις υπόλοιπες χώρες χρησιμοποιείται κυρίως η μέθοδος της Αντίστροφης Όσμωσης που ανήκει στις μεθόδους μεμβρανών και είναι πιο οικονομική. Όλες οι τεχνικές αφαλάτωσης απαιτούν, άλλες περισσότερο και άλλες λιγότερο, για την σωστή και αποδοτική λειτουργία τους ειδική προ-κατεργασία του αλατούχου διαλύματος τροφοδοσίας καθώς και μετά-επεξεργασία του νερού που παράγεται.

Πρέπει να σημειωθεί ότι διαδικασίες αφαλάτωσης συμβαίνουν σε πολλά είδη του ζωικού βασιλείου. Έτσι, πολλά γνωστά θαλασσινά πουλιά, όπως ο γλάρος, ο πελεκάνος, ο θαλασσοβάτης κ.α. χάρη σε έναν αδένα μπορούν και μεταβάλλουν την περιεκτικότητα των αλάτων στο θαλασσινό νερό, καθιστώντας το έτσι κατάλληλο για βιολογική χρήση.

Η θεωρητική ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού είναι  $0.71 \text{ kWh/m}^3$  παραγόμενου νερού για θαλασσινό νερό με TDS 35000 ppm και φτάνει περίπου  $1 \text{ kWh/m}^3$  παραγόμενου νερού για νερό τροφοδοσίας με διπλάσιο TDS. Αυτή η τιμή αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού. Όπως είναι φυσικό στην πράξη η απαιτούμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη από το παραπάνω θεωρητικό όριο.

Παρόλο που έχουν αναπτυχθεί πολλές και διαφορετικής φιλοσοφίας μέθοδοι αφαλάτωσης, η βασική διαδικασία και τα επί μέρους στάδια όλου του συστήματος παραμένουν ίδια. Αρχικά το θαλασσινό νερό συλλέγεται μέσω σωληνώσεων, ενώ συγχρόνως αφαιρούνται σωματίδια προκειμένου να έχει καλύτερη απόδοση η διαδικασία αλλά και να βελτιωθεί η ποιότητα του νερού (Water intake). Στη συνέχεια, το ρεύμα θαλασσινού νερού διέρχεται από μια διαδικασία, η οποία προηγείται της αφαλάτωσης, όπου φιλτράρεται ή και επεξεργάζεται χημικά ανάλογα τη μέθοδο αφαλάτωσης (Pretreatment).

Το νερό μετά από αυτό το στάδιο είναι έτοιμο για να περάσει από το κύριο μέρος της εγκατάστασης (Desalination). Εδώ, το σύστημα αφαλάτωσης διαχωρίζει το ρεύμα εισόδου σε ένα ρεύμα με αφαλατωμένο νερό και σε ένα ρεύμα με συμπυκνωμένη άλμη. Η μέθοδος με την οποία διαχωρίζεται το ρεύμα θαλασσινού νερού ποικίλει. Έχουν αναπτυχθεί αρκετές διεργασίες αφαλάτωσης, οι οποίες θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια. Αξίζει να αναφέρουμε επίσης, ότι η απόρριψη αυτής της άλμης στη θάλασσα, είναι πιθανόν να έχει επιπτώσεις στη θαλάσσια πανίδα. Συνεπώς η εκμετάλλευση της είναι αναγκαία (παραγωγή άλατος).

Το αφαλατωμένο νερό επεξεργάζεται εκ νέου, για να ικανοποιηθούν κάποιες απαιτήσεις ποιότητας, προκειμένου να είναι κατάλληλο για χρήση (Post Treatment). Τέλος, πολλές φορές, το παραγόμενο νερό αποθηκεύεται σε δεξαμενές στην περίπτωση που η εκμετάλλευση του δεν απαιτείται να είναι άμεση (Water Storage).

Δύο χαρακτηριστικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατεργασία του νερού και κυρίως στις διεργασίες αφαλάτωσης είναι η *ανάκτηση* (Recovery) και η *απόρριψη αλάτων* (Salt Rejection, SR). Η ανάκτηση δείχνει το ποσοστό του παραγόμενου νερού από το διάλυμα τροφοδοσίας και ορίζεται ως:

$$\text{Ανάκτηση (\%): } r = \frac{V_p}{V_f} \cdot 100$$

όπου  $V_p$  είναι η ογκομετρική παροχή του παραγόμενου νερού και  $V_f$  του διαλύματος τροφοδοσίας.

Η ποιότητα του παραγόμενου νερού, που χαρακτηρίζεται από την ικανότητα απόρριψης των αλάτων που περιέχονται στο διάλυμα τροφοδοσίας. Έτσι η απόρριψη αλάτων ορίζεται ως:

$$\text{Απόρριψη αλάτων (\%): } R = \frac{c_f - c_p}{c_f} \cdot 100$$

όπου  $c_f$  είναι η συγκέντρωση σε άλατα του διαλύματος τροφοδοσίας και  $c_p$  η συγκέντρωση σε άλατα του παραγόμενου νερού.

#### 4. ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Η αφαλάτωση δεν θεωρείται πλέον σαν ένα προσωρινό μέτρο αντιμετώπισης της λειψυδρίας, αλλά σαν ένας υπαλλακτικός υδάτινος πόρος. Τα τελευταία χρόνια η αφαλάτωση του θαλασσινού νερού αναπτύσσεται με πολύ γρήγορους ρυθμούς και φαίνεται ότι στο μέλλον θα αποτελέσει μια από τις κύριες πηγές υδροδότησης. Οι σημαντικότεροι λόγοι είναι οι εξής:

- Ø Η αφαλάτωση μπορεί να προσφέρει ασφαλή και αδιάλειπτη τροφοδοσία σε καθαρό νερό σταθερής και καλής ποιότητας.
- Ø Η αφαλάτωση μπορεί να λειτουργήσει συμπληρωματικά σε μία ευρύτερη πολιτική ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδάτινων πόρων.
- Ø Ο συνδυασμός της αφαλάτωσης με τις Α.Π.Ε. είναι τεχνικά εφικτός και περιβαλλοντικά ωφέλιμος, παρουσιάζει όμως γενικά υψηλότερο κόστος σε σχέση με τη συμβατική τροφοδοσία.
- Ø Η αφαλάτωση με Α.Π.Ε. πρέπει να αποτελέσει προτεραιότητα σε μελλοντικές εφαρμογές με αντίστοιχη παροχή κινήτρων.
- Ø Η αφαλάτωση είναι η μόνη πηγή νερού που είναι ανεξάρτητη από τις καιρικές συνθήκες.

# **1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ**

## **1.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Οι μέθοδοι αφαλάτωσης που είναι διαθέσιμες σήμερα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες.

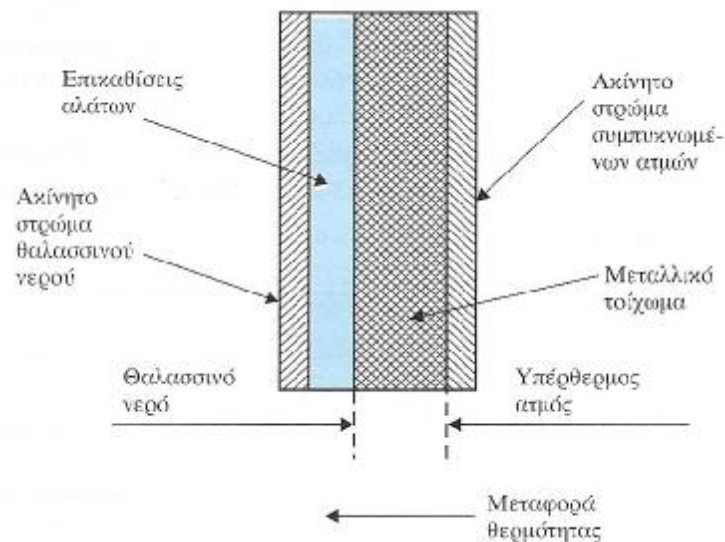
Οι θερμικές μέθοδοι ή μέθοδοι εξάτμισης περιλαμβάνουν την αλλαγή φάσης του νερού, από υγρό σε αέριο. Οι κυριότερες θερμικές μέθοδοι είναι η Πολυβάθμια Εξάτμιση (Multiple Stage Distillation, MSD ή Multi-Effect Boiling, MEB ή Multiple Effect Distillation, MED), η Πολυβάθμια Εκτόνωση (Multiple Stage Flashing, MSF), η Συμπίεση του Ατμού (Vapor Compression VC) και η Ηλιακή Εξάτμιση (Solar Distillation, SD).

Οι μέθοδοι μεμβρανών, αντίθετα με τις θερμικές, δεν περιλαμβάνουν αλλαγή φάσης του νερού αλλά χρησιμοποιούν μεμβράνες για την κατακράτηση των αλάτων. Οι κυριότερες μέθοδοι μεμβρανών είναι η Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis, ED) και η Αντίστροφη Ωσμωση (Reverse Osmosis, RO).

## **1.2 ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑ ΕΞΑΤΜΙΣΗ**

Η μέθοδος της εξάτμισης είναι ιστορικά η πρώτη μέθοδος αφαλάτωσης που εφαρμόστηκε. Η βασική ιδέα είναι πολύ απλή. Το θαλασινό ή υφάλμυρο νερό θερμαίνεται και μετατρέπεται σε ατμό ενώ τα στερεά που περιέχει παραμένουν αμετάβλητα, εφόσον βέβαια η θερμοκρασία δεν υπερβαίνει κάποιο όριο.

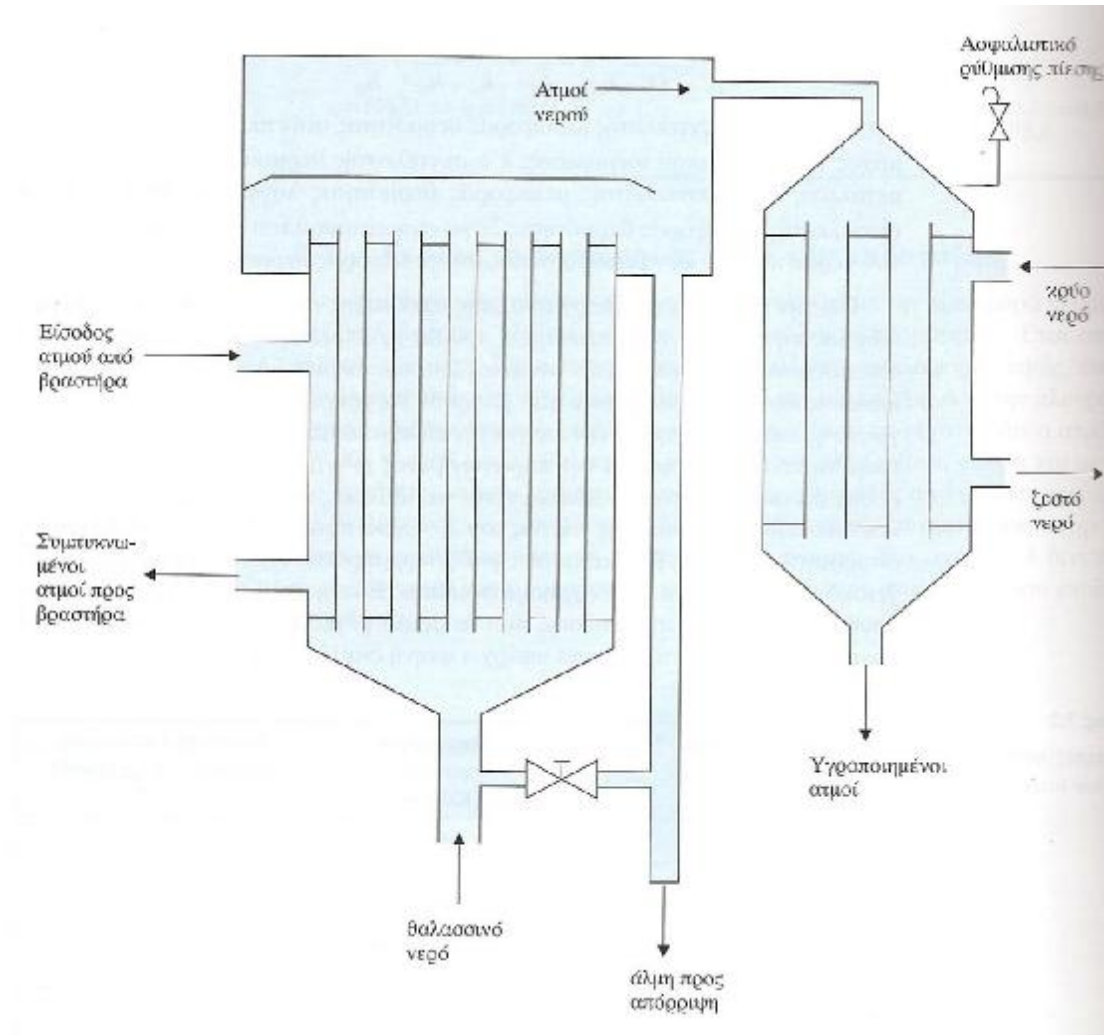
Η εξάτμιση του νερού επιτυγχάνεται με προσφορά θερμότητας από υπέρθερμους υδρατμούς με τη βοήθεια ενός εναλλάκτη θερμότητας. Στη μία πλευρά του μεταλλικού τοιχώματος του εναλλάκτη κυκλοφορεί υπέρθερμος υδρατμός ενώ στην άλλη πλευρά κυκλοφορεί το προς αφαλάτωση νερό. Στη δεύτερη έχουμε φυσικά επικαθίσεις αλάτων πάνω στην επιφάνεια. Αν και οι υδρατμοί και το θαλασσινό νερό ρέουν με μεγάλες συνήθως ταχύτητες, πάντα σχηματίζονται ακίνητα στρώματα στις δύο πλευρές του μεταλλικού τοιχώματος από υγροποιημένο ατμό και θαλασσινό νερό αντίστοιχα. Η διαδικασία φαίνεται στο σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 Μεταφορά θερμότητας κατά την εξάτμιση [1].

Στο σχήμα 1.2 φαίνεται η διαδικασία αφαλάτωσης με απλή εξάτμιση. Το θαλασσινό νερό θερμαίνεται στον εναλλάκτη θερμότητας από υδρατμούς στη θερμοκρασία βρασμού ή υπέρθερμους οι οποίοι υγροποιούνται και επιστρέφουν στο βραστήρα. Το αλατούχο νερό φτάνει στο σημείο βρασμού του το οποίο είναι υψηλότερο από το σημείο βρασμού του καθαρού νερού σύμφωνα με το νόμο του Raoult. Όταν συμβεί αυτό οι ατμοί του νερού αρχίζουν να ανέρχονται

στην αποστακτική στήλη. Η θερμοκρασία των υπέρθερμων υδρατμών πρέπει οπωσδήποτε να είναι μεγαλύτερη από το σημείο βρασμού του αλατούχου νερού.



Σχήμα 1.2 Απλή εξάτμιση [1].

Καθώς το νερό εξατμίζεται και ανέρχεται στην αποστακτική στήλη η συγκέντρωση σε αλάτι του αλατούχου νερού που απομένει αυξάνεται και τελικά απορρίπτεται ως άλμη. Σε κάποιες περιπτώσεις η άλμη ανακυκλώνεται ώστε να παραχθεί περισσότερο καθαρό νερό από αυτήν. Το παραγόμενο νερό που είναι σε μορφή ατμού υγροποιείται μέσω ενός συμπυκνωτή και αφού περάσει από



την κατάλληλη επεξεργασία για τη βελτίωση της ποιότητάς του διατίθεται στην κατανάλωση.

Η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας στους αποστακτήρες μιας βαθμίδας οδήγησε στην κατασκευή πολυβάθμιων αποστακτήρων, δηλαδή πολλών αποστακτήρων που είναι συνδεδεμένοι σε σειρά όπως φαίνεται στην εικόνα 1.1. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται καλύτερη εκμετάλλευση της θερμότητας του συστήματος. Επίσης με τη χρήση πολυβάθμιων αποστακτήρων δεν απορρίπτεται στο περιβάλλον άψητο νερό και υψήλως θερμικού περιεχομένου που αποτελεί θερμική μόλυνση για το περιβάλλον.

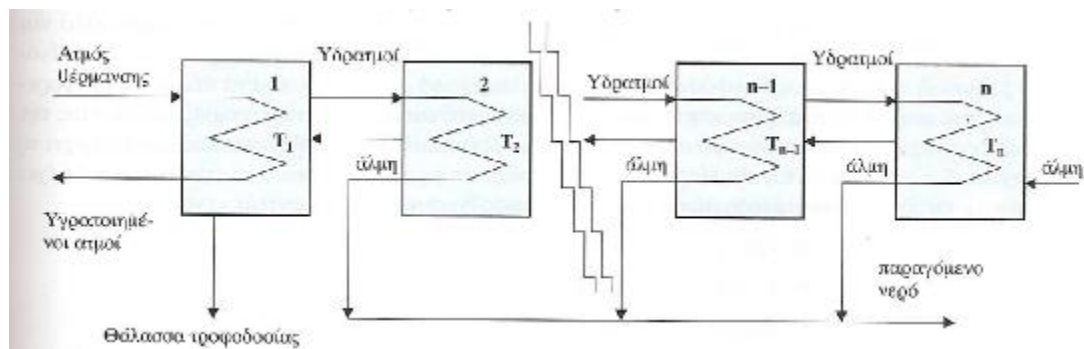


Εικόνα 1.1 Εγκατάσταση πολυβάθμιας εξάτμισης στην Κίνα [10].

Η βασική αρχή στην οποία στηρίζεται η λειτουργία των πολυβάθμιων αποστακτήρων είναι το γεγονός ότι η μείωση της πίεσης λειτουργίας κάθε σταδίου έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του σημείου βρασμού του διαλύματος. Έτσι, οι ατμοί που παράγονται στον πρώτο αποστακτήρα καθώς

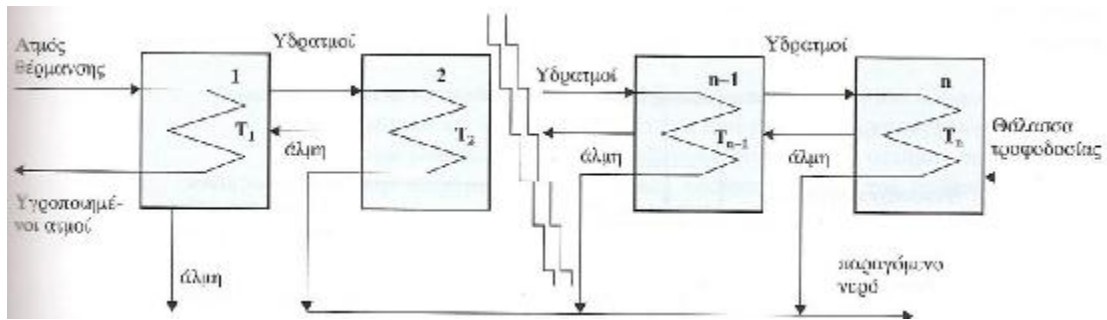
περνούν από τον δεύτερο αποστακτήρα, ψύχονται και η θερμότητα που αποδίδουν χρησιμοποιείται για το βράσιμο του θαλασσινού νερού στον δεύτερο αποστακτήρα. Με άλλα λόγια, κάθε αποστακτήρας από τον δεύτερο και μετά χρησιμοποιείται ως συμπυκνωτής για τον ατμό που παράγεται από τον αμέσως προηγούμενο αποστακτήρα. Η παραγόμενη άλμη από την πρώτη βαθμίδα, που βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία, αποτελεί το διάλυμα τροφοδοσίας για τη δεύτερη βαθμίδα κ.ο.κ.

Στο σχήμα 1.3 φαίνεται ο τρόπος λειτουργίας μιας εγκατάστασης πολυβάθμιας εξάτμισης όπου το διάλυμα τροφοδοσίας περνάει διαδοχικά από τις βαθμίδες απόσταξης, από τη βαθμίδα υψηλής στη βαθμίδα χαμηλής θερμοκρασίας.

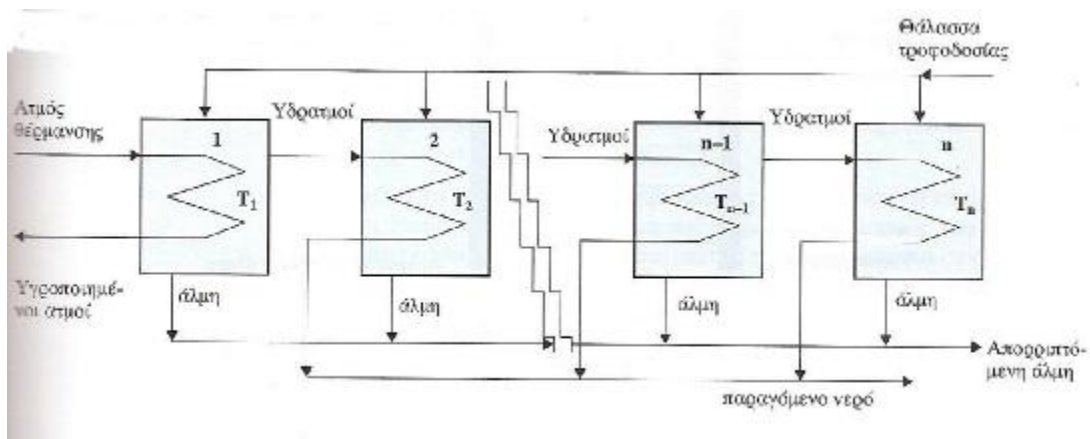


Σχήμα 1.3 Πολυβάθμια εξάτμιση με ατμούς και άλμη στην ίδια κατεύθυνση [1].

Η πολυβάθμια εξάτμιση μπορεί να επιτευχθεί επίσης με τους παραγόμενους ατμούς και το διάλυμα τροφοδοσίας να ρέουν σε αντίθετες κατευθύνσεις (σχήμα 1.4). Ένας ακόμη εναλλακτικός τρόπος λειτουργίας είναι η παράλληλη τροφοδοσία όλων των βαθμίδων με το διάλυμα τροφοδοσίας (σχήμα 1.5). Η επιλογή του τρόπου λειτουργίας μιας εγκατάστασης πολυβάθμιας εξάτμισης εξαρτάται από τη μεταβολή της διαλυτότητας των αλάτων σε σχέση με τη θερμοκρασία της άλμης και της μέγιστης συγκέντρωσής της.

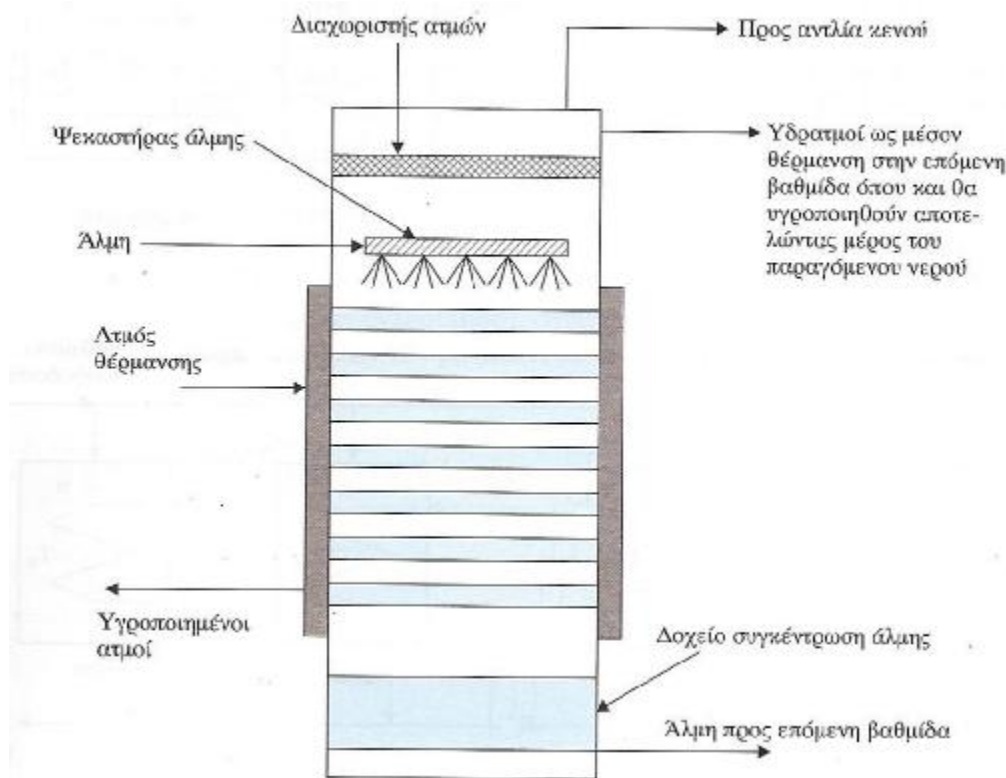


Σχήμα 1.4 Πολυβάθμια εξάτμιση με ατμούς και άλμη σε αντίθετη κατεύθυνση [1].



Σχήμα 1.5 Πολυβάθμια εξάτμιση παράλληλης τροφοδοσίας [1].

Είναι απαραίτητο όλοι οι αποστακτήρες να περιλαμβάνουν αντλία κενού η οποία χρησιμοποιείται για την πτώση της πίεσής τους κάτω από την ατμοσφαιρική πίεση. Ακόμη απαιτούνται αντλίες για την διακίνηση του παραγόμενου νερού και της άλμης. Επίσης σε κάθε βαθμίδα περιέχονται: εναλλάκτης θερμότητας, διαχωριστής ατμών, ακροφύσια ψεκασμού άλμης και δοχείο συγκέντρωσης άλμης. Η δομή ενός αποστακτήρα φαίνεται στο σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6 Δομή μιας βαθμίδας της πολυβάθμιας εξάτμισης [1].

### 1.3 ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΑ ΑΣΤΡΑΠΙΑΙΑ ΕΞΑΕΡΩΣΗ

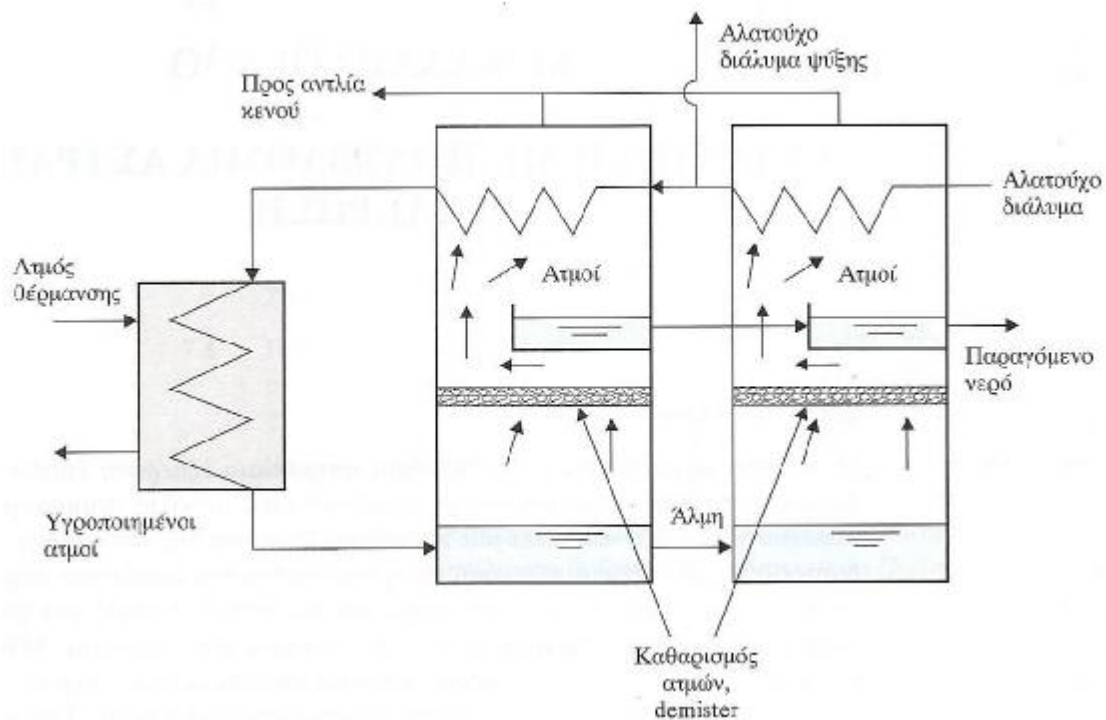
Η αφαλάτωση με τη μέθοδο της πολυβάθμιας αστραπιαίας εξαέρωσης, ή πιο απλά πολυβάθμιας εκτόνωσης, εφαρμόζεται σε μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής καθαρού νερού και αποτελεί μία καινοτόμο θεώρηση της απόσταξης. Τέτοιες εγκαταστάσεις συναντάμε κυρίως στη Μέση Ανατολή (Σαουδική Αραβία, Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, Κουβέιτ κ.α.). Οι εγκαταστάσεις πολυβάθμιας εκτόνωσης καλύπτουν το 40% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής πόσιμου νερού με αφαλάτωση.



Εικόνα 1.2 Εγκατάσταση πολυβάθμιας εκτόνωσης στη Σαουδική Αραβία [10].

Η βασική καινοτομία της μεθόδου αυτής είναι ότι η δημιουργία των ατμών του παραγόμενου νερού γίνεται σε όλη τη μάζα της άλμης και όχι στην επιφάνεια των εναλλακτών όπως στην απόσταξη που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Η θέρμανση της άλμης και η εξάτμιση του νερού γίνονται σε διαφορετικά δοχεία, σε αντίθεση με την πολυβάθμια απόσταξη. Έτσι, στην πολυβάθμια εκτόνωση το αλμυρό νερό θερμαίνεται με έναν εναλλάκτη θερμότητας κάτω από πίεση έτσι ώστε να αποφεύγεται ο βρασμός του και στη συνέχεια διοχετεύεται σε ένα δοχείο όπου επικρατεί χαμηλή πίεση και εκεί συμβαίνει η εξαέρωση του νερού.

Στο σχήμα 1.7 δίνεται σχηματικά η αρχή λειτουργίας της μεθόδου. Το νερό τροφοδοσίας, που μπορεί να είναι θαλασσίνο ή υφάλμυρο νερό, θερμαίνεται σε κατάλληλη θερμοκρασία με τη βοήθεια ενός εναλλάκτη θερμότητας που χρησιμοποιεί θερμούς ατμούς ως μέσο θέρμανσης. Για λόγους οικονομίας ενέργειας το νερό τροφοδοσίας έχει προθερμανθεί από τους παραγόμενους ατμούς. Η πίεση παραμένει λίγο μεγαλύτερη από την τάση ατμών για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία.



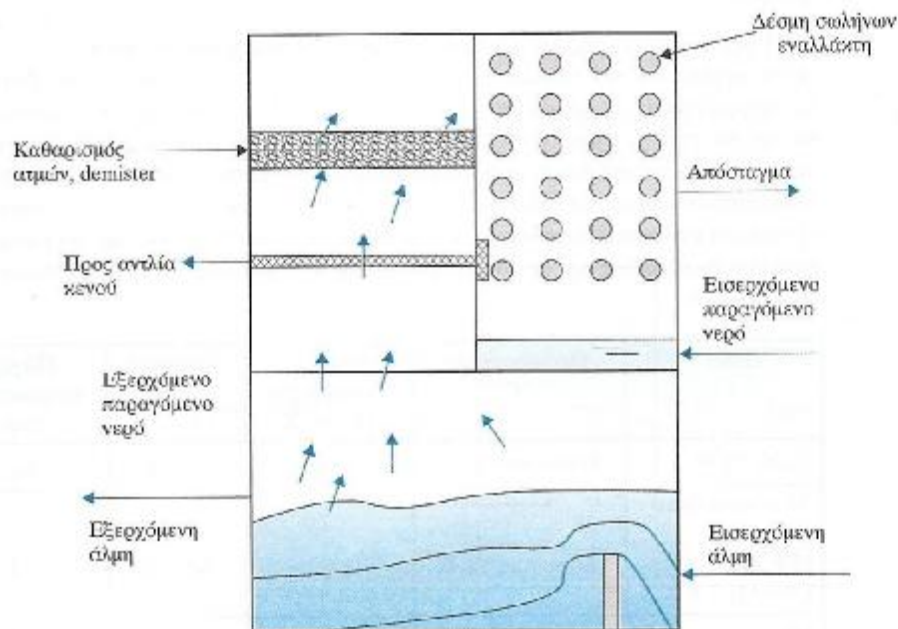
Σχήμα 1.7 Αρχή λειτουργίας της πολυβάθμιας εκτόνωσης [1].

Στη συνέχεια το θερμό πλέον διάλυμα εισέρχεται στον πρώτο θάλαμο όπου η πίεση είναι μικρότερη από την τάση ατμών. Έτσι, το διάλυμα εξαερώνεται αστραπιαία από όλη τη μάζα του μέχρις ότου η πίεση γίνει ίση με την τάση ατμών του διαλύματος. Για το βρασμό απαιτούνται σημαντικά ποσά θερμότητας (λανθάνουσα θερμότητα βρασμού), τα οποία προσφέρονται από το θερμό διάλυμα τροφοδοσίας το οποίο και ψύχεται. Αποτέλεσμα της ψύξης του διαλύματος είναι η μείωση τελικά της τάσης κορεσμένων ατμών του έτσι ώστε τελικά να έχουμε παύση του βρασμού. Οι παραγόμενοι ατμοί υγροποιούνται στον συμπυκνωτή, ο οποίος χρησιμοποιεί ως μέσο ψύξης το εισερχόμενο διάλυμα τροφοδοσίας για λόγους οικονομίας στην κατανάλωση ενέργειας. Η παραγόμενη άλμη διοχετεύεται στο επόμενο στάδιο όπου και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία.

Στο σχήμα 1.8 παρουσιάζεται η δομή μιας βαθμίδας της πολυβάθμιας εκτόνωσης. Κάθε βαθμίδα περιλαμβάνει:

1. Το δοχείο της άλμης με διαστάσεις ίδιες με τις διαστάσεις της βαθμίδας και ύψος 20-50 cm.

2. Το σύστημα μεταφοράς της άλμης από βαθμίδα σε βαθμίδα προωθώντας ταυτόχρονα την ανάμειξη του διαλύματος.
3. Το διαχωριστήρα ατμών που αποτελείται από συρμάτινο πλέγμα σε στρώσεις. Στόχος είναι ο διαχωρισμός των σταγονιδίων άλμης που παρασύρονται από τους ατμούς.
4. Τη δέσμη σωλήνων του εναλλάκτη, μέσα στους οποίους ρέει το διάλυμα τροφοδοσίας ενώ ταυτόχρονα υγροποιούνται οι παραγόμενοι ατμοί.
5. Το δοχείο στο οποίο συλλέγεται το παραγόμενο νερό.
6. Το σύστημα εξαερισμού και δημιουργίας κενού, για την αποβολή μη συμπυκνούμενων αερίων, όπως οξυγόνο και άζωτο.
7. Όργανα ελέγχου και μετρήσεων, όπως θερμοζεύγη, δείκτες στάθμης, αγωγιμόμετρα κ.ά.



Σχήμα 1.8 Δομή μιας βαθμίδας της πολυβάθμιας εκτόνωσης [1].

Για την αποδοτική λειτουργία μιας εγκατάστασης πολυβάθμιας εκτόνωσης μπορεί να γίνουν και άλλες παρεμβάσεις όπως:

- ∅ Προ-κατεργασία του διαλύματος τροφοδοσίας με σκοπό τη μείωση της πιθανότητας δημιουργίας επικαθίσεων αλάτων ή επιστρώματος λάσπης.

- Ø Αποφυγή συσσώρευσης αερίων στο χώρο που συμβαίνει η απόσταξη με τη χρήση αντλιών κενού. Η συσσώρευση αερίων θα αυξήσει την πίεση με αποτέλεσμα την αύξηση του σημείου βρασμού.
- Ø Χρησιμοποίηση πολλών βαθμίδων. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η απόδοση της εγκατάστασης ενώ συγχρόνως απαιτείται μικρότερη επιφάνεια στους εναλλάκτες θερμότητας.
- Ø Εκμετάλλευση της παραγόμενης άλμης και του παραγόμενου νερού για προθέρμανση του διαλύματος τροφοδοσίας.
- Ø Χρήση ατμού χαμηλής πίεσης, 1.5 bar, ο οποίος είναι διαθέσιμος σε χαμηλή τιμή. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ατμός που παράγεται ως παραπροϊόν άλλων βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Η πολυβάθμια εκτόνωση δεν χρειάζεται στο πρώτο στάδιο ιδιαίτερα υψηλή θερμοκρασία. Θερμοκρασίες λίγο πάνω από 100°C θεωρούνται ικανοποιητικές.
- Ø Επαναχρησιμοποίηση της άλμης σε ανάμειξη με θαλασσινό νερό. Η παρέμβαση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους της προκατεργασίας και επίσης τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας γιατί εκμεταλλευόμαστε το θερμικό περιεχόμενο της άλμης.

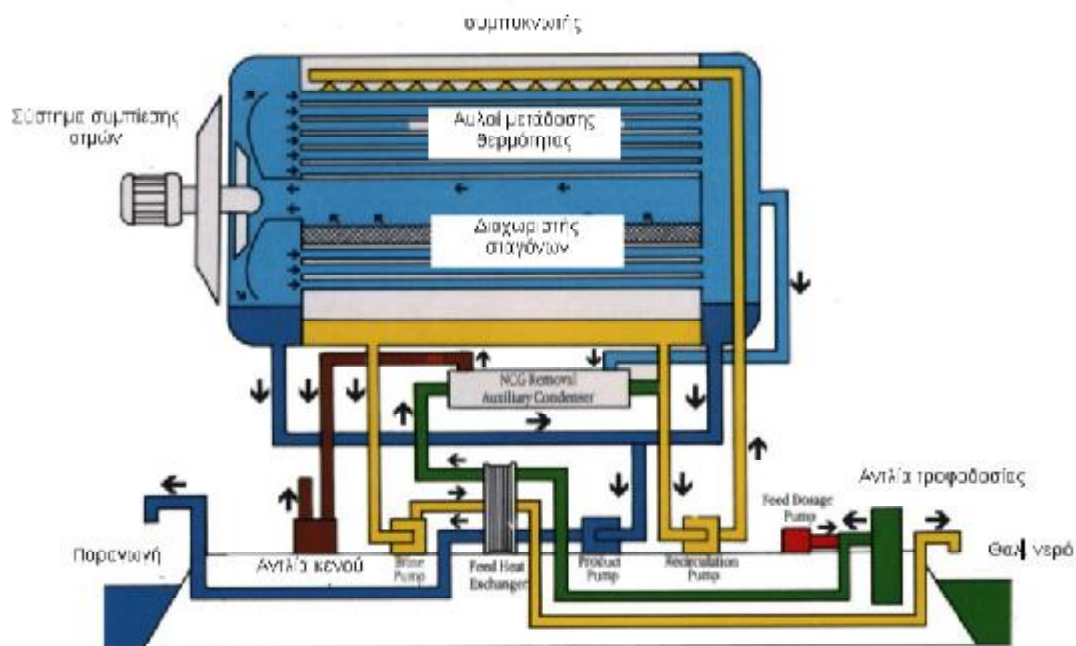
Από την εμφάνιση της μεθόδου της πολυβάθμιας εκτόνωσης στα τέλη της δεκαετίας του 1950 έχουν γίνει πολλές και σημαντικές βελτιώσεις στο σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία της μεθόδου με αποτέλεσμα να αποτελεί σήμερα την πιο αξιόπιστη θερμική μέθοδο αφαλάτωσης. Η μέθοδος της πολυβάθμιας εκτόνωσης έλυσε σοβαρά προβλήματα που παρουσιάζονταν στην απόσταξη, όπως οι επικαθίσεις αλάτων, η μόλυνση των επιφανειών και τα φαινόμενα διάβρωσης. Ο λόγος που δεν συμβαίνει σημαντική επικάθιση αλάτων είναι ότι οι ατμοί εξέρχονται από το θερμό διάλυμα σε δοχείο εξάτμισης και τα τυχόν σχηματιζόμενα άλατα παραμένουν στο διάλυμα.

Επίσης, η πολυβάθμια εκτόνωση μείωσε σημαντικά την απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή νερού με θερμική μέθοδο. Αρκεί να αναφερθεί ότι ενώ η ενέργεια που απαιτείται στις κλασσικές μεθόδους απόσταξης είναι 25-70 kWh/m<sup>3</sup>, στην πολυβάθμια εκτόνωση είναι 4-10 kWh/m<sup>3</sup>. Σήμερα το μεγαλύτερο ποσό του αφαλατωμένου νερού παγκοσμίως παράγεται με τη μέθοδο της πολυβάθμιας εκτόνωσης.



## 1.4 ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΑΤΜΟΥ

Η μέθοδος της αφαλάτωσης με συμπίεση ατμού είναι μία μέθοδος εξάτμισης που όμως αξιοποιεί την εξάρτηση του σημείου βρασμού του νερού από την ατμοσφαιρική πίεση.



Σχήμα 1.9 Σχηματική απεικόνιση της αφαλάτωσης με συμπίεση ατμών [10].

Η διαδικασία περιλαμβάνει την συμπίεση του ατμού και την αξιοποίηση της λανθάνουσας θερμότητας της εξάτμισης μέσω του συμπιεστή-εναλλάκτη θερμότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με την συμπίεση των ατμών σε υψηλότερη πίεση, και την επαναθέρμανση των ατμών σε κατάλληλη πίεση και θερμοκρασία ώστε η ενέργεια που προστίθεται στο σύστημα να αντισταθμίζει τις απώλειες πίεσης και να κρατά το διάλυμα στο σημείο βρασμού.

Θερμότητα από εξωτερική πηγή παρέχεται στο σύστημα, μόνο κατά την έναρξη της λειτουργίας της εγκατάστασης και για το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να φτάσει το διάλυμα τροφοδοσίας στο σημείο βρασμού. Με τη

διακοπή παροχής ενέργειας, το σύστημα διατηρείται σε λειτουργία μόνο από την προσφερόμενη ενέργεια του συμπιεστή και από πιθανή συμπλήρωση των απωλειών θερμότητας. Η υπόλοιπη εξωτερική ενέργεια που απαιτείται για την εγκατάσταση είναι αυτή για την κίνηση των αντλιών κυκλοφορίας των διαλυμάτων.



Εικόνα 1.3 Εγκατάσταση αφαλάτωσης με συμπίεση ατμού [10].

Η συμπίεση του ατμού μπορεί να γίνεται μηχανικά οπότε η μέθοδος ονομάζεται Μηχανική Συμπίεση Ατμών (Mechanical Vapor Compression, MVC) ή θερμικά οπότε η μέθοδος ονομάζεται Θερμική Συμπίεση Ατμών (Thermal Vapor Compression, TVC).

Η μέθοδος συμπίεσης του ατμού χρησιμοποιείται συνήθως σε μικρής με μέτριας κλίμακας μονάδες αφαλάτωσης. Οι μονάδες MVC έχουν δυνατότητα παραγωγής της τάξης των 3000 m<sup>3</sup>/ημέρα ενώ οι μονάδες που χρησιμοποιούν την TVC έχουν δυνατότητα παραγωγής της τάξης των 20000 m<sup>3</sup>/ημέρα. Τα συστήματα MVC έχουν γενικά ένα μόνο στάδιο ενώ τα συστήματα TVC έχουν συνήθως πολλά στάδια. Αυτή η διαφορά προκύπτει από το γεγονός ότι τα συστήματα MVC έχουν την ίδια ειδική κατανάλωση ισχύος (ισχύς ανά μονάδα

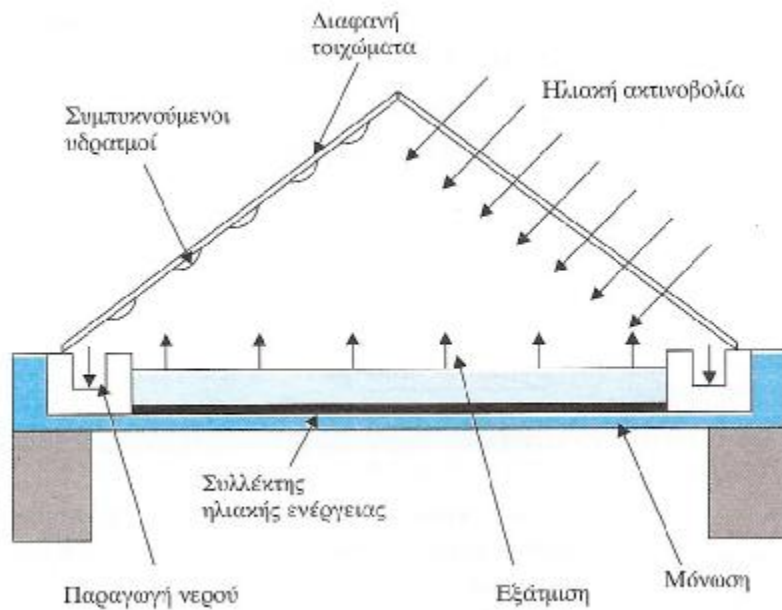
παραγόμενου νερού) ανεξάρτητα από τον αριθμό των σταδίων ενώ η απόδοση των συστημάτων TVC αυξάνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των σταδίων. Η μέγιστη καταναλισκόμενη ενέργεια μιας μονάδας αφαλάτωσης με συμπίεση ατμού είναι περίπου  $8\text{kWh/m}^3$  παραγόμενου νερού.

## 1.5 ΗΛΙΑΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΗ

Η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή αφαλατωμένου νερού είτε άμεσα, στους ηλιακούς αποστακτήρες, είτε έμμεσα. Στη δεύτερη περίπτωση η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται πρώτα σε άλλη μορφή ενέργειας η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού με κάποια από τις μεθόδους που περιγράφονται σε αυτό το κεφάλαιο.

Η ηλιακή απόσταξη νερού αποτελεί τον αρχαιότερο και απλούστερο τρόπο εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας. Οι ηλιακοί αποστακτήρες είναι γενικά απλοί στην κατασκευή τους. Αποτελούνται από ένα δοχείο εξάτμισης που η επιφάνειά απορροφά ισχυρά την ηλιακή ακτινοβολία και ένα διαφανές κάλυμμα που επιτρέπει την διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας.

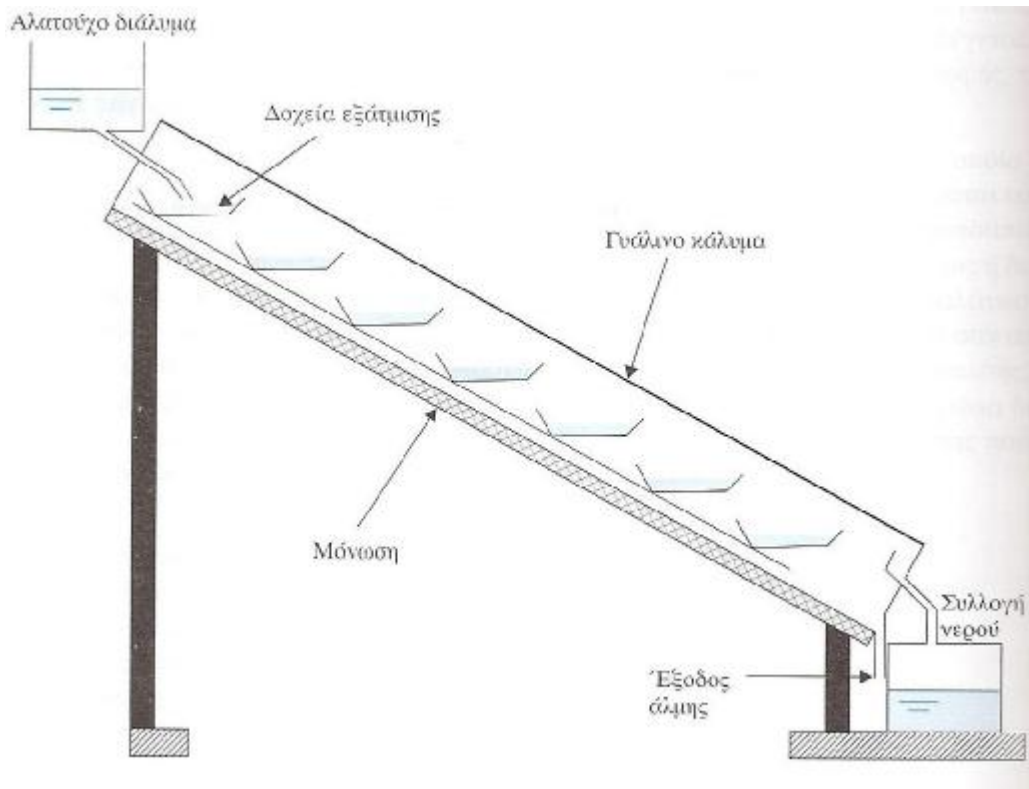
Στο σχήμα 1.10 φαίνεται ένας ηλιακός αποστακτήρας τύπου θερμοκηπίου. Η βάση του δοχείου εξάτμισης είναι πάντα καλυμμένη από ένα φωτοαπορροφητικό υλικό (μαύρη χρωστική ουσία ή διάφορα πολυμερή υλικά). Το θαλασσινό νερό διοχετεύεται στο δοχείο εξάτμισης όπου το νερό εξατμίζεται και οι υδρατμοί ανέρχονται προς τα επάνω. Στη διάφανη επιφάνεια, που συνήθως είναι κατασκευασμένη από γυαλί, οι ατμοί συμπυκνώνονται σχηματίζοντας ένα λεπτό στρώμα που ρέει προς τη βάση όπου και συλλέγεται. Η διαφανής επιφάνεια έχει κατεργασθεί εσωτερικά ώστε να διαβρέχεται από το νερό. Διαφορετικά, οι συμπυκνούμενοι ατμοί θα συσσωρεύονταν σε ορισμένα σημεία της εσωτερικής επιφάνειας σχηματίζοντας σταγονίδια τα οποία θα επέστρεφαν στο αλατούχο διάλυμα.



Σχήμα 1.10 Ηλιακός αποστακτήρας [1].

Στο σχήμα 1.11 φαίνεται ένας εναλλακτικός τρόπος σχεδιασμού που περιλαμβάνει πολλά οριζόντια δοχεία εξάτμισης ενώ ο αποστακτήρας είναι κεκλιμένος. Το θαλασσινό νερό διοχετεύεται από την κορυφή, υπερχειλίζει στα επόμενα δοχεία και τελικά αποβάλλεται ως άλμη. Το αφαλατωμένο νερό συλλέγεται από το επικλινές διαφανές κάλυμμα.

Η παραγωγή νερού των ηλιακών αποστακτήρων μπορεί να αυξηθεί σημαντικά με τη χρήση καθρεπτών, φακών κ.τ.λ. για την αύξηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και επιπλέον τα λειτουργικά έξοδα των αποστακτήρων είναι πολύ μικρά και αφορούν κυρίως έξοδα συντήρησης και άλλα απρόβλεπτα από φθορές ή βλάβες, κυρίως των αντλιών. Παρόλα αυτά η παραγόμενη ποσότητα νερού ανά τετραγωνικό μέτρο επιφανείας των δοχείων εξάτμισης είναι πολύ μικρή καθιστώντας την μέθοδο οικονομικά ασύμφορη. Δηλαδή, αν και το κόστος λειτουργίας των ηλιακών αποστακτήρων είναι σχεδόν μηδενικό, το κόστος επένδυσης ανά παραγόμενο κυβικό μέτρο νερού είναι ιδιαίτερα υψηλό.



Σχήμα 1.11 Πολλαπλός κεκλιμένος ηλιακός αποστακτήρας [1].

Γενικά, η χρήση της ηλιακής εξάτμισης για την παραγωγή αφαλατωμένου νερού μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε μονάδες μικρής δυναμικότητας και κυρίως στις περιπτώσεις που δεν είναι διαθέσιμη άλλη μορφή ενέργειας.



Εικόνα 1.4 Ηλιακοί αποστακτήρες [11].

## 1.6 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΛΥΣΗ

Η ηλεκτροδιάλυση είναι μία μέθοδος αφαλάτωσης στην οποία τα άλατα υπό μορφή ιόντων απομακρύνονται από την κύρια μάζα του νερού μέσω μεμβρανών. Η κινητήρια δύναμη που απομακρύνει τα ιόντα είναι ένα ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από ένα συνεχές ρεύμα. Έτσι, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνάρτηση της αρχικής συγκέντρωσης των ιόντων στο νερό. Γι' αυτό το λόγο η ηλεκτροδιάλυση εφαρμόζεται κυρίως για την αφαλάτωση υφάλμυρου νερού με σχετικά χαμηλή συγκέντρωση αλάτων και όχι θαλασσινού νερού.

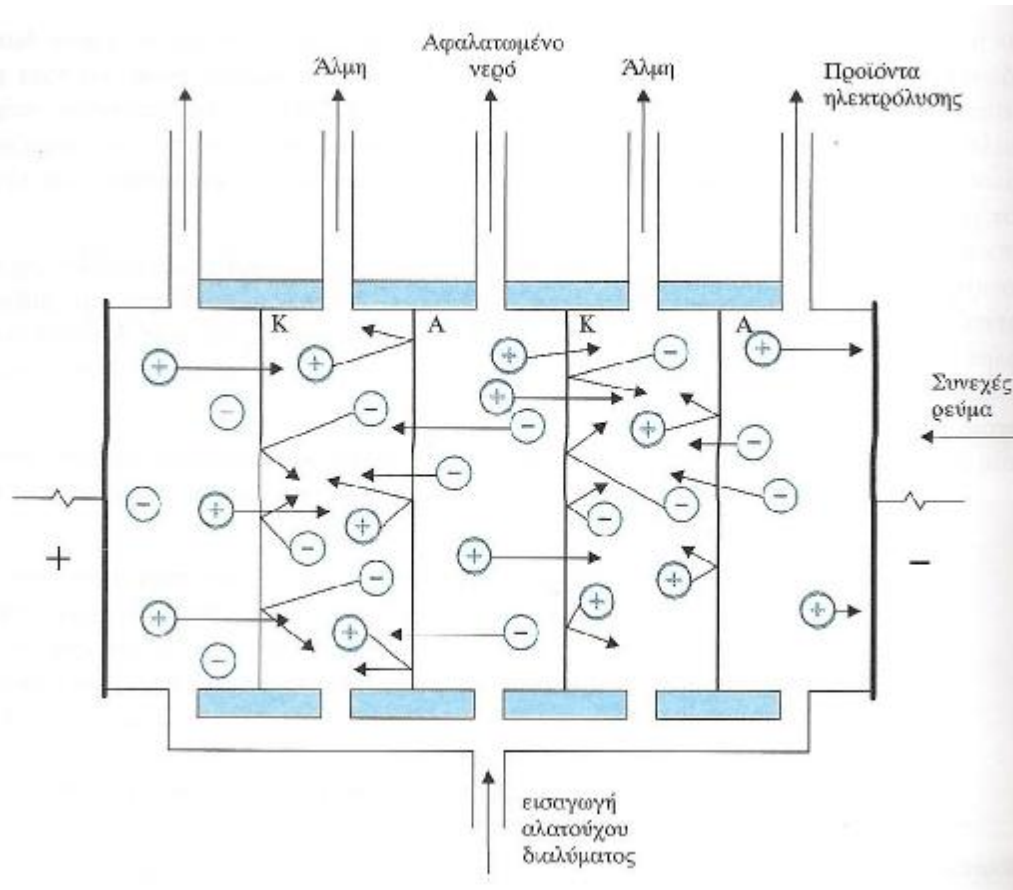


Εικόνα 1.5 Μονάδα ηλεκτροδιάλυσης [11].

Αν και η αρχή της μεθόδου είναι γνωστή εδώ και ογδόντα χρόνια, η εφαρμογή της σε μεγάλη κλίμακα πραγματοποιήθηκε τα τελευταία είκοσι πέντε χρόνια, ιδιαίτερα με την ανάπτυξη της αντίστροφης ηλεκτροδιάλυσης (Electrodialysis Reversal, EDR), όπου έχουμε συνεχή εναλλαγή της φοράς του ηλεκτρικού πεδίου. Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροδιάλυση διακρίνονται σε κατιονικές, που επιτρέπουν την διόδο των κατιόντων και ανιονικές, που επιτρέπουν την διόδο των ανιόντων.

Η δομή και η λειτουργία μιας μονάδας ηλεκτροδιάλυσης φαίνεται στο σχήμα 1.12. Η μονάδα ηλεκτροδιάλυσης αποτελείται από μία σειρά στενών θαλάμων πάχους 1mm, διά μέσω των οποίων κινείται με τη βοήθεια αντλίας το αλατούχο διάλυμα που προορίζεται για αφαλάτωση. Οι θάλαμοι πρέπει να έχουν μικρό πάχος ώστε αφενός να παρουσιάζουν μικρή ηλεκτρική αντίσταση και αφετέρου να εμποδίζεται η υπερβολική αύξηση της συγκέντρωσης των αλάτων στην επιφάνεια της μεμβράνης. Οι θάλαμοι αυτοί έχουν περιττό πλήθος και χωρίζονται μεταξύ τους από ανιονικές (Α) και κατιονικές (Κ) μεμβράνες τοποθετημένες εναλλάξ. Μεταξύ των μεμβρανών υπάρχει διαχωριστικό πλέγμα

από κάποιο αδρανές πολυμερικό υλικό έτσι ώστε οι μεμβράνες να διατηρούνται σε κάποια απόσταση μεταξύ τους.



Σχήμα 1.12 Δέσμη ηλεκτροδιάλυσης σε λειτουργία [1].

Τα εξωτερικά τμήματα φέρουν ηλεκτρόδια στα οποία διοχετεύεται συνεχές ρεύμα. Η τάξη μεγέθους της ηλεκτρικής τάσης που εφαρμόζεται είναι 1 Volt ανά κελί. Το όλο σύστημα, δηλαδή οι μεμβράνες, το πλέγμα διαχωρισμού και τα ηλεκτρόδια αποτελούν τη δέσμη ηλεκτροδιάλυσης.

Όταν τα ηλεκτρόδια συνδεθούν με μία πηγή συνεχούς ρεύματος τα ιόντα αρχίζουν να κινούνται. Τα ανιόντα κινούνται προς το θετικό ηλεκτρόδιο (άνοδος) και τα κατιόντα προς το αρνητικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος). Κατά την κίνησή τους όμως συναντούν τις μεμβράνες οι οποίες επιτρέπουν τη διέλευση μόνο σε ένα είδος από αυτά. Η διαδικασία διόδου και απόρριψης των



αντίστοιχων ιόντων από τις μεμβράνες φαίνεται στο σχήμα 1.12. Αν εστιάσουμε την προσοχή μας στο κεντρικό κελί, τα κατιόντα κινούνται από τα δεξιά προς τα αριστερά και τα ανιόντα αντίθετα. Έτσι, και τα δύο είδη ιόντων εγκαταλείπουν το κελί, με αποτέλεσμα τη μείωση της συγκέντρωσης σε άλατα του νερού και άρα την παραγωγή αφαλατωμένου νερού. Η εναλλαγή του είδους των μεμβρανών δεν επιτρέπει την αντικατάσταση των ιόντων που εγκαταλείπουν ένα κελί από ομοειδή τους ιόντα διπλανών κελιών. Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή εναλλάξ στα κελιά αφαλατωμένου νερού και άλμης. Στα δύο ακραία κελιά έχουμε προϊόντα ηλεκτρόλυσης τα οποία απορρίπτονται όπως και η άλμη.

Η καρδιά του συστήματος ηλεκτροδιάλυσης είναι οι μεμβράνες. Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται είναι ιοντικές έτσι ώστε να έχουν την δυνατότητα επιλεκτικής απόρριψης ιόντων. Είναι κατασκευασμένες από πολυμερή υλικά και είναι αδιάλυτες στο νερό.

Για την αποφυγή επικαθίσεων αλάτων στις μεμβράνες η πολικότητα αντιστρέφεται κατά ορισμένα χρονικά διαστήματα, οπότε έχουμε την αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση. Η αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση λειτουργεί με συνεχές ρεύμα του οποίου η πολικότητα αλλάζει λίγες φορές το λεπτό. Σήμερα, όλες οι εγκαταστάσεις ηλεκτροδιάλυσης χρησιμοποιούν αυτήν την εξελιγμένη τεχνική.

Η αφαλάτωση με ηλεκτροδιάλυση θα μπορούσε να ολοκληρωθεί με ένα πέρασμα του υφάλμυρου νερού. Αυτή η επιλογή θα απαιτούσε μονάδες μεγάλου όγκου και υψηλές τιμές έντασης ηλεκτρικού ρεύματος. Έτσι, προτιμάται η χρήση περισσότερων περασμάτων. Δηλαδή, τα προϊόντα από την πρώτη δέσμη διοχετεύονται σε δεύτερη, τα προϊόντα της δεύτερης σε τρίτη κ.τ.λ. Η μέθοδος της ηλεκτροδιάλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μερικών κυβικών μέτρων νερού την ημέρα μέχρι χιλιάδες κυβικά μέτρα νερού την ημέρα, χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη υφάλμυρο νερό.

Σε μία μονάδα ηλεκτροδιάλυσης καταναλώνεται ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία της δέσμης των κελιών καθώς και ενέργεια για τη λειτουργία των αντλιών διακίνησης των ρευστών. Συνήθως, η δεύτερη ενέργεια είναι πολύ μικρότερη της πρώτης. Η καταναλισκόμενη ενέργεια εξαρτάται από τη συγκέντρωση του διαλύματος και από τον επιθυμητό βαθμό απόρριψης των αλάτων. Μία πρώτη εκτίμηση της καταναλισκόμενης ενέργειας ανά κυβικό μέτρο νερού δίνεται από τη σχέση:

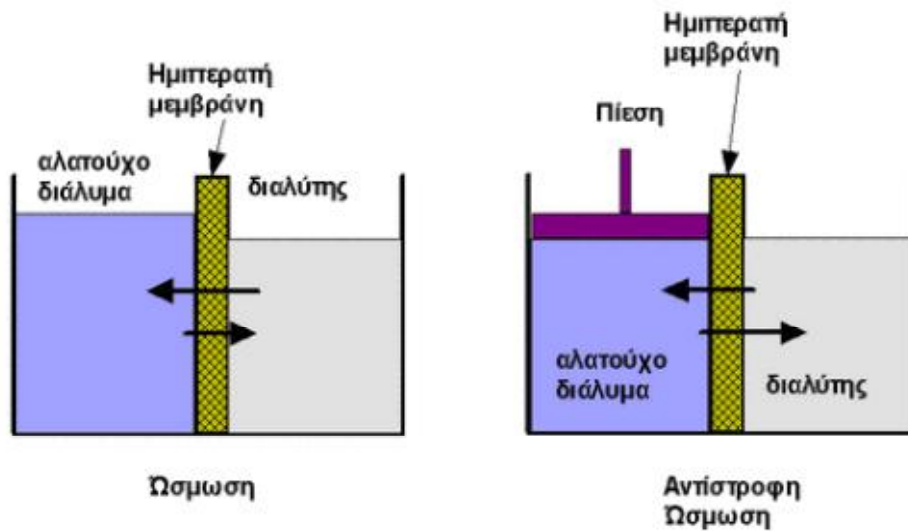
$$E(\text{kWh/m}^3)=0.7+0.7 \text{ ανά } 1000 \text{ ppm αλάτων που απορρίπτονται} \quad (1.1)$$

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η δαπανώμενη ενέργεια εξαρτάται και από τη δυναμικότητα παραγωγής της μονάδας ηλεκτροδιάλυσης ανά μονάδα επιφάνειας μεμβρανών. Πιο συγκεκριμένα, όσο πιο γρήγορα παράγεται νερό από τη μονάδα ηλεκτροδιάλυσης τόσο μεγαλύτερο ποσό ενέργειας δαπανάται ανά χιλιόγραμμο παραγόμενου νερού.

## 1.7 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ

Η αντίστροφη ώσμωση είναι μία διαδικασία αφαλάτωσης με την οποία ο διαλύτης ενός διαλύματος, που συνήθως είναι το νερό, μεταφέρεται μέσω κατάλληλης μεμβράνης και διαχωρίζεται από τα άλλα συστατικά του διαλύματος με την άσκηση εξωτερικής πίεσης. Οι ημιπερατές μεμβράνες που επιτρέπουν την διόδου του νερού αλλά όχι των αλάτων αποτελούν την καρδιά του συστήματος αφαλάτωσης με την μέθοδο αυτή.

Η μέθοδος αυτή είναι το αντίστροφο φαινόμενο από το φαινόμενο της ώσμωσης, το οποίο απαντάται πολύ συχνά στη φύση και στις λειτουργίες των κυττάρων, όπως π.χ. του δέρματος, των νεφρών κ.τ.λ. Οι βασικές αρχές της ώσμωσης και της αντίστροφης ώσμωσης φαίνονται παραστατικά στο σχήμα 1.13. Στο αριστερό δοχείο του σχήματος 1.13 η ταχύτητα διόδου του νερού από τον καθαρό διαλύτη προς το διάλυμα είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα διόδου από το διάλυμα προς το διαλύτη. Έτσι μακροσκοπικά μεταφέρεται νερό προς το αλατούχο διάλυμα με σκοπό την εξίσωση των συγκεντρώσεων και το φαινόμενο ονομάζεται ώσμωση.



Σχήμα 1.13 Ωσμωση και αντίστροφη ώσμωση [1].

Η εξωτερική πίεση που θα έπρεπε να ασκήσουμε ώστε να σταματήσει το φαινόμενο της ώσμωσης ονομάζεται ώσμωση και δίνεται από το γνωστό νόμο του van' t Hoff:

$$\Pi = CRT \quad (1.2)$$

όπου:

$\Pi$  η οσμωτική πίεση,

$C$  η συγκέντρωση του διαλύματος,

$R$  η σταθερά των ιδανικών αερίων,

$T$  η απόλυτη θερμοκρασία.

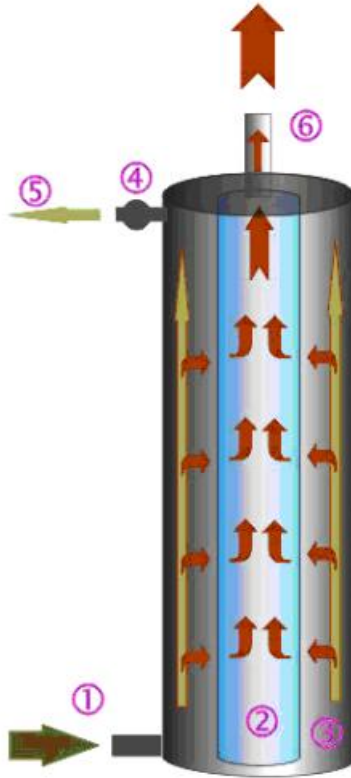
Εάν τώρα, όπως στο δεξιό δοχείο του σχήματος 1.13, ασκήσουμε μία εξωτερική πίεση μεγαλύτερη από την οσμωτική πίεση, με τη βοήθεια ενός εμβόλου στην πλευρά του διαλύματος, τότε το νερό θα μεταφέρεται από το διάλυμα προς το διαλύτη. Αυτή είναι η διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης.

Η διεργασία της αντίστροφης όσμωσης φαίνεται αναλυτικά στο σχήμα 1.14. Το προς καθαρισμό νερό εισέρχεται, με τη βοήθεια μιας αντλίας υψηλής πίεσης, από την είσοδο (1) στη συσκευή και καταλαμβάνει το χώρο (3). Υπάρχουν δυο διέξοδοι: η (5) και η (6). Ο χώρος (3) βρίσκεται υπό πίεση και το νερό εξαναγκάζεται κατά ποσοστό 25% περίπου να διέλθει μέσα από τη μεμβράνη (2), οπότε και καθαρίζεται και εξέρχεται από την (6) ως προϊόν, είτε μόλις η πίεση ξεπεράσει το όριο της βαλβίδας (4) να βγει από την έξοδο (5), σε ποσοστό 75% περίπου, παρασύροντας μαζί του και τις ακαθαρσίες.

Η πίεση λειτουργίας μιας εγκατάστασης αντίστροφης όσμωσης καλείται να υπερνικήσει:

- Ø την οσμωτική πίεση
- Ø τις απώλειες τριβών
- Ø την αντίσταση των μεμβρανών
- Ø την πίεση εκροής του προϊόντος νερού

Όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση λειτουργίας της εγκατάστασης από το άθροισμα των παραπάνω όρων τόσο μεγαλύτερη θα είναι η παροχή μέσω της μεμβράνης και άρα η διεργασία θα είναι περισσότερο αξιοποιήσιμη στην πράξη.



Σχήμα 1.14 Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας μιας συσκευής αντίστροφης ώσμωσης [15].

Η διαπερατότητα (permeability) ενός συστατικού του διαλύματος αλλά και του διαλύτη μέσω της μεμβράνης δείχνει την ικανότητα διόδου από αυτήν. Δίνεται συνήθως ως παροχή ανά μονάδα εφαρμοζόμενης πίεσης και ανά μονάδα εμβαδού της μεμβράνης και είναι χαρακτηριστικό μέγεθος για κάθε μεμβράνη σε σταθερή θερμοκρασία. Συμβολίζεται με το  $k$  και μετράται σε μονάδες  $s/m$ .

Για την σωστή και αποδοτική λειτουργία μιας μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης απαιτείται η προεπεξεργασία του διαλύματος τροφοδοσίας καθώς και η μετεπεξεργασία του παραγόμενου νερού. Αναλυτικά τα στάδια που αποτελούν την συνολική διεργασία είναι τα παρακάτω:

### Στάδιο προεπεξεργασίας

Το πρώτο αυτό στάδιο επεξεργασίας του θαλασσινού νερού είναι το πιο σημαντικό, διότι ουσιαστικά συμβάλλει στην προστασία των μεμβρανών. Δηλαδή πρέπει να καταστραφούν οι μικροοργανισμοί και να αποφευχθεί η εναπόθεση αλάτων στις μεμβράνες. Η προεπεξεργασία του θαλάσσιου νερού συνήθως περιλαμβάνει:

- Ø Φίλτρο εισόδου (με τοποθέτηση σχάρας στην αναρρόφηση για να μην μπορούν να εισέλθουν ψάρια, φύκια και πλαστικά)
- Ø Προχλωρίωση του θαλάσσιου νερού (συνήθως με διάλυμα υποχλωριώδους νατρίου)
- Ø Προσθήκη οξέος (συνήθως θειικό οξύ για τη ρύθμιση της οξύτητας και την αποφυγή απόθεσης αλάτων)
- Ø Συσσωμάτωση των κolloειδών/οργανικών ουσιών (με προσθήκη χλωριούχου σιδήρου και πολυηλεκτρολύτη)
- Ø Φίλτρο άμμου το οποίο περιλαμβάνει άμμο, χαλίκια και ανθρακίτη με σκοπό την κατακράτηση ακόμα μικρότερων στερεών αιωρούμενων σωματιδίων
- Ø Φίλτρα πολυπροπυλενίου τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατακράτηση των στερεών ουσιών με μέγεθος μέχρι και 1μm. Τα σωματίδια αυτά μπορεί να προκαλέσουν φθορές στις μεμβράνες
- Ø Αποχλωρίωση. Πραγματοποιείται με θειούχο νάτριο ή φίλτρο ενεργού άνθρακα γιατί οι μεμβράνες καταστρέφονται παρουσία ελεύθερου χλωρίου
- Ø Αποστείρωση με υπεριώδη ακτινοβολία

### Στάδιο αντίστροφης ώσμωσης

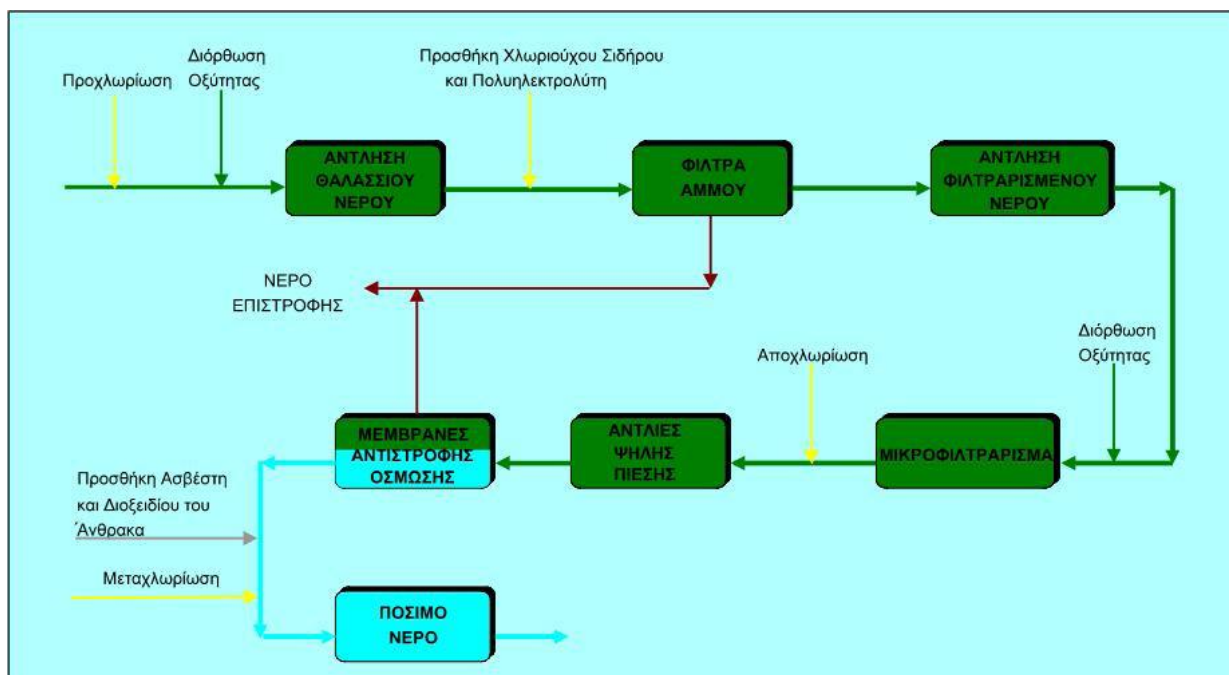
Στο στάδιο του διαχωρισμού στις μεμβράνες, οι αντλίες υψηλής πίεσης παρέχουν την απαιτούμενη πίεση ώστε το νερό να περάσει μέσα από τις μεμβράνες απορρίπτοντας τα άλατά που περιέχει. Αυτή η πίεση κυμαίνεται από 54 έως και 80 atm. Καθώς ένα μέρος του νερού περνάει μέσα από τις μεμβράνες, η συγκέντρωση των αλάτων στο υπόλοιπο νερό αυξάνεται. Συγχρόνως ένα μέρος του νερού που οδηγείται στις μεμβράνες απορρίπτεται χωρίς να περάσει μέσα από αυτές. Χωρίς αυτή την ελεγχόμενη απόρριψη, η συγκέντρωση των αλάτων στο νερό θα συνέχιζε να αυξάνει, με αποτέλεσμα την εναπόθεση των υπερκορεσμένων αλάτων και την αύξηση της οσμωτικής πίεσης κατά μήκος των μεμβρανών. Η ποσότητα του νερού αυτού είναι μεταξύ 20%

και 70% της ροής τροφοδοσίας και εξαρτάται από τη συγκέντρωση των αλάτων στο νερό τροφοδοσίας.

### Τελικό στάδιο επεξεργασίας

Στο τελικό στάδιο επεξεργασίας γίνεται η σταθεροποίηση του παραγόμενου νερού καθώς και η προετοιμασία του για τη διανομή του στο δίκτυο ως πόσιμο νερό. Το στάδιο αυτό μπορεί να αποτελείται από:

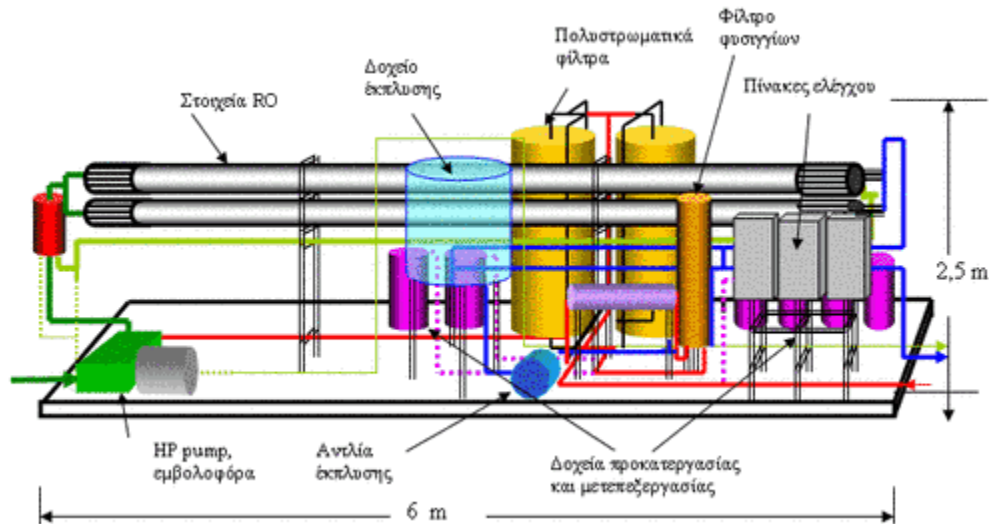
- Ø Απομάκρυνση διαφόρων αερίων, όπως το υδρόθειο
- Ø Ρύθμιση της οξύτητας, δηλαδή του pH, και αύξηση της σκληρότητας του νερού με προσθήκη ειδικά επεξεργασμένου ασβέστη και διοξειδίου του άνθρακα
- Ø Τελική χλωρίωση



Σχήμα 1.15 Διάγραμμα ροής της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση [13].

Η συνολική διαδικασία της αντίστροφης ώσμωσης συμπεριλαμβανομένων των σταδίων προ και μετά-επεξεργασίας του νερού

φαίνεται σχηματικά στο διάγραμμα ροής του σχήματος 1.15 ενώ η δομή μιας τέτοιας μονάδας φαίνεται στο σχήμα 1.16.



Σχήμα 1.16 Δομή μιας μικρής μονάδας αντίστροφης ώσμωσης [16].

Είναι φανερό ότι στη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης η ενέργεια που απαιτείται καταναλώνεται σχεδόν εξ' ολοκλήρου στις αντλίες για τη συμπίεση του νερού. Επειδή η οσμωτική πίεση (που πρέπει να υπερνικηθεί) είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των αλάτων, η αντίστροφη ώσμωση είναι η πρώτη επιλογή για υφάλμυρα νερά, με την απαιτούμενη πίεση λειτουργίας να είναι 15-25 bar, ενώ για θαλάσσιο νερό είναι 54-80 bar, αφού η οσμωτική του πίεση είναι περίπου 25 bar. Η σημαντικότερη απώλεια ενέργειας είναι η εκτόνωση της άλμης, όταν βγαίνει με υψηλή πίεση απ' τη συσκευή και γι' αυτό, σε μεγάλες κυρίως μονάδες, υπάρχουν συστήματα ανάκτησης της ενέργειας αυτής, π.χ. υδροστρόβιλοι, με αποτελεσματικότητα μέχρι και 95%.





Εικόνα 1.6 Μονάδα Αντίστροφης Ώσμωσης Θαλασσινού Νερού,  $1.5 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ , Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας [11].

Η υπάρχουσα τεχνολογία των μεμβρανών σήμερα μας παρέχει τιμές απόρριψης άλατος μεγαλύτερες του 90% (πίνακας 1.1) τόσο για θαλασσινό όσο και για υφάλμυρο νερό. Το ποσοστό ανάκτησης στις μεμβράνες ξεκίνησε από χαμηλά ποσοστά, της τάξης του 10-20% για να φτάσει σήμερα σε τιμές άνω του

50%. Αυτό οφείλεται στην ωρίμανση της τεχνολογίας σχεδίασης και κατασκευής των μεμβρανών.

Πίνακας 1.1 Τυπικές απορρίψεις στερεών ουσιών από τις μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης [12]

Ουσία	Ποσοστιαία Απόρριψη (%)	Ουσία	Ποσοστιαία Απόρριψη (%)
Νάτριο	95-97	Χλώριο	95-97
Ασβέστιο	96-98	Βρώμιο	94-96
Μαγνήσιο	96-98	Κυάνιο	90-95
Κάλιο	95-97	Βάριο	95-98
Σίδηρος	98-99	Ράδιο	95-98
Μαγγάνιο	98-99	Σελήνιο	95-98
Αλουμίνιο	99+	Στρόντιο	95-98
Αμμωνία	88-95	Φθορίδιο	90-95
Χαλκός	98-99	Μόλυβδος	95-98
Νικέλιο	98-99	Θειικό άλας	95-98
Ψευδάργυρος	98-99	Χρωμικό άλας	90-95
Κάδμιο	96-98	Απορρυπαντικά	95-98
Άργυρος	94-96	Εντομοκτόνα	95-98

Συγκεντρωτικά, η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

Απομάκρυνση των διαλυμένων αλάτων

Η αντίστροφη όσμωση μπορεί να απομακρύνει σταθερά και αποτελεσματικά τα διαλυμένα άλατα, τις διαλυμένες οργανικές ουσίες, τα μικροσκοπικά σωματίδια (ζωντανά και νεκρά μικρόβια και πολλά άλλα μικροσκοπικά σωματίδια) από το νερό. Συνεπώς, είναι ιδανική για ένα μεγάλο τομέα εφαρμογών από την παραγωγή πεντακάθολου νερού έως την αφαλάτωση θαλασσινού νερού.

#### Τεχνική διαχωρισμού για εξοικονόμηση ενέργειας

Η αντίστροφη όσμωση προφυλάσσει το νερό από την εξάτμιση, αποτελώντας μία ενεργειακά οικονομική τεχνική διαχωρισμού που απαιτεί λιγότερη κατανάλωση ενέργειας.

#### Εύχρηστη ως μέθοδος συγκέντρωσης και αποκατάστασης

Η αντίστροφη όσμωση δεν χρειάζεται θέρμανση, μπορεί να συγκεντρώσει και να μετατρέψει πολύτιμα υλικά της διαδικασίας σε διαλυτή μορφή χωρίς τον εκφυλισμό που θα μπορούσε να είχαν υποστεί τέτοια υλικά κάτω από άλλες συνθήκες.

#### Συμπαγής εξοπλισμός

Οι μονάδες μπορούν να κατανεμηθούν σε μία τρισδιάστατη διάθρωση, που να παρέχει εξαιρετική αποτελεσματικότητα χώρου, έτσι ώστε ο χώρος που χρειάζεται για την εγκατάσταση να ελαχιστοποιηθεί.

#### Απλός χειρισμός και έλεγχος

Η αντίστροφη όσμωση είναι απλή διαδικασία, χωρίς περίπλοκο χειρισμό και έλεγχο, ενώ η συντήρηση γίνεται εύκολα και χωρίς προβλήματα.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται κάποια στοιχεία που χαρακτηρίζουν την εξέλιξη της τεχνολογίας της αντίστροφης όσμωσης τα τελευταία χρόνια. Να σημειωθεί ότι σήμερα, με την εξέλιξη της τεχνολογίας των μεμβρανών, η ειδική κατανάλωση ενέργειας είναι ακόμη μικρότερη.

Πίνακας 1.2 Εξέλιξη της Τεχνολογίας Αντίστροφης Όσμωσης [14]

Παράμετρος	1980	1990	2000
Ανάκτηση (%)	25	40-50	55-65
Πίεση λειτουργίας (bar)	70	83	97
Περιεκτικότητα TDS παραγόμενου νερού (ppm)	500	300	<200
Ειδική κατανάλωση ενέργειας (kWh/m <sup>3</sup> )	12	6	2-5

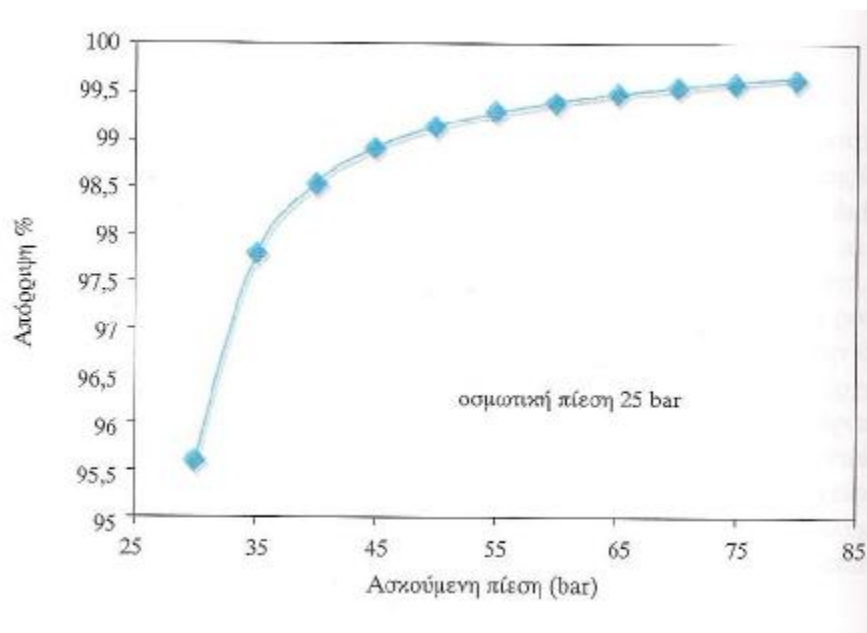


Εικόνα 1.7 Μονάδα αντίστροφης όσμωσης υφάλμυρου νερού [11].

## 1.8 ΟΙ ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ

Μία μεμβράνη για να είναι κατάλληλη για τη διεργασία της αντίστροφης όσμωσης, θα πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

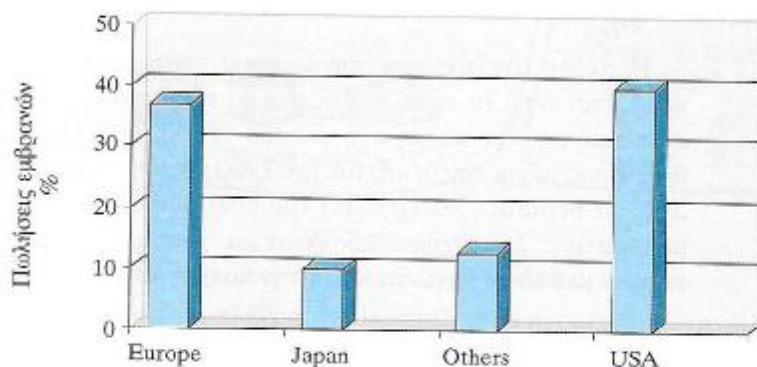
- Ø Μεγάλη απόρριψη αλάτων με υψηλή διαπερατότητα διαλύτη.
- Ø Ικανότητα να σχηματίζει λεπτά διαχωριστικά στρώματα μεγάλης αντοχής.
- Ø Ικανότητα κατασκευής με μεγάλο λόγο επιφάνειας προς όγκο.
- Ø Μεγάλο εύρος λειτουργικών παραμέτρων, πίεσης, θερμοκρασίας και είδους διαλύματος τροφοδοσίας.
- Ø Μεγάλη διάρκεια ζωής. Η διάρκεια ζωής κυμαίνεται από 3-5 χρόνια, εξαρτώμενη από την ποιότητα του νερού προς επεξεργασία και τον τρόπο χρήσης και καθαρισμού.
- Ø Μεγάλη αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια και βιολογικές επιθέσεις.
- Ø Ικανότητα λειτουργίας σε μεγάλο εύρος pH.
- Ø Χαμηλό κόστος.



Σχήμα 1.17 Απόρριψη αλάτων συναρτήσει της ασκούμενης πίεσης μιας τυπικής μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης [1].

Η απόρριψη αλάτων μιας μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης αυξάνεται αυξανόμενης της ασκούμενης πίεσης (σχήμα 1.17) και μειώνεται αυξανόμενης της θερμοκρασίας ή της συγκέντρωσης σε άλατα του διαλύματος τροφοδοσίας.

Στο σχήμα 1.18 φαίνεται η κατανομή της παγκόσμιας αγοράς μεμβρανών. Αξίζει να αναφερθεί ότι η παγκόσμια αγορά μεμβρανών πάσης φύσεως αναμένεται να αυξηθεί από 17 δισεκατομμύρια δολάρια το 1998 σε 75 δισεκατομμύρια δολάρια το 2020.



Σχήμα 1.18 Παγκόσμια αγορά μεμβρανών [1].

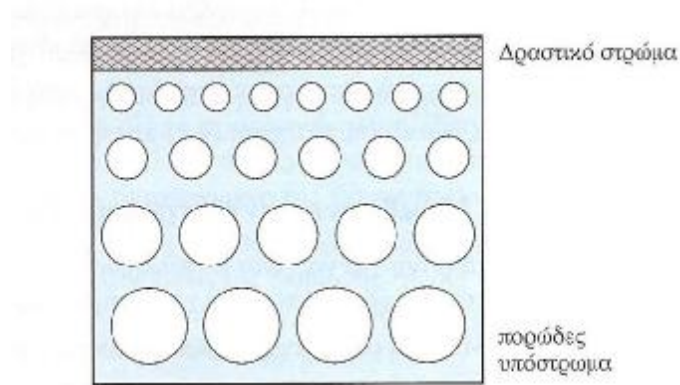
Μέχρι σήμερα δεν έχει κατασκευαστεί καμία μεμβράνη που να ικανοποιεί όλες τις παραπάνω ιδιότητες. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης:

- Ø Οι ασύμμετρες μεμβράνες
- Ø Οι σύνθετες μεμβράνες

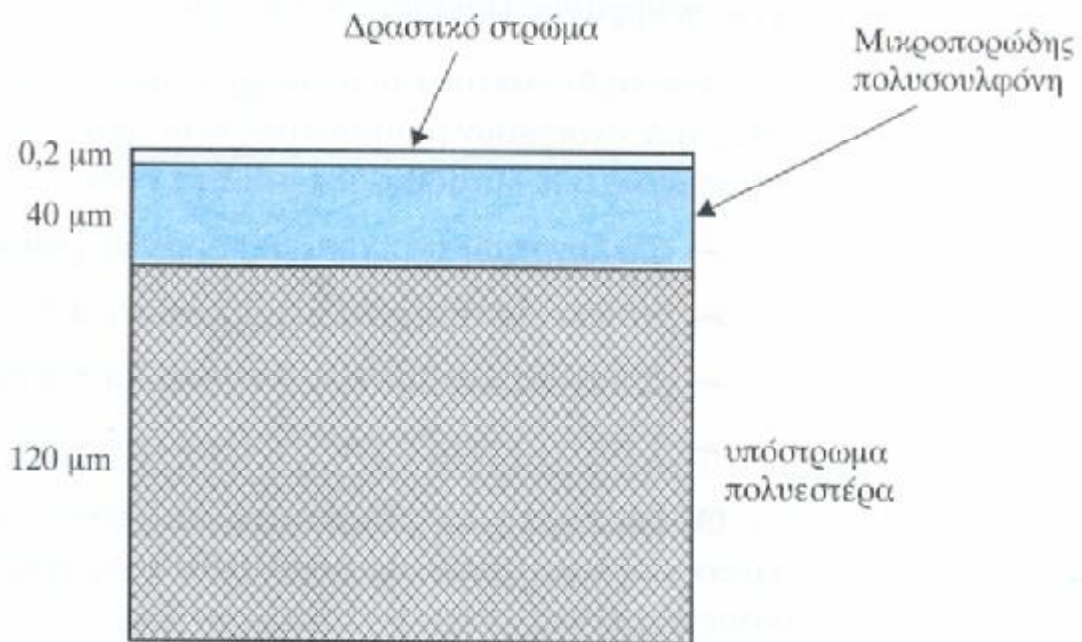
Το πρώτο είδος μεμβρανών που χρησιμοποιήθηκε για αφαλάτωση από τους Loeb και Sourirajan ήταν ασύμμετρη μεμβράνη οξικής κυτταρίνης (cellulose acetate, CA) στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Οι σημερινές μεμβράνες CA κατασκευάζονται από μίγμα διοξεικής και τριοξεικής κυτταρίνης. Οι ασύμμετρες μεμβράνες αποτελούνται από δύο διαφορετικά στρώματα. Υπάρχει ένα πολύ λεπτό στρώμα (πάχους 0.1-2  $\mu\text{m}$ ), με ιδιότητες απόρριψης των αλάτων στην κορυφή και ακολουθεί ένα πορώδες υπόστρωμα πάχους 100-200  $\mu\text{m}$  χωρίς ιδιότητες απόρριψης. Η δημιουργία της ασύμμετρης δομής των μεμβρανών οφείλεται στον τρόπο παραγωγής τους.

Αυτή η ειδική κατασκευή συνδυάζει καλές ιδιότητες απόρριψης αλάτων και υψηλή διαπερατότητα του νερού. Το εξωτερικό λεπτό στρώμα είναι

υπεύθυνο για την απόρριψη των αλάτων, ενώ ταυτόχρονα λόγω του μικρού πάχους του επιτρέπει ικανοποιητική διαπερατότητα από το νερό. Το πορώδες υπόστρωμα παρέχει την απαιτούμενη μηχανική αντοχή ώστε η μεμβράνη να αντέχει τις εφαρμοζόμενες υψηλές πιέσεις.



Σχήμα 1.19 Ασύμμετρες μεμβράνες [1].



Σχήμα 1.20 Σύνθετες μεμβράνες [1].

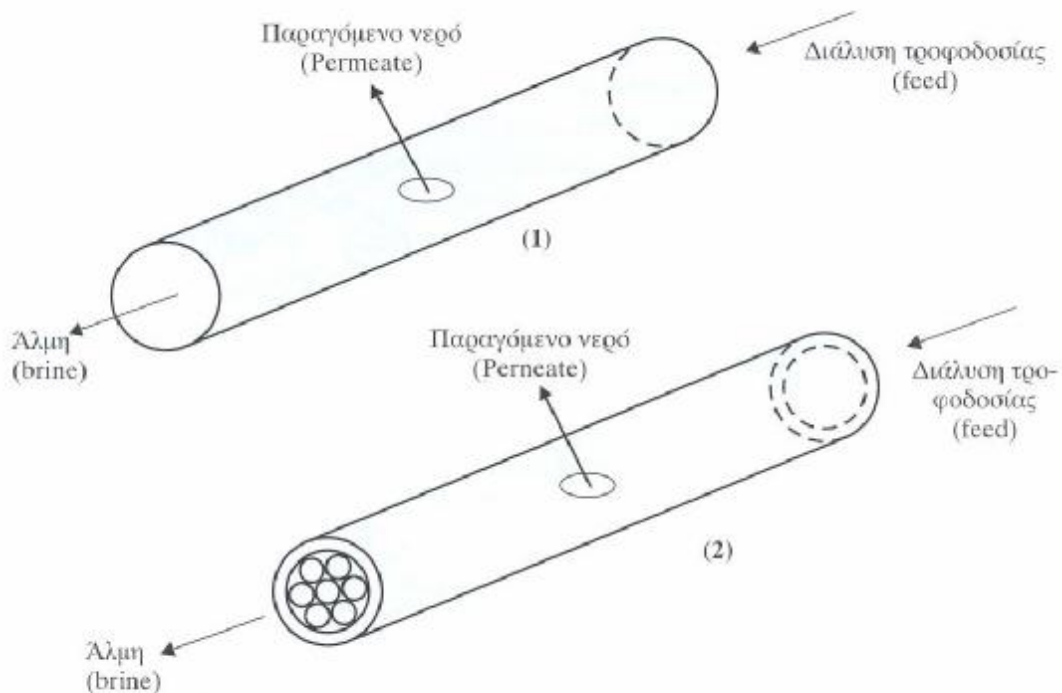
Σύμφωνα με τα προηγούμενα κάθε στρώμα στις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης έχει διαφορετικές ιδιότητες. Έτσι είναι λογικό να προσπαθήσει κανείς να κατασκευάσει τα δύο στρώματα σε διαφορετικά στάδια. Έτσι κατασκευάζεται πρώτα το υπόστρωμα στήριξης που αποτελείται από πολυεστέρα, στην επιφάνεια του οποίου τοποθετείται ένα στρώμα μικροπορώδους πολυσουλφόνης στην κορυφή του οποίου τοποθετείται η μεμβράνη που έχει και τις απορριπτικές ιδιότητες. Το λεπτό στρώμα με τις απορριπτικές ιδιότητες είναι κατασκευασμένο από αρωματικά πολυαμίδια (aromatic polyamides, AP). Η μορφή των σύνθετων μεμβρανών δίνεται στο σχήμα 1.20.

Η διαπερατότητα των μεμβρανών σε νερό είναι σχετικά μικρή. Έτσι, για να έχουμε ικανοποιητική παραγωγή νερού θα πρέπει η επιφάνεια των μεμβρανών να είναι σημαντική. Όταν αναφερόμαστε στις μεμβράνες δεν εννοούμε μόνο το ενεργό στρώμα που εκτελεί τη διαδικασία της αφαλάτωσης αλλά και το υπόστρωμα. Ο όρος που χρησιμοποιείται για το ενεργό στρώμα και το υπόστρωμα συνολικά είναι στοιχείο μεμβράνης (membrane module). Από τη δεκαετία του 1960 έως σήμερα έχουν δοκιμαστεί διάφορες διαμορφώσεις των στοιχείων μεμβρανών έτσι ώστε να επιτευχθεί μέγιστος λόγος επιφάνειας προς όγκο. Οι διαμορφώσεις αυτές είναι:

- Ø Σωληνοειδή στοιχεία μεμβρανών
- Ø Δισκοειδή στοιχεία μεμβρανών
- Ø Στοιχεία μεμβρανών σπειροειδούς περιέλιξης
- Ø Στοιχεία μεμβρανών κοίλων ινών

Οι δύο τελευταίες διαμορφώσεις είναι αυτές που κυριαρχούν στην παγκόσμια αγορά ενώ οι δύο πρώτες χρησιμοποιούνται κυρίως για ερευνητικούς σκοπούς.

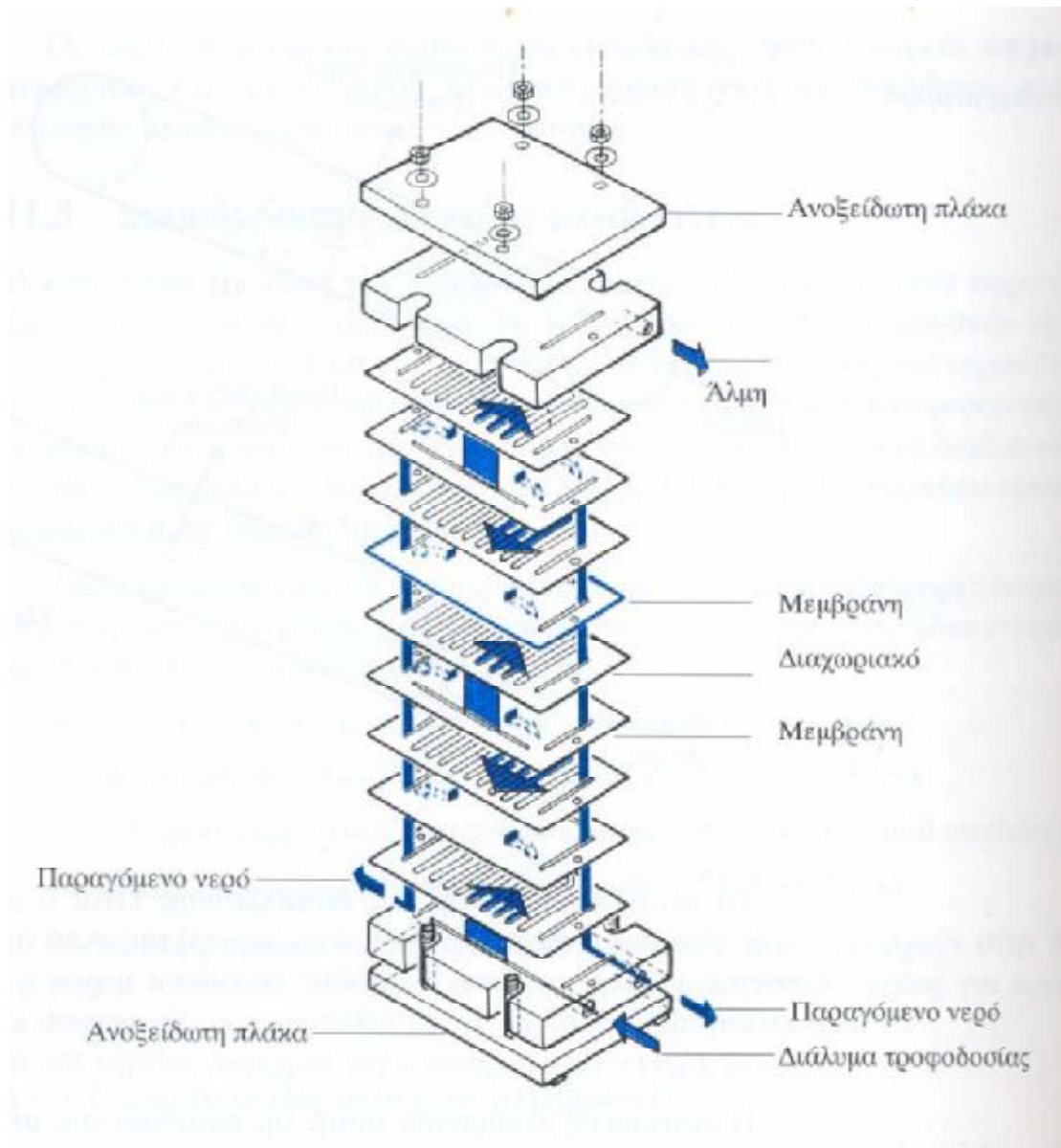




Σχήμα 1.21 Σωληνοειδείς μεμβράνες [1].

Τα σωληνοειδή στοιχεία μεμβρανών έχουν τη μορφή σωλήνων διαμέτρου 0.7-2.5 cm, οι οποίοι τοποθετούνται στο εσωτερικό ειδικών δοχείων με ανθεκτικά τοιχώματα. Η ενεργή επιφάνεια του στοιχείου μεμβράνης βρίσκεται στο εσωτερικό της. Έτσι, το διάλυμα τροφοδοσίας διοχετεύεται στο εσωτερικό του στοιχείου. Το παραγόμενο νερό εξέρχεται κάθετα στη διεύθυνση ροής ενώ από το άλλο άκρο εξέρχεται η άλμη. Το δοχείο μπορεί να περιέχει ένα ή περισσότερα στοιχεία μεμβρανών.

Το μειονέκτημα αυτής της διαμόρφωσης είναι ο μικρός λόγος επιφάνειας προς όγκο με αποτέλεσμα τη μείωση της παραγωγικής της ικανότητας. Από την άλλη πλευρά επιτυγχάνονται μεγάλοι αριθμοί Reynolds έτσι ώστε η ροή να είναι τυρβώδης ενώ η πτώση πίεσης είναι πολύ μικρή λόγω της μεγάλης σχετικά διαμέτρου. Οι δύο αυτοί παράγοντες αυξάνουν την παραγωγικότητα του στοιχείου αυτού.



Σχήμα 1.22 Δισκοειδή στοιχεία μεμβρανών της εταιρείας Millipore [1].

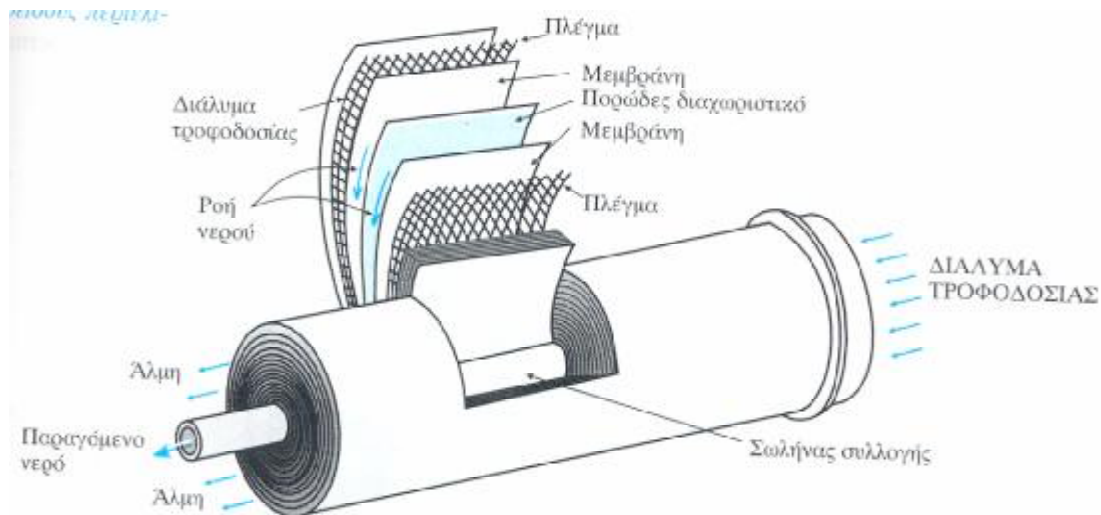
Τα δισκοειδή στοιχεία μεμβρανών εναλλάσσονται με διαχωριστήρες. Τα στοιχεία αυτά έχουν την μορφή φακέλου με διαχωριστήρα στο εσωτερικό τους. Έτσι, το αλατούχο διάλυμα ρέει εξωτερικά του φακέλου των μεμβρανών υπό πίεση μέσω των σχισμών που υπάρχουν. Το νερό διέρχεται από τις μεμβράνες στο εσωτερικό του φακέλου και εξέρχεται από την ειδική σχισμή από όπου και συλλέγεται.

Στη διαμόρφωση της ελικοειδούς περιέλιξης δύο επίπεδα στοιχεία μεμβρανών τοποθετούνται το ένα απέναντι από το άλλο με τις δραστικές επιφάνειές τους στην εξωτερική πλευρά. Μεταξύ των μεμβρανών τοποθετείται πορώδες πολυμερές υλικό. Οι τρεις πλευρές συγκολλώνται ενώ η τέταρτη παραμένει ανοιχτή σχηματίζοντας ένα φάκελο. Το πορώδες φύλο τοποθετείται έτσι ώστε οι μεμβράνες να μην έρχονται σε επαφή όταν ασκείται υψηλή πίεση και επιτρέπει στο παραγόμενο νερό να κινείται στο εσωτερικό των μεμβρανών προς το ανοιχτό άκρο του φακέλου. Το ανοικτό άκρο του φακέλου συγκολλάται στο σωλήνα συλλογής του παραγόμενου νερού. Ο σωλήνας αυτός είναι διάτρητος στα σημεία που βρίσκονται εντός του φακέλου των μεμβρανών, έτσι ώστε το παραγόμενο νερό εισέρχεται σε αυτόν και εξέρχεται από το άκρο του σωλήνα. Ο φάκελος τυλίγεται γύρω από το σωλήνα συλλογής μαζί με ειδικό πολυμερές πλέγμα, σχηματίζοντας την σπειροειδή περιέλιξη. Το πλέγμα δημιουργεί τον κατάλληλο χώρο μεταξύ των μεμβρανών ώστε να μπορεί να κινείται το αλατούχο διάλυμα, ενώ ταυτόχρονα δημιουργεί στροβίλους, εμποδίζοντας τον σχηματισμό στρωτής ροής. Το όλο σύστημα καλύπτεται από ειδική ρητίνη με υαλοβάμβακα και τοποθετείται σε ειδικό δοχείο πίεσης.

Στην πραγματικότητα κάθε στοιχείο μεμβράνης δεν περιέχει ένα φάκελο αλλά περισσότερους έτσι ώστε να μειωθεί το μήκος του δημιουργούμενου φακέλου για ένα ορισμένο όγκο. Το αλατούχο διάλυμα κινείται αξονικά κατά μήκος του σωλήνα συλλογής, ενώ το παραγόμενο νερό εισέρχεται εγκάρσια στο εσωτερικό του φακέλου, κινείται σπειροειδώς μέχρις ότου φτάσει στο σωλήνα συλλογής από το άκρο του οποίου εξέρχεται. Ένα ή περισσότερα στοιχεία μεμβρανών μπορούν να τοποθετούνται στη σειρά εντός των δοχείων πίεσης σχηματίζοντας ένα στοιχείο αντίστροφης ώσμωσης. Η πίεση λειτουργίας αυτών των στοιχείων φτάνει τα 80 bar, ενώ παρουσιάζουν υψηλό λόγο επιφάνειας προς όγκο. Σήμερα αποτελούν την πλέον διαδεδομένη διαμόρφωση μεμβρανών.

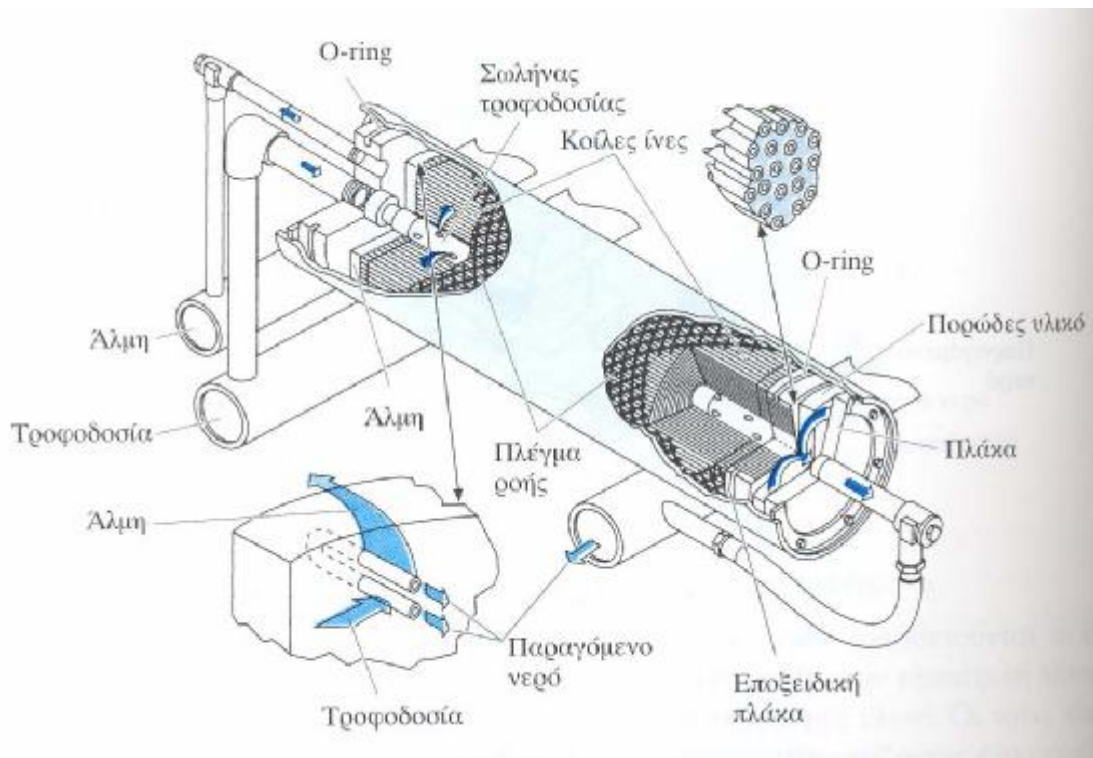
Οι μεμβράνες κοίλων ινών μπορούν να θεωρηθούν ως σωλήνες μεγάλου πάχους τοιχωμάτων και πολύ μικρού μεγέθους που δεν χρειάζονται καμία υποστήριξη. Οι κοίλες ίνες κάμπτονται στο μέσον για να σχηματίσουν σχήμα U και σχηματίζουν δέσμη διατασσόμενες παράλληλα με το κεκαμμένο άκρο τους βυθισμένο μέσα σε ειδική ρητίνη. Το αλατούχο διάλυμα κινείται κάθετα προς τις κοίλες ίνες υπό υψηλή πίεση. Λόγω της ασκούμενης πίεσης το νερό εισέρχεται στο εσωτερικό των κοίλων ινών που αποτελούν τις ασύμμετρες μεμβράνες και κινείται κατά μήκος τους εξερχόμενο από το ανοικτό άκρο τους που βρίσκεται σε ειδικό πορώδες υλικό. Το όλο σύστημα τοποθετείται σε ειδικό

δοχείο πίεσης που αποτελούν το στοιχείο αντίστροφης ώσμωσης, ονομαζόμενο και ως permeator (σχήμα 1.23).



Σχήμα 1.23 Στοιχείο μεμβράνης ελικοειδούς περιέλιξης [1].

Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της διαμόρφωσης είναι το μεγάλο εμβαδόν επιφάνειας μεμβράνης για δεδομένο όγκο. Έτσι με τη διαμόρφωση αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν υλικά με μικρό συντελεστή διαπερατότητας σε νερό. Σοβαρό μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι λόγω της κατασκευής τους λειτουργούν ως φίλτρα για τα αιωρούμενα συστατικά του διαλύματος τροφοδοσίας με αποτέλεσμα οι μεμβράνες αυτού του τύπου να μολύνονται πολύ εύκολα.



Σχήμα 1.24 Στοιχείο μεμβρανών κοίλων ινών [1].

## 1.9 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ

Έχει σημειωθεί μεγάλη πρόοδος σχετικά με την εξοικονόμηση ενέργειας στις μονάδες αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, καθώς η άλμη εξέρχεται από την εγκατάσταση αντίστροφης ώσμωσης σε υψηλή πίεση. Επομένως, είναι λογικό να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα ανάκτησης της ενέργειας από την πίεση που περικλείει η άλμη για να συνεισφέρει στην απαιτούμενη συνολική ενέργεια της αφαλάτωσης. Αυτό συμβαίνει μέσω ενός υδροστροβίλου ο οποίος συνδέεται με μάντα με τον κινητήρα της αντλίας υψηλής πίεσης.



Εικόνα 1.4 Συσκευές ανάκτησης ενέργειας τύπου «Pressure Exchange» στη μονάδα αφαλάτωσης στη Δεκέλεια της Κύπρου [17].

Η μέθοδος αυτή μειώνει κατά πολύ την ενέργεια που καταναλώνεται ανά κυβικό μέτρο αφαλατωμένου νερού, η οποία μπορεί να φτάσει ακόμα και σε εξοικονόμηση 40% στην δαπανώμενη ενέργεια στην αντλία υψηλής πίεσης, λόγω μηχανικής υποβοήθησης του ηλεκτροκινητήρα από τον στρόβιλο. Κάποιες εταιρείες που δραστηριοποιούνται στον κλάδο αυτό, έχουν αναπτύξει σύστημα μονάδας αφαλάτωσης με συνδυασμένη χρήση περιστροφικής πολυβάθμιας αντλίας και στρόβιλου Pelton, ο οποίος κινεί μια άλλη πολυβάθμια αντλία σε σειρά με την πρώτη. Στο σύστημα αυτό, η ηλεκτροκίνητη αντλία αποδίδει μέρος μόνο της απαιτούμενης πίεσης, ενώ η υπόλοιπη απαιτούμενη πίεση προέρχεται από τον στρόβιλο και έτσι επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Μέχρι σήμερα, έχουν μελετηθεί και εφαρμοστεί διάφορα εξελιγμένα συστήματα ανάκτησης ενέργειας για χρήση σε αφαλάτωση. Η απόδοση των συστημάτων αυτών είναι τόσο μεγάλη, ώστε η απόσβεσή τους μπορεί να επιτευχθεί ακόμα και σε ένα έτος λειτουργίας. Τέτοια συστήματα είναι ο εναλλάκτης πίεσης, ο οποίος επιτρέπει στο εισερχόμενο θαλασσινό νερό να πιεστεί από την απορριπτόμενη άλμη υψηλής πίεσης. Η ανάκτηση της ενέργειας με αυτόν τον τρόπο μπορεί να

φτάσει το 94%. Άλλη αρχή ανάκτησης ενέργειας βασίζεται στην αρχή των αξονικών εμβόλων: δύο αντλίες συνδέονται ομοαξονικά, η μία εξ αυτών λειτουργεί αντίστροφα, ως στρόβιλος, εκμεταλλευόμενη την απορριπτόμενη ενέργεια της άλμης και παρέχοντας το αντίστοιχο μηχανικό έργο στην αντλία υψηλής πίεσης.

## 1.10 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Γενικά δεν γίνεται να βγει ένα συμπέρασμα για το ποια μέθοδος αφαλάτωσης είναι η βέλτιστη. Η κάθε μέθοδος μπορεί να αξιολογηθεί μόνο με βάση τις δεδομένες απαιτήσεις του εκάστοτε προβλήματος. Η βέλτιστη μέθοδος είναι σε κάθε περίπτωση αυτή που παράγει αξιόπιστα την ζητούμενη ποσότητα νερού στην αναμενόμενη ποιότητα και με ένα αποδεκτό κόστος. Να σημειωθεί ότι σε όλες τις μεθόδους, αλλού περισσότερο και αλλού λιγότερο, απαιτείται κάποια προ-επεξεργασία του νερού τροφοδοσίας και κάποια μετα-επεξεργασία του παραγόμενου νερού. Στις μεθόδους μεμβρανών γενικά απαιτούνται περισσότερα και στάδια προ- και μετά-επεξεργασίας με αρνητικές επιπτώσεις στο κόστος. Ακόμα, όλες οι μέθοδοι έχουν κάποιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που πρέπει να προσεχθούν ιδιαίτερα.

Τα πλεονεκτήματα των μεθόδων με μεμβράνες έναντι των θερμικών μεθόδων είναι:

- Ø Χαμηλό κόστος εγκατάστασης.
- Ø Χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση.
- Ø Υψηλή δυναμικότητα σε σχέση με το χώρο που καταλαμβάνουν οι μονάδες.
- Ø Υψηλές τιμές ανάκτησης.
- Ø Για να γίνει συντήρηση δεν απαιτείται όλη η μονάδα να σταματήσει να λειτουργεί.
- Ø Οι μεμβράνες απορρίπτονται και τα μικροβιακά περιεχόμενα.
- Ø Λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Τα πλεονεκτήματα των θερμικών μεθόδων έναντι των μεθόδων με μεμβράνες είναι:

- Ø Αξιόπιστη και δοκιμασμένη τεχνολογία.
- Ø Δίνουν νερό υψηλότερης ποιότητας.
- Ø Δεν επηρεάζονται από την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας.
- Ø Όχι κόστος αντικατάστασης μεμβρανών.

Στον πίνακα 1.3, με βάση τα όσα εκτέθηκαν στις προηγούμενες ενότητες, παρουσιάζονται τα μεγέθη μονάδων στα οποία μπορούν να εφαρμοστούν οι διάφορες μέθοδοι καθώς και τυπικές τιμές ανάκτησης νερού και TDS παραγόμενου νερού.

Επιπλέον, οι μέθοδοι μεμβρανών συνεργάζονται καλά με τις Α.Π.Ε. Ακόμη, οι μεμβράνες της αντίστροφης ώσμωσης έχουν χρόνο ζωής 5-7 χρόνια ενώ οι μεμβράνες της ηλεκτροδιάλυσης 7-10 χρόνια. Φυσικά όπως έχει ήδη αναφερθεί η ηλεκτροδιάλυση χρησιμοποιείται μόνο για υφάλμυρο νερό, άρα έχει πολύ μικρότερο πεδίο εφαρμογών από την αντίστροφη ώσμωση που χρησιμοποιείται και σε υφάλμυρο και σε θαλασσινό νερό. Με βάση όλα τα παραπάνω μπορούμε να καταλάβουμε γιατί οι εγκαταστημένες μονάδες αντίστροφης ώσμωσης έχουν αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια και θεωρούνται μία πολύ καλή λύση για την αντιμετώπιση του προβλήματος της λειψυδρίας στον Ελληνικό νησιωτικό χώρο.

Πίνακ  
ας 1.3  
Συγκ  
ριτικά  
στοιχ  
εία  
μεθόδ  
ων  
αφαλ  
άτωσ  
ης

Μέθοδος αφαλάτωσης	Κλίμακα εφαρμογής	TDS παραγόμενου νερού (mg/l)	Ανάκτηση (%)
RO	μικρή-μεγάλη	<500	30-60
MED	μικρή-μεσαία	<10	0-65
MSF	μεσαία-μεγάλη	<50	25-50
VC	μικρή	<10	~50



## 1.11 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Κατά τη μελέτη εγκατάστασης μιας μονάδας αφαλάτωσης, πρέπει να εξετάζονται διαφορές παράμετροι, για να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος. Οι παράμετροι αυτές είναι:

- Ø Συνεργασία με Α.Π.Ε. που αφθονούν στην περιοχή
- Ø Πηγή ενεργειακής τροφοδοσίας μονάδας
- Ø Ενεργειακές απαιτήσεις
- Ø Μέγεθος της παραγωγής
- Ø Ποιότητα του πόσιμου νερού
- Ø Είδος νερού τροφοδοσίας (θαλασσινό ή υφάλμυρο)
- Ø Απαιτήσεις επεξεργασίας νερού τροφοδοσίας
- Ø Κόστος επένδυσης
- Ø Η επιφάνεια γης που απαιτείται για την εγκατάσταση του εξοπλισμού
- Ø Διαθεσιμότητα και εμπειρία προσωπικού

Η επιλογή της μεθόδου έχει να κάνει με πολλές παραμέτρους όπως η τοποθεσία, οι ειδικές καταστάσεις κάθε περιοχής, η διαθεσιμότητα της ενέργειας, η προέλευση του νερού (αλμυρό ή υφάλμυρο) κ.τ.λ. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι οι περισσότερες μέθοδοι απαιτούν μια προεργασία με χημικά στο νερό που θα χρησιμοποιηθεί ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία αλάτων, η διάβρωση, η γήρανση και η γενικότερη δυσλειτουργία του εξοπλισμού. Σε κάποιες από τις διαδικασίες απαιτείται και η χημική επεξεργασία του νερού μετά το τέλος της αφαλάτωσης.

## 2. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### 2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ο άνεμος έχει χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας από τα πανάρχαια χρόνια. Πρώτη χρήση της αιολικής ενέργειας από τον άνθρωπο έγινε για την κίνηση των πλοίων του. Υπάρχουν επίσης ιστορικές και αρχαιολογικές μαρτυρίες ότι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν από πολλούς λαούς χιλιάδες χρόνια πριν για διάφορους σκοπούς. Στην Αίγυπτο σώζονται πύργοι ανεμόμυλων ηλικίας μεγαλύτερης των 3000 ετών. Στην Ελλάδα και στην Περσία οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν από πολύ παλιά για την άλεση δημητριακών και το πότισμα κήπων. Η μεγαλύτερη διάδοση ανεμόμυλων έγινε στην Ολλανδία από τον 15<sup>ο</sup> αιώνα. Εκεί οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν για την αποστράγγιση και τη διοχέτευση στη θάλασσα των υδάτων από πολλές περιοχές της χώρας. Στην Ελλάδα για την άντληση ποτιστικού νερού από πηγάδια χρησιμοποιήθηκαν οι ανεμόμυλοι κυρίως στην Ανατολική Κρήτη.

Το 1888 έγινε για πρώτη φορά χρήση της αιολικής ενέργειας με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον Αμερικανό Charles Brush ενώ η πρώτη μοντέρνα ανεμογεννήτρια κατασκευάστηκε από τον Δανό Poul la Cour. Οι προσπάθειες ανάπτυξης ανεμογεννητριών ατόνησαν μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1970. Στη συνέχεια και μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση εντάθηκαν ξανά και μάλιστα στηρίχτηκαν πολύ στη σύγχρονη αεροδιαστημική τεχνολογία.

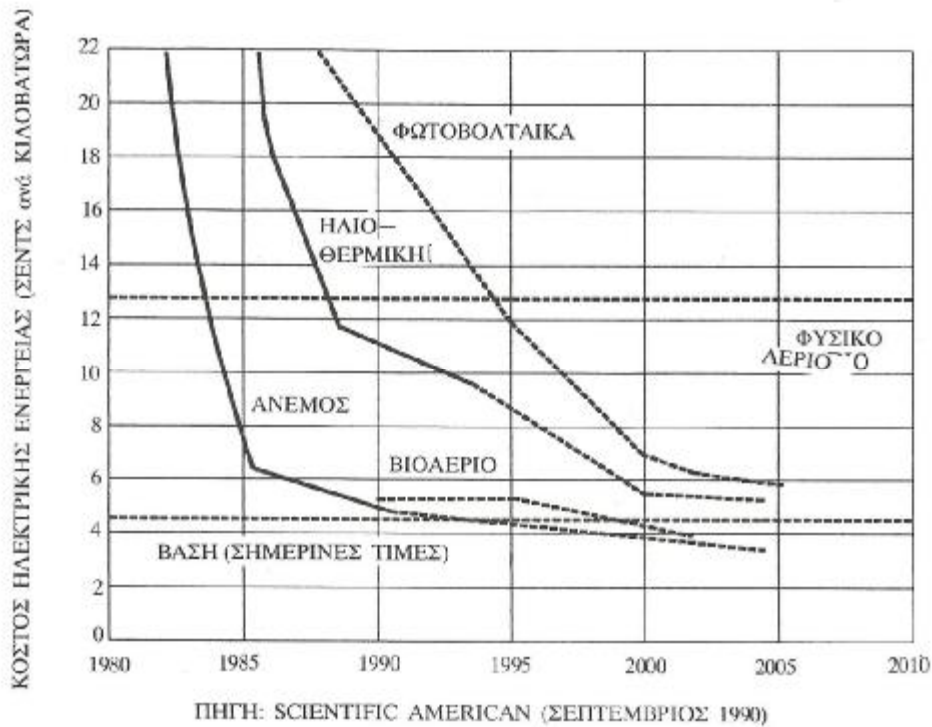
Η αιολική ενέργεια δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, γιατί η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μια περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας έτσι τους ανέμους. Οπότε, άνεμος ονομάζεται κάθε οριζόντια μετακίνηση μάζας ατμοσφαιρικού αέρα. Προκαλείται από διαφορές στην πίεση μεταξύ δύο περιοχών, από τη γενική δηλαδή κυκλοφορία στην ατμόσφαιρα. Για

την πλήρη περιγραφή του ανέμου πρέπει να γνωρίζουμε την ένταση, δηλαδή, την ταχύτητα με την οποία κινείται και τη διεύθυνσή του.

Περίπου το 2% της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στον πλανήτη μας μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια. Η ισχύς των ανέμων σε όλη τη Γη υπολογίζεται σε  $3,6 \times 10^9 MW$ . Ενδεικτικά, οι ενεργειακές ανάγκες των Η.Π.Α. είναι μόλις το 10% της ενέργειας των ανέμων που πνέουν εκεί, γεγονός που αποδεικνύει πόσο πλούσια πηγή ενέργειας είναι ο άνεμος.

Υπολογίζεται ότι στο 25% της επιφάνειας της γης επικρατούν άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας πάνω από 5,1 m/sec, σε ύψος 10 μέτρων πάνω από το έδαφος. Όταν οι άνεμοι πνέουν με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή την τιμή, τότε το αιολικό δυναμικό του τόπου θεωρείται εκμεταλλεύσιμο και οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις μπορούν να καταστούν οικονομικά βιώσιμες, σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα.

Άλλωστε το κόστος κατασκευής των ανεμογεννητριών έχει μειωθεί σημαντικά και μπορεί να θεωρηθεί ότι η αιολική ενέργεια διανύει την "πρώτη" περίοδο ωριμότητας, καθώς είναι πλέον ανταγωνιστική των συμβατικών μορφών ενέργειας. Στο σχήμα 2.1 φαίνεται η χρονική εξέλιξη του κόστους της kWh από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Είναι φανερό ότι η αιολική ενέργεια είναι μία πολύ οικονομική λύση.



Σχήμα 2.1 Σύγκριση του κόστους της kWh από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [4].

Καθώς αναπτύσσονται τεχνολογίες για εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων στη θάλασσα, για ελαφρύτερες κατασκευές και για γεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας, η συμμετοχή της αιολικής ενέργειας στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά, με χρήση ανεμογεννητριών μεγάλης ισχύος και διάσπαρτων μεγάλων αιολικών πάρκων.

## 2.2 ΙΣΧΥΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Η ισχύς του ανέμου δίνεται από τη σχέση:

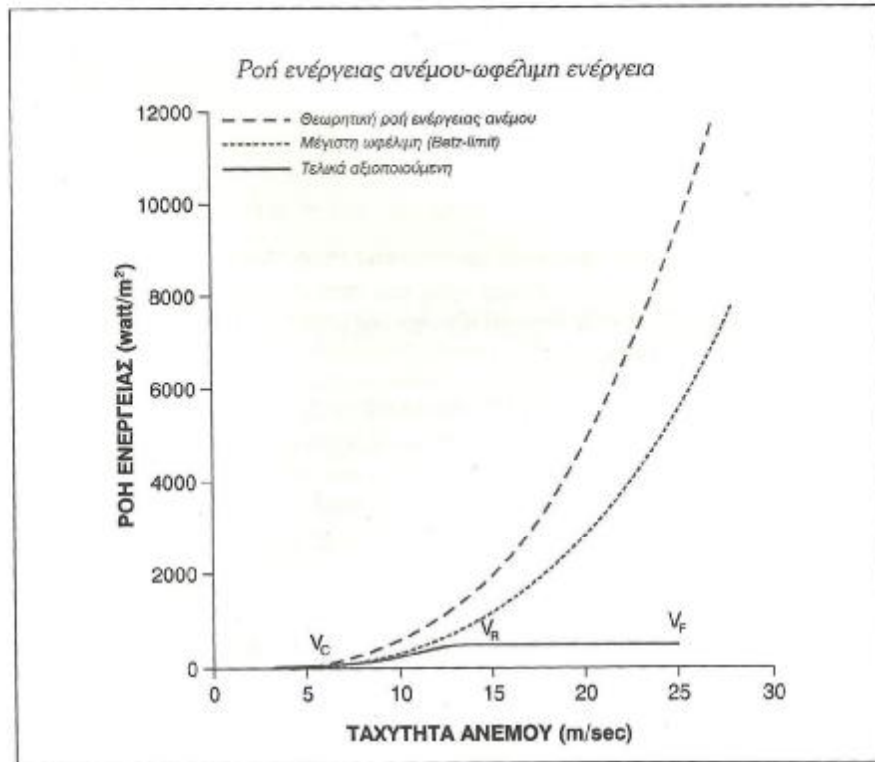
$$P = \frac{1}{2} \rho S u^3 \quad (2.1)$$

όπου  $\rho$ ,  $u$  είναι η πυκνότητα και η ταχύτητα του ανέμου αντίστοιχα και  $S$  είναι το εμβαδόν της επιφάνειας στην οποία προσπίπτει ο άνεμος.

Όμως, και στην ιδανική περίπτωση που μπορούμε να παραβλέψουμε τις μηχανικές απώλειες ή τις απώλειες λόγω στροβιλισμού, είναι αδύνατον να δεσμευθεί ολόκληρη η ισχύς του ανέμου για τους παρακάτω λόγους:

- Ø Ο αέρας που διαπερνά την πτερωτή μιας αιολικής μηχανής πρέπει να διαθέτει την απαραίτητη ταχύτητα ώστε να απομακρύνεται από αυτή, βάσει του θεωρήματος διατήρησης μάζας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ένα αξιόλογο μέρος της κινητικής ενέργειας του προσπίπτοντος επί της πτερωτής, ανέμου να χάνεται με τη δέσμη διαφυγής του ανέμου.
- Ø Ένα μικρό ποσοστό της μάζας του αέρα, που θα περνούσε από την επιφάνεια που καταλαμβάνει η πτερωτή, στην πραγματικότητα παρακάμπει την πτερωτή, λόγω της απόκλισης των γραμμών ροής που η πτερωτή επιβάλλει στον προσπίπτοντα άνεμο.
- Ø Τέλος, ένα μικρό επίσης μέρος της κινητικής ενέργειας του ανέμου παραμένει ανεκμετάλλευτο, δεδομένης της χρονικής υστέρησης προσανατολισμού της πτερωτής στη διεύθυνση του ανέμου. Βέβαια σήμερα με τα σύγχρονα (ηλεκτρονικής βάσης) συστήματα

προσανατολισμού η απόκριση της ανεμογεννήτριας είναι σχεδόν ακαριαία. Παρόλα αυτά, σε περιπτώσεις διαρκούς μεταβολής της διεύθυνσης του ανέμου, είναι αναπόφευκτη η απώλεια μέρους της ενέργειάς του.



Σχήμα 2.2 Δυνατότητα αξιοποίησης της αιολικής ισχύος [2].

Εκτός από τους παραπάνω προφανείς λόγους μειωμένης αξιοποίησης του αιολικού δυναμικού μιας αέριας δέσμης, μηχανικές αλλά και αεροδυναμικές απώλειες επάνω στις πτερυγώσεις καθώς και άλλοι περιορισμοί, μειώνουν σημαντικά σε μέγεθος και σε εύρος το πραγματικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό μιας περιοχής (Σχήμα 2.2).

### 2.3 ΩΦΕΛΙΜΗ ΙΣΧΥΣ

Η ισχύς που αφαιρείται από τον άνεμο μέσω της ανεμογεννήτριας είναι η διαφορά της ισχύος που μεταφέρει ο αέρας που προσπίπτει στην έλικα μείον την ισχύ που μεταφέρει ο αέρας που αποχωρεί από αυτήν με μικρότερη ταχύτητα. Η θεωρία σύμφωνα με την οποία μια αιολική μηχανή δεν μπορεί να δεσμεύσει όλη την κινητική ενέργεια του ανέμου ονομάζεται θεωρία του δίσκου ενέργειας. Τελικά, η ισχύς του ανέμου που δεσμεύεται από την ανεμογεννήτρια δίνεται από τη σχέση:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho S u^3 C_p \quad (2.2)$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του αέρα όπως και προηγουμένως,  $u$  είναι η ταχύτητα του προσπίπτοντος ανέμου,  $S$  είναι η επιφάνεια του δίσκου, δηλαδή, η επιφάνεια που σαρώνουν τα πτερύγια κατά την περιστροφή τους και  $C_p$  είναι ο συντελεστής ισχύος ή αλλιώς συντελεστής απόδοσης του δρομέα.

Ο συντελεστής  $C_p$  προκύπτει μέσω μετρήσεων και υπολογισμών και εκφράζει το κλάσμα της ισχύος που προσπίπτει στην έλικα το οποίο κατακρατείται για περαιτέρω εκμετάλλευση. Η υπόλοιπη ισχύς αποτελεί την κινητική ενέργεια του αέρα μετά την πρόσκρουση στην έλικα. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει ο συντελεστής  $C_p$  είναι:

$$C_{p \max} = \frac{19}{27} \approx 0,593 \quad (2.3)$$

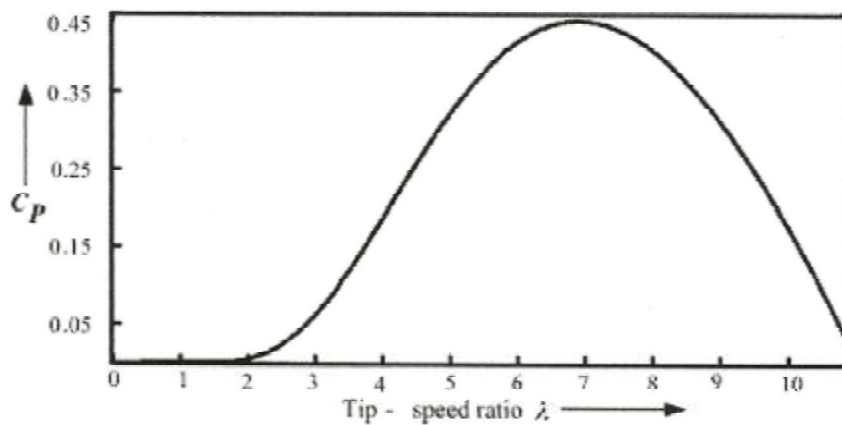
Το όριο αυτό ονομάζεται όριο του Betz. Το όριο αυτό είναι κατά κάποιο τρόπο ο μέγιστος βαθμός απόδοσης ενός συστήματος με ιδανική έλικα κάτι ανάλογο με το βαθμό απόδοσης Carnot των θερμοδυναμικών κύκλων. Ο συντελεστής  $C_p$  εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας και στην απλούστερη περίπτωση είναι μια συνάρτηση του λόγου ακροπτερυγίου  $\lambda$  και της κλίσης  $\beta$  των πτερυγίων. Ο λόγος ακροπτερυγίου (tip-speed ratio)  $\lambda$  ορίζεται ως ο λόγος της ταχύτητας του άκρου του πτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου:

$$\lambda = \frac{W_{AG} \cdot R}{u} \quad (2.4)$$

όπου  $W_{AG}$  είναι η γωνιακή ταχύτητα της ανεμογεννήτριας και  $R$  είναι η ακτίνα των πτερυγίων.

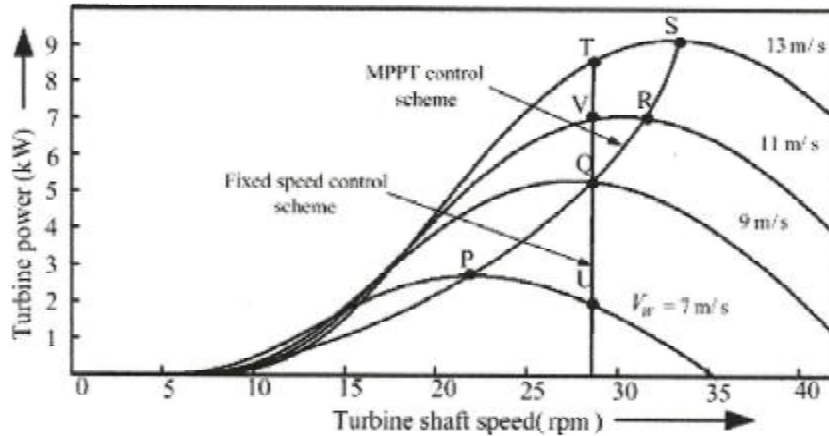
Στην πραγματικότητα ο συντελεστής ισχύος του δρομέα θα είναι ακόμα μικρότερος λόγω φαινομένων συνεκτικότητας, πεπερασμένου αριθμού πτερυγίων και της υπάρχουσας συστροφής του ρεύματος του αέρα πίσω από το δρομέα. Τελικά, στις περισσότερες εφαρμογές ο συντελεστής ισχύος  $C_p$  παίρνει τιμές κοντά στο 0,4.





Σχήμα 2.3 Τυπική σχέση μεταξύ του αεροδυναμικού συντελεστή  $C_p$  με το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου  $\lambda$  [8].

Εισάγοντας στη σχέση (2.2) τη σχέση μεταξύ  $C_p$  και  $\lambda$  προκύπτουν οι καμπύλες του Σχήματος 2.3 που δίνουν την αεροδυναμική ισχύ της έλικας συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Υπάρχει μία καμπύλη, που ονομάζεται βέλτιστη καμπύλη ελέγχου, που διέρχεται από τα σημεία όπου η αεροδυναμική ισχύς μεγιστοποιείται για κάθε τιμή της ταχύτητας του ανέμου. Όταν ακολουθείται αυτή η καμπύλη σε κάθε ταχύτητα ανέμου παρουσιάζεται ο βέλτιστος λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου και ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής. Από το ίδιο σχήμα είναι φανερό πως για λειτουργία σταθερών στροφών η αεροδυναμική ισχύς παίρνει χαμηλότερες τιμές εφόσον η έλικα δεν περιστρέφεται με τον μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή.



Σχήμα 2.3 Αεροδυναμική ισχύς της έλικας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα για διαφορετικές ταχύτητες του ανέμου και η βέλτιστη καμπύλη ελέγχου [8].

Για να υπολογίσουμε την ηλεκτρική ισχύ που αποδίδει μια ανεμογεννήτρια πρέπει να λάβουμε υπόψη και το μηχανικό και τον ηλεκτρικό συντελεστή απόδοσης οπότε θα έχουμε:

$$P_{hl} = \frac{1}{2} \rho S u^3 C_p h_M h_H \quad (2.5)$$

Μέση ισχύς  $P_m$  μιας ανεμογεννήτριας ονομάζεται η σταθερή ισχύς που θα έπρεπε να έχει μια ανεμογεννήτρια για να ικανοποιήσει την ετήσια ενεργειακή ζήτηση της συγκεκριμένης εγκατάστασης. Η ονομαστική ισχύς  $P_N$  της ανεμογεννήτριας ορίζεται από τη σχέση:

$$P_m = 0,2P_N \quad (2.6)$$

Η μέση ισχύς μπορεί να υπολογιστεί εύκολα από τις ενεργειακές ανάγκες των καταναλωτών. Στη συνέχεια από τη σχέση (2.6) υπολογίζεται η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί στη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Μία πολύ σημαντική παράμετρος που χαρακτηρίζει την απόδοση μιας ανεμογεννήτριας είναι ο συντελεστής φορτίου που ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικά παραγόμενης ενέργειας σε κάποιο χρονικό διάστημα (συνήθως έτος) προς την ενέργεια που θα παραγόταν αν η ανεμογεννήτρια λειτουργούσε συνεχώς στην ονομαστική της ισχύ.

Μια ανεμογεννήτρια αρχίζει να αποδίδει ισχύ σε μια ταχύτητα ανέμου  $u_E$  που ονομάζεται ταχύτητα έναρξης και παύει τη λειτουργία της πέρα από μία ταχύτητα ανέμου  $u_S$  που ονομάζεται ταχύτητα συστολής. Συνήθεις τιμές για τις δύο οριακές ταχύτητες είναι:

$$u_E \approx 3,5 \frac{m}{s} \quad \text{και} \quad 22 \frac{m}{s} \leq u_S \leq 26 \frac{m}{s}$$

Εφόσον η αποδιδόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας φτάσει στην ονομαστική της τιμή, τότε αυτή παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Ονομαστική ταχύτητα,  $u_N$ , της ανεμογεννήτριας ονομάζεται η μικρότερη ταχύτητα ανέμου για την οποία εμφανίζεται η ονομαστική της ισχύς.

Εμπειρικά προκύπτει ότι η βέλτιστη κατάσταση λειτουργίας της ανεμογεννήτριας για τη μέγιστη ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι όταν:

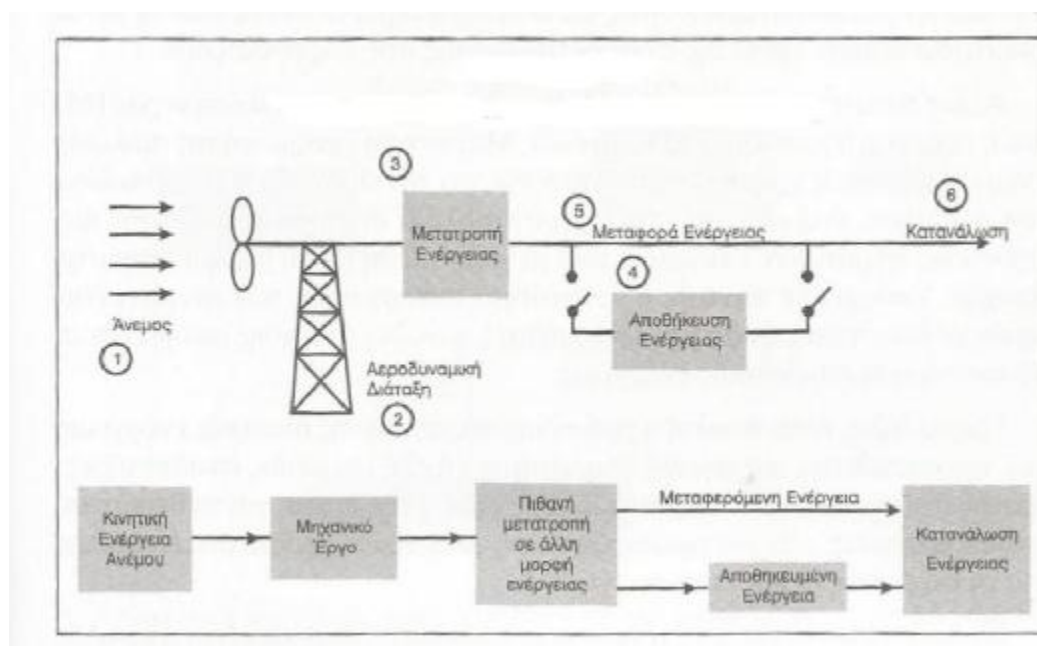
$$u_N = 1,9\bar{u} \quad (2.7)$$

όπου  $\bar{u}$  είναι η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου.

Στην πράξη θεωρούμε ότι έχουμε πολύ αποδοτική λειτουργία αν η ονομαστική ταχύτητα είναι από 1,5 έως 2 φορές μεγαλύτερη από τη μέση ταχύτητα του ανέμου.

## 2.4 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούνται ανεμογεννήτριες οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Η σχεδίαση μιας ανεμογεννήτριας προϋποθέτει τη μελέτη του αεροδυναμικού, του μηχανικού και του ηλεκτρικού της μέρους.



Σχήμα 2.4 Τυπική διάταξη μετατροπής αιολικής ενέργειας [2].

Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας βασίζεται στη κίνηση των περυγίων της, τα οποία περιστρέφονται όταν φυσάει ο άνεμος. Η κίνηση αυτή μεταδίδεται σε ένα άξονα περιστροφής που με τη βοήθεια ενός συστήματος προσανατολισμού, βρίσκεται συνεχώς παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου. Η κινητική ενέργεια του άξονα περιστροφής μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα

από μια γεννήτρια. Η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται από το μέγεθος της, την ταχύτητα του ανέμου και την ποιότητα κατασκευής της. Το μέγεθος είναι συνάρτηση των αναγκών που καλείται να εξυπηρετήσει, οι οποίες ποικίλουν από μερικές εκατοντάδες μέχρι μερικά εκατομμύρια Watt.

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να παράγουν κατόπιν μετατροπής επιθυμητό είδος εναλλασσόμενης τάσης (με ασύγχρονες ή σύγχρονες μηχανές), ή συνεχή τάση (με μηχανές συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες) που είναι απαραίτητο για κάποιες ειδικές εφαρμογές.

Συνήθως οι ανεμογεννήτριες συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο, συνθέτοντας έτσι αιολικά πάρκα (συστοιχίες πολλών ανεμογεννητριών), τα οποία εγκαθίστανται και λειτουργούν σε περιοχές υψηλού αιολικού δυναμικού, διοχετεύοντας την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο. Στην Ελλάδα, υπάρχουν αρκετά αιολικά πάρκα σε διάφορες περιοχές της χώρας (Κάρυστος, Λαύριο, Μήλος κ.α.) και σχεδιάζεται η δημιουργία και άλλων σε διάφορες τοποθεσίες.

Υπάρχει επίσης δυνατότητα οι ανεμογεννήτριες να λειτουργούν αυτόνομα για κάλυψη ή τη συμπλήρωση ενεργειακών αναγκών απομακρυσμένων κατοικιών, αγροκτημάτων κ.ο.κ. Στις περιπτώσεις αυτές υπάρχει, όπως και στην περίπτωση των αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων, ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας με εγκατάσταση μπαταριών ή τη χρήση ηλεκτροπαραγωγών ζευγών (H/Z).



Εικόνα 2.1 Αιολικό πάρκο στην έρημο Mojave στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ [18].

Σήμερα οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα αυτό, έχουν καταστήσει δυνατή την αθόρυβη λειτουργία των ανεμογεννητριών, την μείωση του όγκου τους και του κόστους εγκατάστασής τους. Η αιολική βιομηχανία είναι σήμερα η ταχύτερα αναπτυσσόμενη ενεργειακή τεχνολογία, με εντυπωσιακούς ρυθμούς ανάπτυξης τα τελευταία χρόνια. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της Δανίας, που σήμερα καλύπτει σχεδόν το 25% των αναγκών της σε ηλεκτρισμό με αιολική ενέργεια, ενώ ο εθνικός στόχος της χώρας αυτής είναι να καλύπτει το 50% των αναγκών της με αιολική ενέργεια ως το 2030. Ο Ευρωπαϊκός Σύνδεσμος Αιολικής Ενέργειας (EWEA) εκτιμά ότι η ισχύς των εγκατεστημένων αιολικών συστημάτων θα αγγίξει τα 180GW το 2020.

Καθώς αναπτύσσονται τεχνολογίες για εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων στη θάλασσα, για ελαφρύτερες κατασκευές και για γεννήτριες μεταβλητής

ταχύτητας, η συμμετοχή της αιολικής ενέργειας στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά, με χρήση ανεμογεννητριών μεγάλης ισχύος και διάσπαρτων μεγάλων αιολικών πάρκων.

Φυσικά, οι ανεμογεννήτριες δεν είναι βλαβερές για την υγεία. Δεν εκπέμπουν κανενός είδους ακτινοβολία ή ρύπο που θα μπορούσε να βλάψει την υγεία. Αντιθέτως, με τη λειτουργία τους παράγεται πράσινη ενέργεια και εξοικονομείται η χρήση άλλων ρυπογόνων μορφών ενέργειας ενώ αποφεύγεται η έκλυση στην **ατμόσφαιρα ρύπων και αερίων** που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Παράλληλα οδηγούν στη μείωση του οικολογικού αποτυπώματος είτε ατομικά είτε για την επιχείρηση του επενδυτή.

**Όσον αφορά το θόρυβο**, είναι σαφές ότι πέρα από τα ευρύτερα κοινωνικά οφέλη, μια ανεμογεννήτρια θα πρέπει να βρίσκεται σε αρμονία με το περιβάλλον της. Ο θόρυβος μιας ανεμογεννήτριας προέρχεται από τα μηχανικά της μέρη αλλά και από τον αεροδυναμικό θόρυβο που δημιουργείται από την κίνηση των φτερών. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας έχουν επιτευχθεί σχεδιασμοί ανεμογεννητριών που παράγουν πολύ χαμηλά επίπεδα θορύβου.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι είναι απαραίτητο να λαμβάνονται μέτρα αντικεραυνικής προστασίας των ανεμογεννητριών. Οι μεγάλες ανεμογεννήτριες εγκαθίστανται συνήθως στο υψηλότερο σημείο της περιοχής. Έτσι, η προστασία τους από κεραυνούς θεωρείται επιβεβλημένη.



## 2.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Στην ενότητα αυτή θα γίνει μία σύντομη αναφορά στα είδη των ανεμογεννητριών που υπάρχουν με βάση διάφορα κριτήρια όπως:

- Ø Η θέση του άξονα
- Ø Ο έλεγχος της ισχύος
- Ø Η μεταβολή των στροφών

### 2.5.1 Με βάση τη θέση του άξονα

Οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται με βάση τη θέση του άξονα τους, σε δύο κατηγορίες:

- Ø Οριζόντιου άξονα οι οποίες είναι οι πλέον διαδεδομένες και
- Ø Κατακόρυφου άξονα

Στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι παράλληλος προς τη διεύθυνση του ανέμου ενώ στις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα ο άξονας περιστροφής είναι κάθετος στην επιφάνεια της γης και κάθετος στη ροή του ανέμου.

#### A) Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

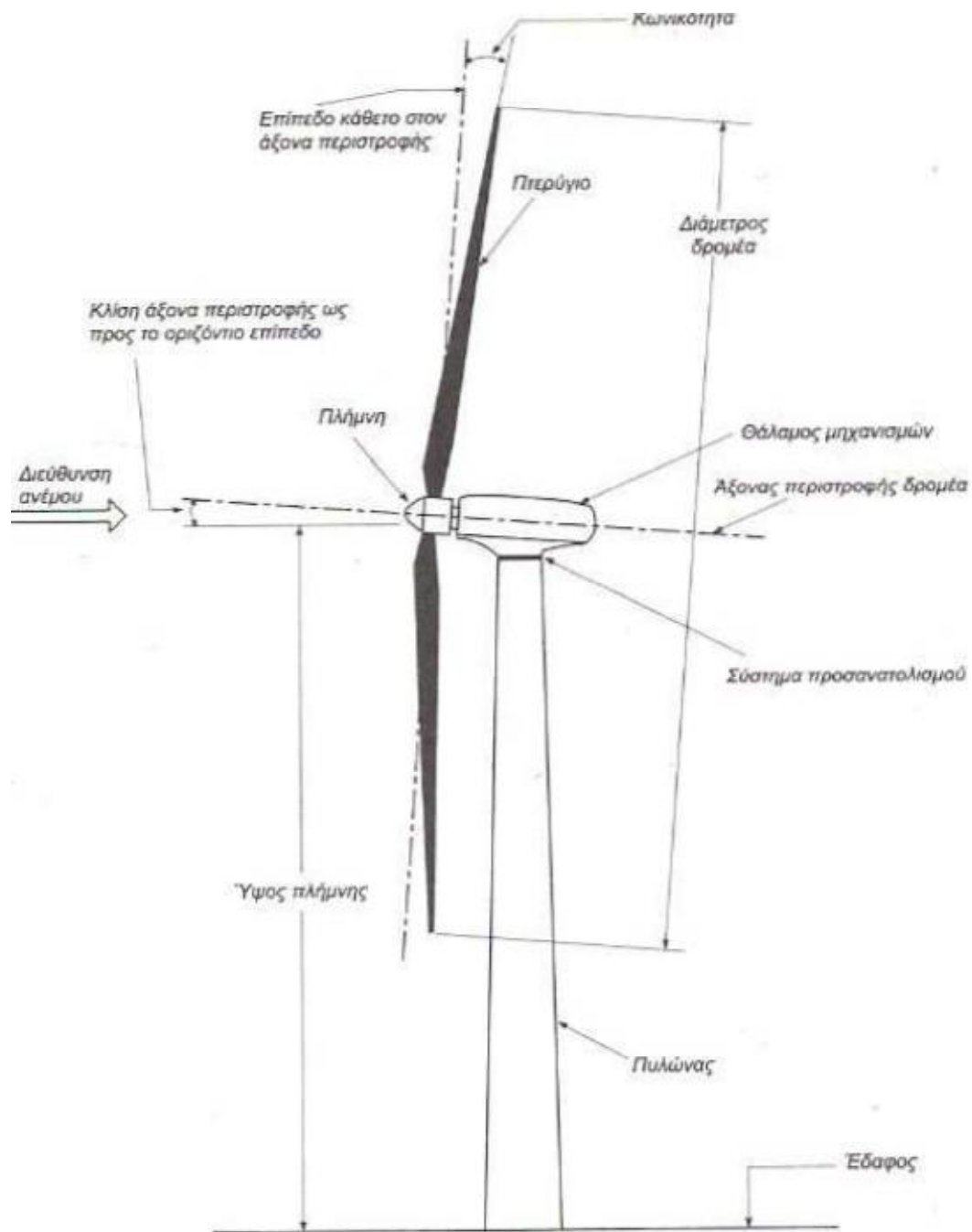
Τα μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα είναι:

**1) Ο Πύργος:** μπορεί να είναι μεταλλικός (δικτυωτός ή συνηθέστερα σωληνωτός) αλλά και από οπλισμένο σκυρόδεμα, για ανεμογεννήτρια μεγάλης ισχύος. Βασικής σημασίας για την επιλογή του πύργου είναι ο προβλεπόμενος τρόπος μεταφοράς και εγκατάστασής του, σε συνδυασμό με την όλη συναρμολόγηση της ανεμογεννήτριας και την έδρασή της.

Ο πύργος υπολογίζεται ως πακτωμένη δοκός, η οποία υφίσταται σύνθετη στατική και κυρίως δυναμική καταπόνηση. Ο σχεδιασμός του πύργου ώστε να αποφεύγονται συνθήκες συντονισμού έχει βασική σημασία.

**2) Ο Δρομέας (Έλικα):** οι ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται με 2 (πιο σπάνια) ή 3 πτερύγια. Η στήριξη των πτερυγίων της έλικας στον άξονα του δρομέα μπορεί να είναι σταθερή (πτερύγιο σταθερού βήματος) ή μεταβλητή (πτερύγιο μεταβλητού βήματος). Επίσης το πτερύγιο μπορεί να αποτελείται από δύο τμήματα: ένα τμήμα σταθερό, στηριζόμενο στον άξονα και επιπλέον ένα ρυθμιζόμενο ακροπτερύγιο. Οι παραπάνω παραλλαγές είναι βασικής σημασίας για τον έλεγχο ισχύος-στροφών της ανεμογεννήτριας καθώς και για την ασφάλεια της λειτουργίας της.

Η τεχνολογία κατασκευής των πτερυγίων βρίσκεται σε συνεχή εξέλιξη και πολλά είδη υλικών έχουν χρησιμοποιηθεί. Για μικρές ανεμογεννήτριες (έως 100KW) χρησιμοποιούνται συνήθως πολυουρεθάνη, υαλονήματα (fiberglass) και ξύλο, για μεσαίου μεγέθους (μερικές εκατοντάδες KW) υαλονήματα σε πολλαπλές στρώσεις και εναλλαγή κατευθύνσεων ενώ για τις μεγάλες (της τάξεως MW) ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται συνήθως ανθρακονήματα.



Σχήμα 2.5 Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα [2].

**3) Ο Χώρος Μηχανισμών (Άτρακτος):** περιλαμβάνει κυρίως:

∅ το σύστημα εδράσεως του δρομέα στον πύργο

- Ø τον πολλαπλασιαστή στροφών
- Ø τη γεννήτρια
- Ø το φρένο
- Ø τους μηχανισμούς ελέγχου του βήματος των πτερυγίων και
- Ø το σύστημα περιστροφής και προσανατολισμού προς την κατεύθυνση του ανέμου.



Εικόνα 2.2 Άτρακτος ανεμογεννήτριας [18].

Το ηλεκτρικό σύστημα της ανεμογεννήτριας μπορεί να περιλαμβάνει τη γεννήτρια, το διακοπτικό εξοπλισμό, τον εξοπλισμό προστασίας, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς καθώς και ένα σύστημα εποπτείας και ελέγχου.

Ένα σημαντικό στοιχείο για την όλη διαμόρφωση των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα είναι ο περιορισμός του εύρους των ταλαντώσεων και

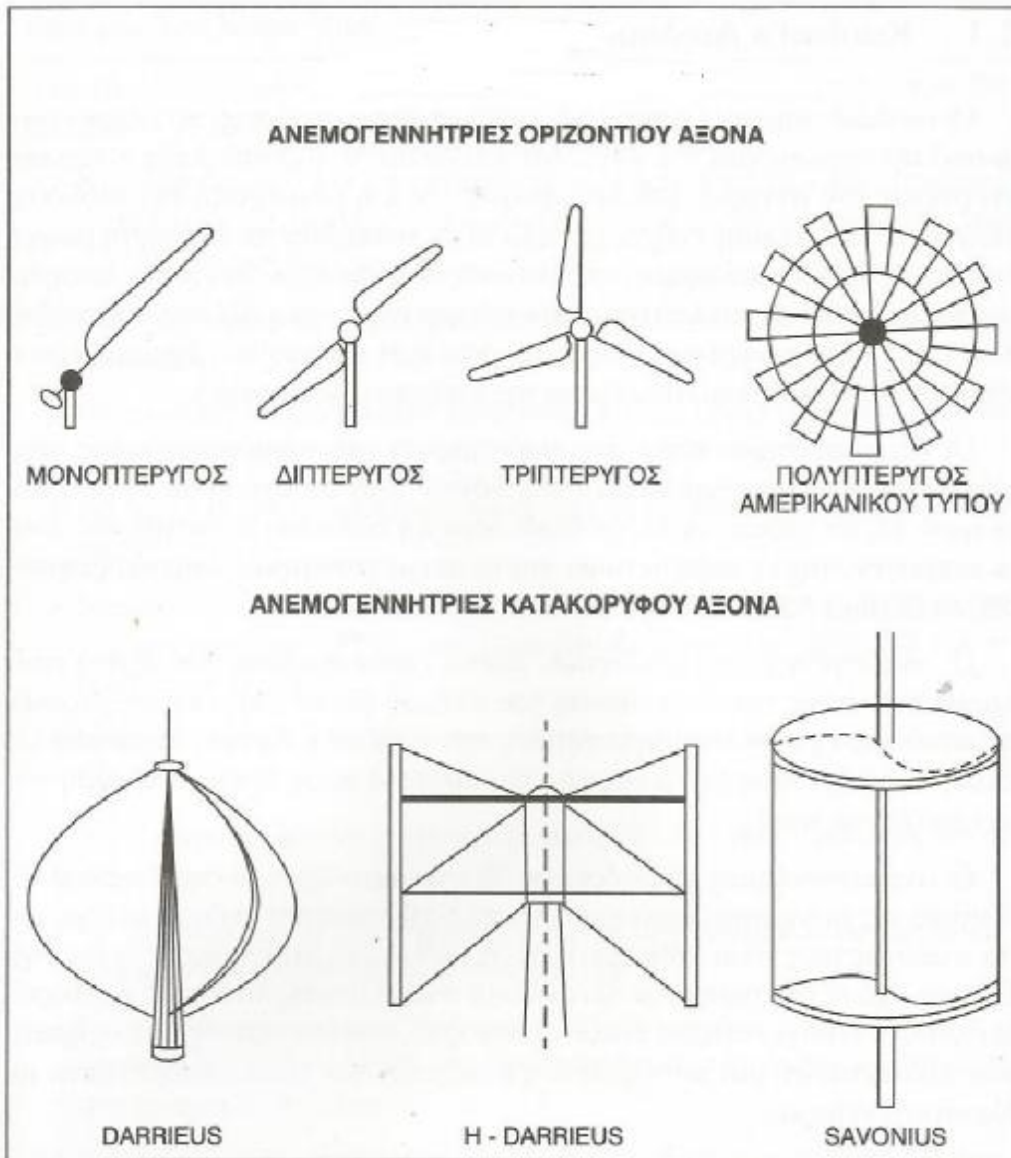
ιδιαίτερα η αποφυγή συνθηκών συντονισμού της όλης διάταξης με τις συχρότητες ταλαντώσεων που προκαλεί ο άνεμος.

Ο μηχανισμός προσανατολισμού της ανεμογεννήτριας περιστρέφει την άτρακτο και την έλικα ώστε το επίπεδο περιστροφής της τελευταίας να είναι κάθετο προς την κατεύθυνση του ανέμου. Η έλικα μπορεί να τοποθετηθεί είτε σε προσήνεμη διάταξη (up-wind), δηλαδή μπροστά από τον πύργο στήριξης, είτε σε υπήνεμη (down-wind), δηλαδή πίσω από τον πύργο στήριξης σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου.

#### A) Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Οι κύριοι τύποι ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι οι Darrieus και Savonius ενώ υπάρχουν και σχέδια ανεμογεννητριών στον άξονα των οποίων υπάρχουν και οι δύο τύποι.

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτούν σύστημα αυτοματισμού για τον προσανατολισμό του δρομέα προς τη διεύθυνση του ανέμου καθώς επίσης και ότι η εγκατάσταση του συστήματος μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια (πολλαπλασιαστής στροφών, γεννήτρια) βρίσκεται στο επίπεδο του εδάφους, στη βάση της ανεμογεννήτριας. Τα παραπάνω πλεονεκτήματα των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα, καθώς και το γεγονός ότι είναι κατασκευαστικά απλούστερες από τις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα, αντισταθμίζει εν μέρει το μικρότερο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος.



Σχήμα 2.6 Βασικοί τύποι ανεμογεννητριών [2].

Σήμερα στην παγκόσμια αγορά έχουν καταγραφεί περίπου 200 κατασκευαστές και συνολικά περίπου 600 διαφορετικά μοντέλα μικρών ανεμογεννητριών. Από αυτά το 80% αφορούν σε ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα και το 20% σε ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα. Στις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα η αγορά περιορίζεται σε ανεμογεννήτριες με ονομαστική ισχύ έως 10kW. Μικρός αριθμός κατασκευαστών ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα διαθέτουν στην αγορά μοντέλα ανεμογεννητριών με ονομαστική ισχύ μεταξύ των 10kW και 100kW.

### **2.5.2 Με βάση τον έλεγχο της ισχύος**

Ο έλεγχος της παραγόμενης ισχύος γίνεται με μηχανικά μέσα και ειδικότερα με τον έλεγχο ορισμένων αεροδυναμικών στοιχείων που σχετίζονται με τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας.

#### A) Έλεγχος βήματος (pitch control)

Σε αυτήν την περίπτωση μεταβάλλεται η γωνία κλίσης των πτερυγίων  $\beta$  για την επίτευξη του ελάχιστου λόγου αντίστασης / άνωση. Πιο συγκεκριμένα ανάλογα με την ταχύτητα η γωνία  $\beta$  μεταβάλλεται για να έχουμε το βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή. Με την τεχνική αυτή διατηρείται σταθερά η ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας και επιτυγχάνεται η βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής απόδοσης των πτερυγίων, ο έλεγχος της παραγόμενης ισχύος και ο περιορισμός των δυνάμεων που καταπονούν τα πτερύγια. Είναι γρήγορη μέθοδος ρύθμισης της ισχύος, δίνει τη δυνατότητα εκμετάλλευσης μεγάλου εύρους ταχυτήτων του ανέμου μαζί με όλες τις διακυμάνσεις και τις πιθανές ριπές και η εκκίνηση της ανεμογεννήτριας γίνεται πιο εύκολα αφού το πτερύγιο τοποθετείται σε σωστή θέση ως προς τον άνεμο. Από την άλλη μεριά είναι ακριβή μέθοδος ενώ εξαιτίας της μηχανικής περιστροφής του πτερυγίου εμφανίζεται η ανάγκη για συχνή συντήρηση καθώς

και αυξημένη πιθανότητα βλάβης αυτών. Επιπλέον τα ηλεκτρονικά που απαιτούνται για αυτήν τη λειτουργία είναι ευάλωτα σε περιπτώσεις κεραυνών ή ακραίες θερμοκρασίες.

#### B) Έλεγχος της ανυψωτικής δύναμης των πτερυγίων-αεροδυναμικός έλεγχος (passive stall regulation)

Σε αυτήν την περίπτωση τα πτερύγια είναι κατασκευασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε μετά από ορισμένη ταχύτητα ανέμου, να παύει να αυξάνεται η ανυψωτική δύναμη και συνεπώς να αποφεύγεται η φόρτιση της ανεμογεννήτριας πέρα από τα όρια από τα οποία έχει σχεδιαστεί.

#### Γ) Yawing system

Σύμφωνα με αυτό το σύστημα ελέγχου η έλικα περιστρέφεται πάντα με τέτοιο τρόπο ώστε το επίπεδο περιστροφής της να είναι κάθετο στην ταχύτητα του ανέμου. Σε πολύ μεγάλες ταχύτητες όπου μπορεί η παραγόμενη ισχύς να ξεπεράσει την ονομαστική και να προκληθούν διάφορα προβλήματα όπως υπερθέρμανση των τυλιγμάτων του στάτη, τότε η έλικα στρέφεται έτσι ώστε το επίπεδό περιστροφής της να μην είναι κάθετο στην ταχύτητα. Η περιστροφή της έλικας γίνεται με ένα πτερύγιο-ουρά που βρίσκεται στο πίσω από τη γεννήτρια.

#### Δ) Έλεγχος με κιβώτιο ταχυτήτων

Ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής, αλλάζουμε το λόγο μετάδοσης της κίνησης για να μεταβάλλουμε την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα για να πετύχουμε τις βέλτιστες στροφές

#### E) Έλεγχος της ισχύος με πέδηση της έλικας

Αυτή η μέθοδος δεν εφαρμόζεται απευθείας όταν η έλικα έχει πολύ υψηλή ταχύτητα , αλλά αφού πρώτα αυτή έχει μειωθεί με κάποιο άλλο μέσο.



## ΣΤ) Έλεγχος της ισχύος μέσω ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία από χρησιμοποιούμενα συστήματα ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος και διάφοροι τρόποι ελέγχου τους. Χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με στόχο την μείωση της μεταβλητότητας της ενεργού ισχύος και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής καθώς και τον έλεγχο της άεργου ισχύος.

### **2.5.3 Με βάση τη μεταβολή των στροφών**

Γίνεται διάκριση σε:

- Ø Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών και
- Ø Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών

#### A) Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών

Οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών αποτελούν το σημαντικότερο κομμάτι από τις ανεμογεννήτριες εν λειτουργία αν και η χρήση τους έχει σημαντικούς περιορισμούς. Μπορούν να χρησιμοποιούν είτε γεννήτριες επαγωγής είτε σύγχρονες γεννήτριες. Η ασύγχρονη γεννήτρια παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι δεν παράγει την άεργο ισχύ που απαιτείται για την εγκατάσταση του ηλεκτρομαγνητικού της πεδίου σε αντίθεση με τη σύγχρονη γεννήτρια. Οι σύγχρονες γεννήτριες παρουσιάζουν αυξημένη ταλάντωση της απόκρισής τους σε συνθήκες μεταβαλλόμενου ανέμου καθώς και αυξημένο κόστος και βάρος.

Στις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών η ταχύτητα του δρομέα είναι σταθερή και πρακτικά ίση με τη σύγχρονη, με αποκλίσεις της τάξης του 1%, δηλαδή όσο και η ολίσθηση ονομαστικής λειτουργίας. Επίσης οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου παρουσιάζουν και τα πλεονεκτήματα της

εξαιρετικής απλότητας και αξιοπιστίας καθώς και των μηδενικών αναγκών συντήρησής τους.

Παράλληλα όμως η λειτουργία των σταθερών στροφών παρουσιάζει και κάποια σημαντικά μειονεκτήματα , τα σημαντικότερα από τα οποία είναι:

- Ø Λειτουργία με μη βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή
- Ø Αυξημένη μεταβλητότητα ισχύος εξόδου
- Ø Χαμηλός συντελεστής ισχύος εξόδου
- Ø Μεταβατικά φαινόμενα εκκίνησης και ζεύξης – απόζευξης

Τα παραπάνω σημαντικά προβλήματα, έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στη στροφή τόσο του επιστημονικού ενδιαφέροντος όσο και των κατασκευαστών προς τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, οι οποίες φαίνονται να δίνουν αν όχι ριζική, τουλάχιστον ικανοποιητική λύση σε πολλά από τα παραπάνω.

## B) Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών

Η ιδέα των μεταβλητών στροφών, στηρίζεται στις αρχές λειτουργίας ενός σφονδύλου. Όταν παρατηρείται αύξηση της αεροδυναμική ισχύος (της ισχύος που λαμβάνεται από τον άνεμο), μέρος της μετατρέπεται σε κινητική αποκόπτοντας με αυτόν τον τρόπο τις γρήγορες μεταβολές της. Η αντίστροφη λειτουργία συμβαίνει κατά τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου.

Για να είναι η απόδοση της ανεμογεννήτριας βέλτιστη, πρέπει η ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων να είναι ανάλογη της ταχύτητας του ανέμου. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας απαιτεί σημαντική μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων. Κάτι τέτοιο επιχειρήθηκε παλιότερα με διάφορες μεθόδους, όπως με χρήση υδραυλικών συστημάτων ή κιβωτίων ταχυτήτων μεταβαλλόμενου λόγου, αλλά αργότερα οι μέθοδοι αυτές εγκαταλείφθηκαν.

Τη θέση των παραπάνω μεθόδων πήρανε τα συστήματα ηλεκτρονικών μετατροπέων συχνότητας τα οποία έχουνε λίγες απώλειες και είναι αρκετά

αξιόπιστα. Τα συστήματα αυτά παρεμβάλλονται ανάμεσα στο δίκτυο και στην ηλεκτρική γεννήτρια και έτσι ταχύτητα περιστροφής αποδεσμεύεται από τη σταθερή συχνότητα του δικτύου και είναι δυνατή η μεταβολή της εντός ευρέων ορίων.

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών έχουν αρχίσει να κυριαρχούν στην αγορά λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν όπως τα παρακάτω:

- Ø Βελτιστοποίηση ενεργειακής απόδοσης της ανεμογεννήτριας
- Ø Εξομάλυνση της μεταβλητότητας των μηχανικών ροπών
- Ø Περιορισμός καταπονήσεων-μεγαλύτερη διάρκεια ζωής
- Ø Μείωση τυχαίας μεταβλητότητας της ισχύος εξόδου
- Ø Περιορισμός ταχέων διακυμάνσεων της τάσης (flicker)
- Ø Δυνατότητα μείωσης ενεργού ισχύος εξόδου
- Ø Δυνατότητα ελέγχου άεργου ισχύος εξόδου
- Ø Χαμηλά επίπεδα θορύβου
- Ø Διευκόλυνση διαδικασιών εκκίνησης

Τα μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, μπορούν να τοποθετηθούν κυρίως στον οικονομικό τομέα. Πιο συγκεκριμένα, τα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρονικά ισχύος που είναι απαραίτητα για τη σύνδεση τους στο δίκτυο, επιβαρύνουν κατά πολύ το κόστος τους, μιας και αυτά αντιπροσωπεύουν από οικονομικής πλευράς το μεγαλύτερο μέρος του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Εκτός όμως από τα οικονομικά μειονεκτήματα της λειτουργίας των μεταβλητών στροφών, πρέπει να αναφερθούν και τα παρακάτω μειονεκτήματα:

- Ø Αυξημένη πολυπλοκότητα
- Ø Εγκατάσταση φίλτρων

## Ø Παραμόρφωση ρευμάτων γεννήτριας – αύξηση απωλειών

Όμως, τα παραπάνω προβλήματα καθώς και το πρόβλημα του κόστους, επιλύονται πλέον χάρη στην πρόοδο της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος, η οποία επιτρέπει τη σταδιακή μείωση του κόστους τους, όσο και τη βελτίωση των λειτουργικών τους χαρακτηριστικών κάνοντας τη χρήση τους ακόμα πιο δημοφιλή.

### **3. ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΑΝΔΡΟ**

#### **3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗ ΝΗΣΟ ΑΝΔΡΟ**

Η Άνδρος είναι το βορειότερο νησί των Κυκλάδων και δεύτερη σε μέγεθος μετά τη Νάξο. Βρίσκεται μεταξύ της Ευβοίας και της Τήνου και χωρίζεται από την μεν πρώτη με τον πορθμό του Καφηρέως (Κάβο Ντόρο), πλάτους 6 περίπου ναυτικών μιλίων, από τη δε Τήνο με τον διάυλο του Στενού ή Αυλώνας, πλάτους  $\frac{3}{4}$  του μιλίου. Εκτείνεται από Βορειοδυτικά προς Νοτιοανατολικά και έχει σχήμα επιμήκες με μέγιστο μήκος 40 km και πλάτος 17 km. Η έκταση του νησιού ανέρχεται στα 380 km<sup>2</sup> και το συνολικό μήκος της ακτογραμμής του υπολογίζεται σε 148 km.

Ο Δήμος Άνδρου με πρωτεύουσα τη Χώρα ή Άνδρος χωρίζεται σε τρεις Δημοτικές ενότητες:

- α) Άνδρου, που περιλαμβάνει όλα τα χωριά του κεντρικού τμήματος της νήσου
- β) Κορθίου, που περιλαμβάνει όλα τα χωριά της νοτίου Άνδρου
- γ) Υδρούσας, που περιλαμβάνει όλα τα χωριά της βόρειας Άνδρου.

Ο πληθυσμός της Άνδρου, σύμφωνα με την τελευταία απογραφή του 2011 και τα πρώτα προσωρινά αποτελέσματα, ανέρχεται σε 9.221 κατοίκους παρουσιάζοντας μείωση από το 2001.

Κατά τη διάρκεια του χρόνου το νησί της Άνδρου εμφανίζει δύο κύριες τάσεις: τάση συρρίκνωσης του πληθυσμού την χειμερινή περίοδο, λόγω κυρίως της μείωσης των ευκαιριών απασχόλησης, και αυξητική τάση την θερινή περίοδο, οφειλόμενη κυρίως στον τουρισμό και την παραθεριστική κίνηση. Η διαφορά ανάμεσα στον μόνιμο πληθυσμό και τον εποχικό τουρισμό στην Άνδρο, όπως και στα περισσότερα νησιά του Αιγαίου, είναι τεράστια και φτάνει το καλοκαίρι περίπου τους 40.000 κατοίκους έναντι 10.000 τον χειμώνα.

### 3.2 ΥΔΡΕΥΣΗ-ΑΡΔΕΥΣΗ

Το νησί της Άνδρου διαθέτει θετικό υδατικό ισοζύγιο, που σημαίνει ότι θα μπορούσαν οι αξιοποιήσιμοι υδατικοί πόροι που υπάρχουν να καλύπτουν τις ανάγκες των κατοίκων για ύδρευση και άρδευση. Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980, οι περισσότεροι οικισμοί της Άνδρου δε διέθεταν δίκτυο ύδρευσης ή αποχέτευσης.

Από τους 11 οικισμούς της Δημοτικής Ενότητας Υδρούσας, μόνο 5 οικισμοί διαθέτουν δίκτυο ύδρευσης, το οποίο είναι οργανωμένο σε Γαύριο και Μπασι κατά 90%, στην Παλαιόπολη κατά 80%, στο δημοτικό διαμέρισμα Απροβάτου κατά 50%, ενώ το δίκτυο στο Μακροτόνταλο είναι εμπειρικό και διέρχεται μέσα από τα κτήματα. Για τους άλλους διάσπαρτους οικισμούς (Άρνη-Ρέματα, Κατάκοιλος, Αμμόλοχος, Βιτάλι, Άνω Γαύριο, Φελλός), γίνεται αίτηση για γεωτρήσεις, οι οποίες οδηγούν σιγά-σιγά σε εξάντληση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Λόγω της οικιστικής ανάπτυξης οι ανάγκες ύδρευσης τα τελευταία χρόνια πολλαπλασιάστηκαν.

Στη Δημοτική Ενότητα Άνδρου, υπάρχει οργανωμένο δίκτυο σε ποσοστό 100%, με συνολική έκταση 86.7 χιλιόμετρα. Παρά τις μεγάλες απώλειες του δικτύου, που φτάνουν το 85%, δεν παρουσιάζονται ιδιαίτερα προβλήματα υδροδότησης λόγω του πλεονάσματος των υδάτων. Μόνο στην περιοχή Μεσαριάς-Λαμύρων εμφανίζονται προβλήματα την καλοκαιρινή περίοδο.

Στη Δημοτική Ενότητα Κορθίου το μήκος του δικτύου είναι 35.65 χιλιόμετρα και καλύπτει το 97% του Δήμου. Παρουσιάζεται μικρή έλλειψη νερού κυρίως κατά τους θερινούς μήνες, σχεδόν σε όλους τους οικισμούς (Όρμος Κορθίου, Καππαριά κ.τ.λ.) η οποία εκτιμάται στα 20.000 m<sup>3</sup>/έτος. Στην περιοχή Παλαιοκάστρου παρουσιάζεται κάποια έλλειψη της τάξης των 5.000 m<sup>3</sup>/έτος.

Οι ανάγκες για αρδευτικούς σκοπούς και διάφορες κτηνοτροφικές εργασίες, καλύπτονται από πηγές και πηγάδια (γεωτρήσεις). Δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία για την ποσότητα του νερού που καταναλώνεται για άρδευση. Εκτιμάται ότι οι αρδευόμενες εκτάσεις είναι περίπου 9000 στρέμματα, άρα υπολογίζεται κατανάλωση 4500000 m<sup>3</sup>/έτος περίπου. Η μεταφορά του προς άρδευση νερού γίνεται με παλιές μεθόδους π.χ. αυλάκια, με αποτέλεσμα οι απώλειες να είναι σημαντικές.

Η ποιότητα του υπόγειου νερού μπορεί να χαρακτηριστεί ως ικανοποιητική για όλες τις χρήσεις. Η καλή του ποιότητα οφείλεται στη γεωλογική δομή από σχιστόλιθους, στις πολλές βροχοπτώσεις, στο ορεινό ανάγλυφο, στην απουσία βιομηχανικής δραστηριότητας, στην απουσία της

εντατικής γεωργίας. Φαινόμενα υφαλμύρωσης είχαν αναφερθεί παλαιότερα στις κοιλάδες Γαυρίου, Μπατσίου και Κορθίου.

Με δεδομένη την υπεράντληση τα τελευταία χρόνια, τον μεγάλο αριθμό γεωτρήσεων κυρίως ιδιωτικών και τις επιπτώσεις από τις μεγάλες πυρκαγιές που έχουν ως αποτέλεσμα ο μεγαλύτερος όγκος των κατακρημνισμάτων να καταλήγει στην θάλασσα γίνονται προσπάθειες για την ενίσχυση του υδροφόρου ορίζοντα. Στα πλαίσια αυτά βρίσκεται σε εξέλιξη πρόγραμμα σε συνεργασία του Δήμου Άνδρου και του ΤΕΙ Αθήνας για την δημιουργία μικρών φραγμάτων με στόχο τον εμπλουτισμό του υδροφόρου ορίζοντα και παράλληλα την αποθήκευση νερού σε μικρές λιμνοδεξαμενές για κάλυψη των αναγκών ύδρευσης και άρδευσης των γύρω περιοχών. Στις περιοχές αυτές θα αυξηθούν σημαντικά οι αρδευόμενες εκτάσεις.

### **3.3 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΩΣΜΩΣΗΣ**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η χρήση συστημάτων ανάκτησης ενέργειας κατά τη διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης δίνει τη δυνατότητα να εξοικονομηθεί έως και το 40% της συνολικά καταναλισκόμενης ενέργειας. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας (ηλεκτρική ενέργεια ανά  $m^3$  παραγόμενου νερού) εξαρτάται από τη δυναμικότητα της εγκατάστασης, το είδος των μεμβρανών που χρησιμοποιούνται, την αλατότητα του νερού (και γενικά τη χημική του σύνθεση), τη θερμοκρασία λειτουργίας και φυσικά την ποιότητα του εξερχομένου νερού.

Με την αύξηση της αλατότητας του νερού τροφοδοσίας, αυξάνεται ανάλογα και η κατανάλωση ενέργειας της μονάδας. Ομοίως η παρουσία χημικών ουσιών διαλυμένων μέσα στο νερό τροφοδοσίας αυξάνει το κόστος της επεξεργασίας που πρέπει να προηγηθεί. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία λειτουργίας το κόστος παραγωγής γενικά μειώνεται. Η υψηλή ποιότητα του παραγόμενου πόσιμου νερού αυξάνει αρκετά το συνολικό κόστος μιας μονάδας αφαλάτωσης. Τέλος, ο τρόπος διαχείρισης της άλμης επίσης επηρεάζει το κόστος. Η απόρριψη της άλμης στη θάλασσα αποτελεί γενικά τη φθηνότερη λύση.

Η ειδική ενεργειακή κατανάλωση μιας μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης δυναμικότητας από περίπου 10.000 έως περίπου 20.000

$m^3$  πόσιμου νερού την ημέρα, από θαλασσινό νερό τροφοδοσίας και με ανάκτηση ενέργειας εκτιμάται σε περίπου  $2kWh/m^3$  [9] .

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, οι ανάγκες που πρέπει να καλυφθούν από τη μονάδα αντίστροφης ώσμωσης είναι  $25000m^3/έτος$ . Συνεπώς η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι  $50000 kWh/έτος$  ή  $50MWh/έτος$ .

### **3.4 ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ**

Στον πίνακα 3.1 που ακολουθεί φαίνεται η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου στη θέση Κολυβάρι στην Άνδρο. Οι τιμές της πυκνότητας πιθανότητας σε κάθε διάστημα ταχυτήτων του ανέμου προέρχονται από τη σχετική βιβλιογραφία [3].



Πίνακας 3.1 Κατανομή της ταχύτητας του ανέμου στη θέση Κολυβάρι στην Άνδρο [3]

Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Πυκνότητα πιθανότητας	Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Πυκνότητα πιθανότητας
0-1	0.0130	14-15	0.0240
1-2	0.0420	15-16	0.0210
2-3	0.0560	16-17	0.0150
3-4	0.0710	17-18	0.0090
4-5	0.0760	18-19	0.0030
5-6	0.0700	19-20	0.0020
6-7	0.0820	20-21	0.0010
7-8	0.0790	21-22	0.0010
8-9	0.0920	22-23	0.0010
9-10	0.0760	23-24	0.0000
10-11	0.0620	24-25	0.0000
11-12	0.0660	25-26	0.0000
12-13	0.0600	26-27	0.0000
13-14	0.0430	27-28	0.0000

### 3.5 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Η ολική ενέργεια που παράγεται από μία ανεμογεννήτρια σε ένα έτος υπολογίζεται με βάση την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας,  $N_0$ , από τη σχέση [3]:

$$E = CF \cdot \Delta t \cdot N_0 \quad (3.1)$$

όπου CF είναι ο μέσος συντελεστής φορτίου (capacity factor) και  $\Delta t$  το χρονικό διάστημα ενός έτους.

Ο μέσος συντελεστής φορτίου δίνεται από τη σχέση [3]:

$$CF = \Delta \cdot \omega \quad (3.2)$$

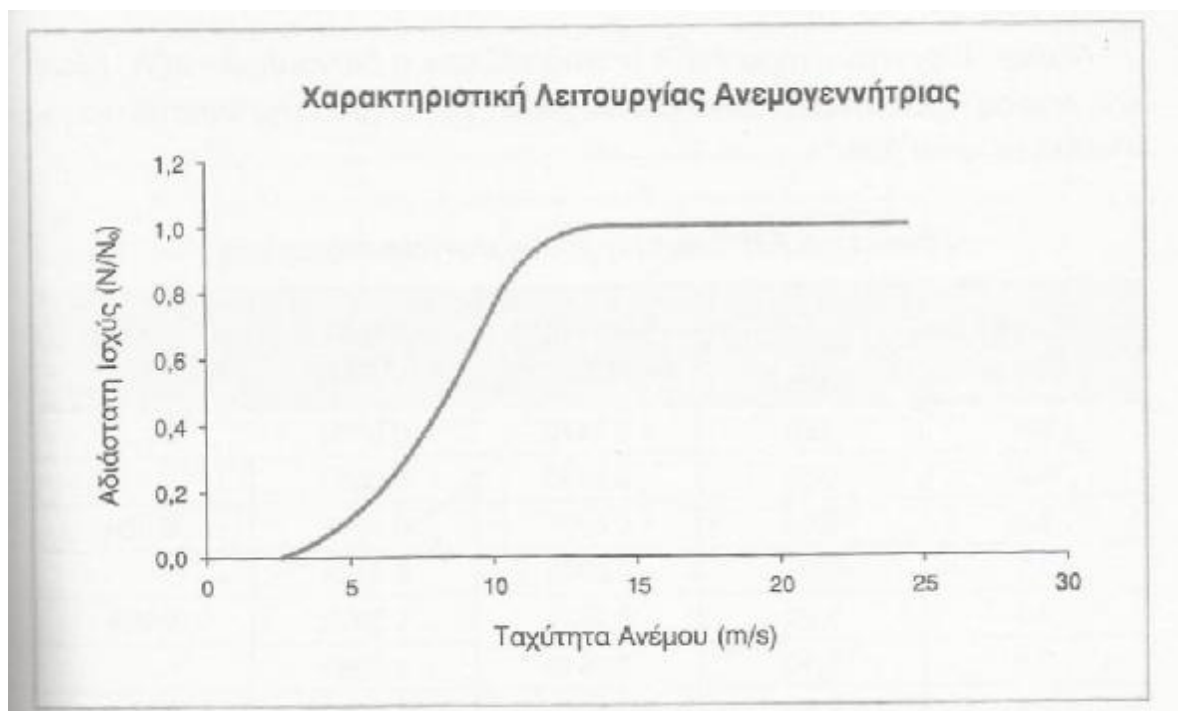
όπου  $\Delta$  είναι ο συντελεστής διαθεσιμότητας και  $\omega$  ο μέσος συντελεστής ισχύος

Ο συντελεστής διαθεσιμότητας εκφράζει το ποσοστό του χρόνου που η ανεμογεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Είναι μικρότερος του 100% λόγω τυχαίων βλαβών, συντήρησης κ.ά. Ο μέσος συντελεστής ισχύος εκφράζει το βαθμό συνεργασίας της ανεμογεννήτριας με το αιολικό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης και υπολογίζεται από το παρακάτω ολοκλήρωμα:

$$\omega = \int_{v_c}^{v_F} \frac{N(v)}{N_0} f(v) dv \quad (3.3)$$

όπου:  $\frac{N(v)}{N_0}$  είναι η καμπύλη λειτουργίας της ανεμογεννήτριας,  $f(v)$  είναι η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου στην εν λόγω περιοχή και  $v_c$ ,  $v_F$  είναι η ταχύτητα έναρξης και συστολής της ανεμογεννήτριας.

Στην παρούσα εφαρμογή θα χρησιμοποιηθεί ανεμογεννήτρια της οποίας η καμπύλη λειτουργίας φαίνεται στο σχήμα 3.2. Από το διάγραμμα αυτό βρίσκουμε τις ταχύτητες έναρξης και συστολής της ανεμογεννήτριας:  $v_C = 3\text{ m/s}$  και  $v_F = 24.5\text{ m/s}$



Σχήμα 3.2 Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας της ανεμογεννήτριας που θα χρησιμοποιηθεί [3].

### 3.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΣΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΣΧΥΟΣ

Ο μέσος συντελεστής ισχύος  $\omega$  θα υπολογιστεί από τη σχέση (3.3). Ο λόγος  $\frac{N(v)}{N_0}$  είναι γνωστός από το διάγραμμα 3.2 και η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου για την Άνδρο δίνεται στον πίνακα 3.1. Το ολοκλήρωμα της σχέσης (3.3) θα υπολογιστεί αριθμητικά με τη μέθοδο Simpson. Ο τύπος της μεθόδου Simpson είναι:

$$\int_{x_0}^{x_2} f(x)dx = \frac{h}{3}[f(x_0) + 4f(x_1) + f(x_2)] \quad (3.7)$$

όπου:

$$h = x_2 - x_1 = x_1 - x_0 \quad (3.8)$$

είναι το βήμα της μεθόδου.

Πιο συγκεκριμένα υπολογίζουμε το ζητούμενο ολοκλήρωμα στο διάστημα  $(x_0, x_2)$  χρησιμοποιώντας τις τιμές της συνάρτησης στα ακραία σημεία και στο μέσο  $x_1$  του διαστήματος. Για να έχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό μας χωρίζουμε το ολοκλήρωμα σε άθροισμα πολλών ολοκληρωμάτων. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον πίνακα 3.2.

Στην πρώτη στήλη του πίνακα 3.2 βρίσκονται οι μέσες ταχύτητες κάθε διαστήματος ταχυτήτων του πίνακα 3.1. Στη δεύτερη στήλη παρατίθεται η αντίστοιχη τιμή της αδιάστατης ισχύος όπως προέκυψε από τη χαρακτηριστική καμπύλη της ανεμογεννήτριας (σχήμα 3.1).

Τέλος, στην πέμπτη στήλη του πίνακα 3.2 βρίσκονται οι τιμές του μέσου συντελεστή ισχύος όπως υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Simpson. Ενδεικτικά η

τιμή  $\omega=0.005$  που αντιστοιχεί σε ταχύτητα 4.5m/s στην πραγματικότητα είναι η τιμή του ολοκληρώματος από 0.5 έως 4.5 m/s.

Πίνακας 3.2 Αριθμητικός Υπολογισμός του μέσου συντελεστή ισχύος με τη μέθοδο Simpson

Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Πυκνότητα πιθανότητας $f(v)$	Αδιάστατη ισχύς $N(v)/N_0$	$\frac{N(v)}{N_0} f(v)$	$\omega(v)$
0.5	0.0130	0.00	0.0000	
1.5	0.0420	0.00	0.0000	
2.5	0.0560	0.00	0.0000	0.000
3.5	0.0710	0.03	0.0021	
4.5	0.0760	0.09	0.0068	0.005
5.5	0.0700	0.16	0.0112	
6.5	0.0820	0.25	0.0205	0.029
7.5	0.0790	0.36	0.0284	
8.5	0.0920	0.50	0.0460	0.089
9.5	0.0760	0.67	0.0509	
10.5	0.0620	0.83	0.0515	0.176
11.5	0.0660	0.93	0.0614	
12.5	0.0600	0.98	0.0588	0.295

13.5	0.0430	1.00	0.0430	
14.5	0.0240	1.00	0.0240	0.380
15.5	0.0210	1.00	0.0210	
16.5	0.0150	1.00	0.0150	0.421
17.5	0.0090	1.00	0.0090	
18.5	0.0030	1.00	0.0030	0.439
19.5	0.0020	1.00	0.0020	
20.5	0.0010	1.00	0.0010	0.443
21.5	0.0010	1.00	0.0010	
22.5	0.0010	1.00	0.0010	0.445
23.5	0.0000	1.00	0.0000	
24.5	0.0000	1.00	0.0000	0.445

Τελικά σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς στο διάστημα από 0.5 έως 24.5 η τιμή του μέσου συντελεστή ισχύος  $w$  προκύπτει ότι είναι:

$$w = 0.445 \quad (3.9)$$

### 3.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Ο μέσος συντελεστής φορτίου από την σχέση (3.2) υπολογίζεται ως εξής:

$$CF = D \times w = 0.92 \times 0.445 = 0.41$$

όπου για τον συντελεστή διαθεσιμότητας χρησιμοποιήσαμε την τυπική τιμή  $\Delta=0.92$ .

Θέτοντας στην (3.1) την τιμή της απαιτούμενης ενέργειας κατά έτος για τη λειτουργία της μονάδας αντίστροφης ώσμωσης μπορούμε να υπολογίσουμε την ονομαστική ισχύ που πρέπει να έχει η ανεμογεννήτρια:

$$N_0 = \frac{E}{CF \times Dt} = \frac{50000kWh}{0.41 \times 365 \times 24h} = 13.9kW$$

Συνεπώς μία ανεμογεννήτρια ονομαστικής απόδοσης 14 kW είναι αρκετή για την εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών της μονάδας αφαλάτωσης.

## 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η συνδυασμένη λειτουργία ανεμογεννήτριας και μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης για την κάλυψη των αναγκών σε πόσιμο νερό της νήσου Άνδρου. Η παροχή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος από ανεμογεννήτρια για την μονάδα αφαλάτωσης επιλέχθηκε λόγω του υψηλού αιολικού δυναμικού του νησιού

Συμπεραίνεται, με βάση τα προηγούμενα κεφάλαια, ότι η αφαλάτωση με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεί, τουλάχιστον εν μέρει, μια οικονομικά βιώσιμη λύση στο πρόβλημα ύδρευσης της Άνδρου. Έχει την δυνατότητα να προσφέρει την πλήρη κάλυψη των αναγκών σε πόσιμο υγιεινό νερού προσαρμοσμένο στη ζήτηση ενώ παράλληλα είναι μια περιβαλλοντικά φιλική λύση. Η παρατηρούμενη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των διεργασιών αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση αναμένεται να μειώσει σημαντικά το κόστος παραγωγής νερού, με αποτέλεσμα η προτεινόμενη λύση να γίνει οικονομικά ελκυστικότερη σε σχέση με τις συμβατικές υπάρχουσες μεθόδους παροχής νερού.

Η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης για την παραγωγή πόσιμου νερού από θαλασσινό είναι η πλέον επικρατούσα σήμερα μέθοδος με προηγμένη τεχνολογία και μεγάλο αριθμό επιτυχών εφαρμογών σε όλο τον κόσμο. Η τεχνολογία αυτή είναι η πλέον αξιόπιστη, αποδοτική και οικονομική χωρίς ιδιαίτερα δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Δεν θεωρείται πλέον μια ιδιαίτερα ενεργοβόρος διαδικασία παραγωγής πόσιμου νερού

Η επέκταση της χρήσης της αιολικής ενέργειας σε όλο και περισσότερες εφαρμογές θα έχει πολλαπλά οφέλη. Η Εθνική Οικονομία και η ΔΕΗ ωφελούνται από την μείωση της κατανάλωσης και από την εξάρτηση του πετρελαίου καθώς και από την μείωση εκπομπών ρύπων και CO<sub>2</sub>. Δημιουργούνται επιπλέον οικονομικές δραστηριότητες στα νησιά καθώς και νέες θέσεις εργασίας. Εφαρμόζονται τεχνολογίες φιλικές προς το περιβάλλον και προς την κατεύθυνση της βιώσιμης ανάπτυξης. Τα νησιά αποκτούν αυτάρκεια σε πόσιμο νερό καλής ποιότητας όλο το χρόνο. Η βελτίωση του επιπέδου ζωής των κατοίκων των νησιών θα έχει σαν αποτέλεσμα σημαντικά περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά οφέλη.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1] Σ. Αυλωνίτης, Εισαγωγή στην Τεχνολογία Νερού και Αφαλάτωσης, εκδόσεις Ίων 2006.
- 2] Ι. Καλδέλλης, Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας, εκδόσεις Σταμούλης 2005.
- 3] Ι. Καλδέλλης, Υπολογιστικές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας, εκδόσεις Σταμούλης 2005
- 4] Γ. Μπεργελές, Ανεμοκινητήρες, εκδόσεις Συμεών 2005.
- 5] Επιχειρησιακό Σχέδιο Αγροτικής Ανάπτυξης 2014-2020, Περιφέρεια Νοτίου Αιγαίου.
- 6] Ν. Καλλίτσης, Αντίστροφη Ώσμωση με Χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ 2012.
- 7] Υφαντίδης Α., Αφαλάτωση με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανολογίας, ΤΕΙ Καβάλας 2014.
- 8] Π. Κοτσαμπόπουλος, Μελέτη, κατασκευή και προσομοίωση της λειτουργίας μικρής ανεμογεννήτριας αξονικής ροής, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ 2010.
- 9] Κανετάκης Δ., Οικονομοτεχνική Μελέτη Μονάδας Αφαλάτωσης με Αιολική Ενέργεια για την Κάλυψη των Αναγκών Ύδρευσης της νήσου Σύρου, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ 2008.
- 10] Συσκάκη Κ., Τεχνολογίες Αφαλάτωσης Νερού, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανολογίας, ΤΕΙ Κρήτης 2013.
- 11] Πέππα Φ., Ηλιακή Αφαλάτωση και Μελέτη Ηλιακού Αποστακτήρα στην Περιοχή της Αθήνας, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ 2007.
- 12] Διαμαντόπουλος Μ., Μελέτη Σκοπιμότητας Μονάδας Αφαλάτωσης με Χρήση Αιολικής Ενέργειας, Τμήμα Μηχανολογίας, ΤΕΙ Σερρών.
- 13] Γεωργίου Μ., Οι Μονάδες Αφαλάτωσης στην Κύπρο.

14] Μανωλάκος Δ., Συστήματα Αφαλάτωσης στο Νησιωτικό Χώρο, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 3 Μαρτίου 2009.

15] Μουτάφης Π., Κάλυψη της Ζήτηση; Ενέργειας και Νερού με Αιολική Ενέργεια και Αφαλάτωση στη Νήσο Σίκινο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ 2008.

16] Δαγκαλίδης Α., Αφαλάτωση Νερού, Κλαδική Μελέτη, Τράπεζα Πειραιώς, Ιανουάριος 2009.

17] Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων Κύπρου, <http://www.moa.gov.cy/>

18] Θυμάκης Γ. και Τσούνης Δ., Μελέτη Αιολικού Πάρκου Ισχύος 2.4 MW, Τμήμα Ηλεκτρολογίας, ΤΕΙ Πειραιά 2013.